

Jouko Hepola & Esa Kurkela

Energiantuotannon tehostaminen fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa



Energiantuotannon tehostaminen fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa

Jouko Hepola & Esa Kurkela

VTT Prosessit



ISBN 951-38-6069-8 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6070-1 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © VTT 2002

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Prosesstit, Biologinkuja 3-5, PL 1601, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 460 493

VTT Processer, Biologgränden 3-5, PB 1601, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 460 493

VTT Processes, Biologinkuja 3-5, P.O.Box 1601, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 460 493

Toimitus Leena Ukoski

Otamedia Oy, Espoo 2002

Hepola, Jouko & Kurkela, Esa. Energiantuotannon tehostaminen fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa [Advanced energy production based on fossil and renewable fuels]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2155. 65 s.

Avainsanat energy production, pressurized combustion, gasification, coal, black liquor, IGCC, coproduction, fuel cells, synthesis gas, catalytic combustors

Tiivistelmä

Selvityksen kohteena olivat kaasutus- ja polttotekniikat, yhdistetyt energian, polttoaineiden ja kemikaalien tuotantovaihtoehdot, korkealämpötilapolttokennot ja polttokennohybridit.

Paineistetun leijukerrospolton potentiaali ja markkinanäkymät ovat heikentyneet mm. perinteisen höyryvoimalan kehityksen, maakaasukombitekniikan hyvän kilpailukyvyn, kiristyneiden päästönormien sekä kaasutuskombitekniikan kehitysnäkymien myötä. Hiilen paineistettuun pölypoltoon perustuva kombivoimalaitosprosessin kehitys on vielä alkuvaiheessa.

Toistaiseksi maailmalla rakennetut happikaasutukseen perustuvat IGCC-laitokset ovat olleet luonteeltaan demonstraatiolaitoksia. IGCC-tekniikan oletetaan kaupallistuvan ensin öljynjalostamoihin integroiduissa pohjaöljyn kaasutussovelluksissa ja sitten kivihiilikäyttöisissä lauhdevoimaloissa. Ilmakaasutukseen perustuvalla, ns. yksinkertaistulla kaasutuskombiprosessitekniikalla on toistaiseksi toteutettu vain yksi koelaitos, jonka koekäyttö saatiin päätökseen vuonna 1999. Teknisesti prosessi on valmis myös suuren kokoluokan demonstrointiin.

Kehitteillä olevista mustalipeän kaasutusprosesseista teknisesti pisimmällä on Chemrec-prosessi. Ilmanpaineinen prosessi on demonstroitu ja paineistetun prosessin demonstrointi on käynnistymässä sekä Ruotsissa että Yhdysvalloissa. Mustalipeän kaasutus tarjoaisi mahdollisuuden nostaa sellutehtaiden energiantuotannon rakennusastetta huomattavasti.

Katalyyttisen polton odotetaan kaupallistuvan aluksi maakaasua käyttävissä pienissä kaasuturbiineissa ja bensiiniä käyttävissä mikroturbiineissa. Katalyyttinen poltto voi olla vaihtoehto myös biomassan kaasutuskaasun poltossa syntyvän polttoaineperäisen NO_x:n eliminoimisessa.

Moottorivoimaloissa voidaan käyttää myös kiinteistä polttoaineista valmistettua kaasutuskasua tai pyrolyysiöljyä. Tekniikan kaupallistumisen esteenä pienvoimalasovelluk-

sisä ovat olleet tekniset ongelmat, erityisesti kaasun puhdistukseen ja öljyn laatuun liittyvät kysymykset.

Kaasutustekniikalla tuotettua synteetikaasua voidaan käyttää erilaisten kaasumaisten tai nestemäisten polttoaineiden ja kemikaalien valmistamiseen sekä energiantuotantoon. Hyödyntämällä lähtöaineiden ja tuotteiden joustavan käytön yhteistuotanto tarjoaa huomattavasti taloudellisemman vaihtoehdon nykyisiin, pelkkää energiaa tuottaviin laitoksiin verrattuna. Yhdysvaltojen yhteistuotantoon tähtäävissä projekteissa on useita hankkeita, joiden tarkoituksena on muuntaa eri raaka-aineista peräisin oleva synteetikaasu polttoaineiksi ja kemikaaleiksi. Fischer-Tropsch-teknologialla on tarkoitus tuottaa polttonesteitä korvaamaan bensiiniä ja dieselpolttoaineita. Synteetikaasun metanointiprosesseilla pyritään monikäyttöisen teollisuuskemikaalin, metanolin, tuotantoon. Jos jo käynnistyneissä hankkeissa todetaan, että tutkitut prosessivaihtoehdot ovat sekä teknisesti että taloudellisesti toteutuskelpoisia, uusien yhteistuotantolaitosten rakentaminen ja käyttöönotto aloitettaneen. Yhteistuotantolaitosten rakentamisen seurauksena on mahdollista vähentää tehokkaasti myös kasvihuonekaasujen päästöjä, erityisesti hiilidioksidipäästöjä. Suomessa energian, polttonesteiden ja kemikaalien yhteistuotantolaitokset voisivat perustua maamme biomassavarantoihin, Happikaasutukseen perustuvasta biojalosteiden tuotannosta on kuitenkin suuressa kokoluokassa vähän kokemuksia. Puunjalostusteollisuuden ohella myös muu prosessiteollisuus voisi olla sopiva sijoituspaikka yhteistuotannolle.

Korkealämpötilapolttokennot ja polttokennohybridit ovat 0,2–10 MW:n kokoluokan sähköntuotannossa ja yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa käyttökelpoisia teknologioita jo kymmenen vuoden kuluessa. Suurten polttokennovoimaloiden toteuttamisen aika on kauempana tulevaisuudessa. Kaikki merkittävimmät polttokennokehittäjät pyrkivät markkinoille aluksi maakaasukäyttöisillä tuotteilla. Tekniikoilla voidaan saavuttaa korkeampia sähköntuotannon hyötysuhteita pienemmin päästöin kuin nykyisillä tai kehitteillä olevilla kilpailevilla tekniikoilla, ts. polttomoottoreilla ja turbiineilla. Lyhyellä aikavälillä polttokennovalmistajien tavoitteena ovat lähinnä täsmämarkkinat. Korkealämpötilakenttien ja polttokennohybridien tutkimus ja kehitys kohdistuvat polttokennomoduulien ja järjestelmän hinnan alentamiseen ja kenttien tehokkuuden nostoon. Suomessa korkealämpötilapolttokennoihin kohdistuva tutkimus ja kehitys on kotimaisen teollisuuden, Tekesin ja VTT:n kiinnostuksen seurauksena lisääntymässä. Suomen kannalta erityisen kiinnostava, hieman pitemmän aikavälin vaihtoehto on biomassan ja erilaisten jätteiden kaasutuskaasun käyttäminen korkealämpötilakenttien ja polttokennohybrideissä. Ensimmäiset kaasutuskaasusovellukset toteutettaneen sulakarbonaattikenttien avulla. Näillä on jo saatu kokemuksia kaasutuskaasun käytöstä. Kenttien toimintalämpötila on myös sopivampi nykyisiin kiinteäoksidikenttien verrattuna.

Hepola, Jouko & Kurkela, Esa. Energiantuotannon tehostaminen fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa [Advanced energy production based on fossil and renewable fuels]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2155. 65 p.

Keywords energy production, pressurized combustion, gasification, coal, black liquor, IGCC, coproduction, fuel cells, synthesis gas, catalytic combustors

Abstract

The objects of this survey were gasification and combustion techniques, coproduction alternatives of energy, fuels and chemicals, as well as high-temperature fuel cells and hybrid fuel cell systems.

The potential and market outlook of pressurised fluidised-bed combustion have been declined, i.a., due to the good competitiveness of natural gas combined-cycle technology, tightening emission standards, and the development outlook for gasification combined-cycle technology. Development of a combined-cycle power plant process based on pressurised pulverised combustion of coal is still at an initial stage. The oxygen based IGCC plants in the world have so far been demonstration plants. The IGCC technology is expected to commercialise first in residual oil gasification applications integrated to oil refineries and then in coal powered condensed power plants. In addition, one biomass-based IGCC plant has been constructed. This process is so called simplified IGCC, utilising pressurised air blown gasification and hot gas cleaning. The test trials of this plant were completed in 1999. The process is technically feasible also for large-scale demonstration. Gasification technology has also been developed for black liquor. The ChemRec black liquor gasification process is technically the most advanced process at the moment. The atmospheric process has been demonstrated and the pressurised process demonstration is about to start in Sweden and in USA. In utilising biomass fuels or black liquor, the IGCC process offers the possibility to significantly increase the ratio of electrical power to thermal power with combined cycle.

Synthesis gas produced by gasification technology can be used for producing different gaseous or liquid fuels and chemicals and for energy production. In a flexible use of feedstocks and products this coproduction method offers a significantly more feasible alternative to present energy production plants. There are several projects underway in the United States, with a target to convert synthesis gas produced from different raw materials to fuels and chemicals. The aim of Fischer-Tropsch technology is to produce liquid fuels for replacing gasoline and diesel fuels. In methanation processes of synthesis gas, the aim is to produce a versatile industrial chemical, methanol. If the projects underway confirm that the process alternatives are both technically and economically feasible, the construction and commissioning of these combined

production plants will be started. These plants would also facilitate to reduce efficiently greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide. In Finland, the coproduction of energy, fuels and chemicals could be based on biomass resources. However, there is rather little experience available from large-scale production of biomass products, based on oxygen gasification. Wood-processing industries and also other process industries could be suitable sites for coproduction.

High-temperature fuel cells and hybrid fuel cell systems will be available technologies in power and CHP production of 0.2–10 MW size range within the next ten years, while large scale fuel cell power plants will not be constructed until in the more remote future. All significant fuel-cell developers will first launch natural gas based products to the market. These technologies enable to reach a higher efficiency of power production at lower emissions than the present technologies or those under development, i.e., internal-combustion engines and turbines. In the short term, the fuel cell manufacturers aim at specified marketing. Research and development of high-temperature cells and hybrid fuel cells focus on reducing the price of fuel cell modules and systems and on increasing the power density of the cells. In Finland, research and development of high-temperature fuel cells is increasing due to the interest of domestic industries, the National Technology Agency of Finland, and VTT. An alternative of special interest to Finland, on a longer term, is the use of gasification gas of biomass and different wastes in high-temperature cells and hybrid fuel cells. The first gasification applications will probably employ molten carbonate fuel cells. These cells have been tested already with gasification gas. The operation temperature of these cells is also more suitable than that of the solid oxide cells.

Alkusanat

Tässä julkaisussa esitetään VTT:n osuus Tekesin Fortum Oy:lta ja VTT:ltä tilaamasta selvitystyöstä, joka koski korkean hyötysuhteen voimalaitostekniikoiden kehitysnäkymiä. Projekti oli osa Tekesin rahoittamaa ja VTT Prosesit -yksikön koordinoimaa Climtech-ohjelmaa. Työ toteutettiin 1.6.2001–30.6.2002 välisenä aikana.

Espoo, kesäkuu 2002

Tekijät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	5
Alkusanat.....	7
1. Johdanto.....	11
2. Paineistettuun polttoon tai kaasutustekniikkaan perustuvat voimalaitosprosessit.....	12
2.1 Paineistettu leijukerros- tai pölypoltto.....	12
2.2 Paineistettuun kaasutukseen perustuvat kombivoimalaitokset.....	15
2.2.1 Kivihiilen tai pohjaöljyn happikaasutus.....	15
2.2.2 Ilmakaasutus ja kuumapuhdistus.....	18
2.2.3 Mustalipeän kaasutus.....	20
2.3 Katalyyttinen poltto.....	23
2.4 Kaasutukseen ja pyrolyysitekniikkaan perustuvat moottorivoimalaitokset.....	25
3. Energian, polttoaineiden ja kemikaalien yhteistuotanto.....	27
3.1 Synteesikaasun valmistus ja sähköntuotanto.....	28
3.2 Polttoaineiden ja kemikaalien valmistus synteesikaasusta.....	28
3.2.1 Fischer-Tropsch-prosessi.....	28
3.2.2 Alkoholien tuotanto.....	29
3.3 Kehitysnäkymät.....	30
3.3.1 Kaasutusteknologia.....	31
3.3.2 Yhteistuotantolaitokset.....	34
3.4 Vaikutukset päästöihin ja sovellettavuus Suomeen.....	37
4. Korkealämpötilapolttokennot ja polttokennohybridit.....	40
4.1 Tausta.....	40
4.2 Sulakarbonaattipolttokenno.....	43
4.2.1 Kehitysnäkymät.....	44
4.3 Kiinteäoksidipolttokenno.....	46
4.3.1 Kehitysnäkymät.....	47
4.4 Polttokennohybridit.....	49
4.4.1 Kehitysnäkymät.....	51
4.5 Vaikutukset päästöihin ja sovellettavuus Suomeen.....	52
5. Yhteenveto ja johtopäätökset.....	55
5.1 Kombivoimalat.....	55
5.2 Yhteistuotantolaitokset.....	57
5.3 Polttokennot ja hybridit.....	58
5.4 Hyötysuhde- ja hinta-arviot.....	59
Lähdeluettelo.....	60

1. Johdanto

Tekesin ohjelman Teknologia ja ilmastonmuutos (Climtech) tavoitteena on edistää ilmastonmuutosta rajoittavan teknologian valintoja, tutkimusta, kehitystä ja käyttöönottoa sekä tukea kansallisten ilmastotavoitteiden saavuttamista. Tässä projektissa selvityksen kohteena oli keskitetyn energiantuotannon tehostaminen, joka on yksi merkittävimmistä käytettävissä olevista keinoista Climtech-ohjelman yleistavoitteiden saavuttamiseksi. Hyötysuhteen nostaminen uuden voimalaitostekniikan avulla on tarpeen ja mahdollista sekä fossiilisiin polttoaineisiin että uusiutuviin bio- ja jätepolttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa.

Selvitystyö tehtiin yhteistyössä VTT:n ja Fortum Oy:n kanssa. Työssä rajoituttiin yli megawatin kokoluokassa tapahtuvaan keskitettyyn energiantuotantoon. Tässä julkaisussa kuvattava VTT:n osuus selvitystyöstä käsitti seuraavat aihealueet:

- kivihiilen, pohjaöljyn ja uusiutuvien polttoaineiden (biomassan tai -jätteen) painestetut kaasutus- ja polttotekniikat sekä katalyyttinen poltto
- kehitteillä olevat tulevaisuudensuunnitelmat, joissa yhdistetään energian, polttoaineiden ja kemikaalien tuotanto ja joihin sisältyy myös hiilidioksidin talteenotto ja eri raaka-aineiden käyttö
- keskitettyyn energiantuotantoon soveltuvat korkealämpötilapolttokennot
- polttokenno- ja kaasuturbiinitekniikkaan perustuvat ns. polttokennohybridit
- suomalaisen kaasutus- ja pyrolyysitekniikan soveltamismahdollisuudet uusissa voimalaitosprosesseissa.

VTT kartoitti em. tekniikoiden kehitystilanteen ja sovellettavuuden kirjallisuustyönä, sekä osallistumalla alalla järjestettyihin konferensseihin. Näkemyksiä täydennettiin suorien kontaktien ja vierailujen avulla.

2. Paineistettuun polttoon tai kaasutustekniikkaan perustuvat voimalaitosprosessit

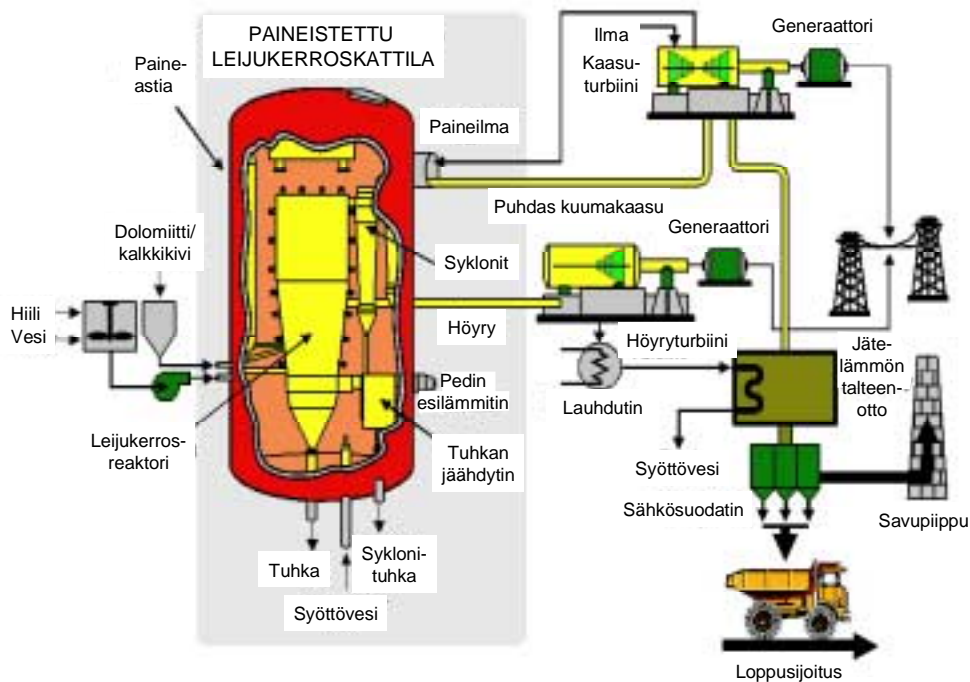
2.1 Paineistettu leijukerros- tai pölypoltto

Kiinteiden polttoaineiden paineistettua polttoa on tähän saakka sovellettu yksinomaan leijukerrospolttotekniikkaan perustuvana. Tässä ns. PFBC-prosessissa kivihiili (tai muu kiinteä polttoaine) poltetaan paineen alla toimivassa leijukerrosreaktorissa, johon palamisilma ahdetaan kompressorilla. Syntyvät savukaasut puhdistetaan hiukkasista ja kondensoituneista alkalimetalleista ja johdetaan kaasuturbiiniin. Osa palamisessa vapautuvasta lämmöstä siirretään jo leijukattilassa höyrypiiriin. Myös kaasuturbiinin läpi menneet savukaasut johdetaan jätelämpökattilaan, jossa kehitetään höyryä.

Nykyisin toiminnassa olevissa, ns. ensimmäisen sukupolven PFBC-kombilaitoksissa kaasuturbiinille johdettavan savukaasun lämpötila on turbiinisiipien korroosion takia pidettävä alle 860–880 °C:ssa. Laitosten sähköntuotannon hyötysuhde on 41–44 %. Suomessa ei ole toiminnassa PFBC-laitoksia. Lähin laitos on Tukholmassa Värtanin yhdistetty sähkön ja lämmön tuotantolaitos, jonka sähköteho on 135 MW_e ja kaukolämpöteho 225 MW. Laitoksessa on kaksi polttoaineteholtaan 200 MW:n PFBC-moduulia ja jätelämpökattilaa sekä yhteinen höyryturbiini. PFBC-tekniikan johtava laitetoimittaja 1980–1990-luvuilla oli ABB, jonka lisenssillä laitoksia toimittaa nykyään Babcock & Wilcox. Kuvassa 1 esitetään Yhdysvalloissa sijaitsevan 70 MW_e:n demonstraatiolaitoksen periaatekaavio. ABB:n kehittämässä prosessissa palaminen tapahtuu kerrosleijukattilassa ja kaasut puhdistetaan sykloneilla. Kaasuturbiinit ovat erityisesti PFBC-sovellukseen kehitettyjä ja kestävät syklonit läpäisevän hienojakeisen pölyn aiheuttamaa eroosiokuormitusta tavanomaisia turbiineja paremmin.

Ensimmäisen sukupolven PFBC-prosessin tärkeimpinä etuina muihin kivihiilen voimalaitostekniikkoihin verrattuna voidaan pitää seuraavia tekijöitä:

- kompakti rakenne ja perinteistä höyryvoimalaitosta pienempi tilantarve
- tehokas palaminen jo melko matalassa lämpötilassa
- suhteellisen pienten SO₂-, NO_x- ja hiukkaspäästöjen saavuttaminen ilman erillisiä kaasuturbiinin jälkeisiä savukaasun puhdistusprosesseja (deSO_x ja deNO_x)
- modulaarisuus, mikä mahdollistaa vaiheittaisen rakentamisen. Myös investointikustannus on kohtuullisen pieni (360 MW_e:n laitos Japanissa: 1 263 \$/kW).



Kuva 1. PFBC-demonstraatiolaitoksen kaaviokuva, Tidd, USA (teho 70 MW_e, 15 MW_e kaasuturbiinilla ja 55 MW_e höyryturbiinilla (U.S. Department of Energy, 2001).

Kivihiilen (tai turpeen) paineistettu leijukerospolto soveltuu myös yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon. 1980-luvulla tehtiin myös Suomessa tarkasteluja PFBC-tekniikkaan perustuvan yhteistuotannon kannattavuudesta, mutta yhtään laitosta ei kuitenkaan rakennettu. Yhteistuotannossa voidaan ensimmäisen sukupolven PFBC-tekniikalla päästä 0,5–0,7:n rakennusasteeseen ja 34–37 %:n sähköhyötysuhteeseen (polttoaineena jyrshinturpe) (Jahkola & Kurkela 1995, Jahkola ym. 1988).

PFBC-tekniikan suurin rajoitus on matalasta kaasuturbiinin sisäänmenolämpötilasta johtuva hyötysuherajoitus. Kilpailevilla teknologioilla, ylikriittisiin höyryarvoihin perustuvalla höyryvoimalaitoksella ja IGCC-tekniikalla, voidaan tulevaisuudessa saavuttaa selvästi korkeampi hyötysuhde. Myös maakaasukombitekniiikan kilpailukyky mm. Euroopan markkinoilla on selvästi vähentänyt mielenkiintoa kivihiili-PFBC:tä kohtaan. Pyrkimys yhä pienempiin päästöihin ja lopulta myös CO₂:n talteenottoon näyttää sekin parantavan kilpailevien teknologioiden (maakaasukombin ja IGCC:n) mahdollisuuksia. Näyttääkin siltä, että ensimmäisen sukupolven PFBC-tekniikan potentiaali ja markkinanäkymät eivät nykyään enää ole kovin hyviä.

Foster Wheeler Energia Oy kehitti 1990-luvulla omaan kiertopetiteknologiaansa perustuvaa PCFBC-prosessia, jota testattiin Karhulassa sijaitsevalla pilottilaitoksella. Foster Wheelerin peruskonseptissa paineistetun kiertopetikattilan savukaasut puhdistetaan te-

hokkaasti keraamisilla suodattimilla, ja sen vuoksi voidaan käyttää tavanomaisia kaasuturbiineja. Onnistuneesta kehitystyöstä ja pitkään suunnitteilla olleista demonstraatiolaitoshankkeista huolimatta yhtään kaupallista laitosta ei kuitenkaan ole toteutettu. Viime vuosina Foster Wheeler onkin panostanut (osittais-) kaasutustekniikkaan perustuvien, perus-PFBC-prosessia tehokkaampien prosessien kehittämiseen.

PFBC-prosessin hyötysuhteen nostamiseksi on vuosien varrella esitetty useita erilaisia ratkaisuja ns. toisen sukupolven PFBC-prosessin toteuttamiseksi:

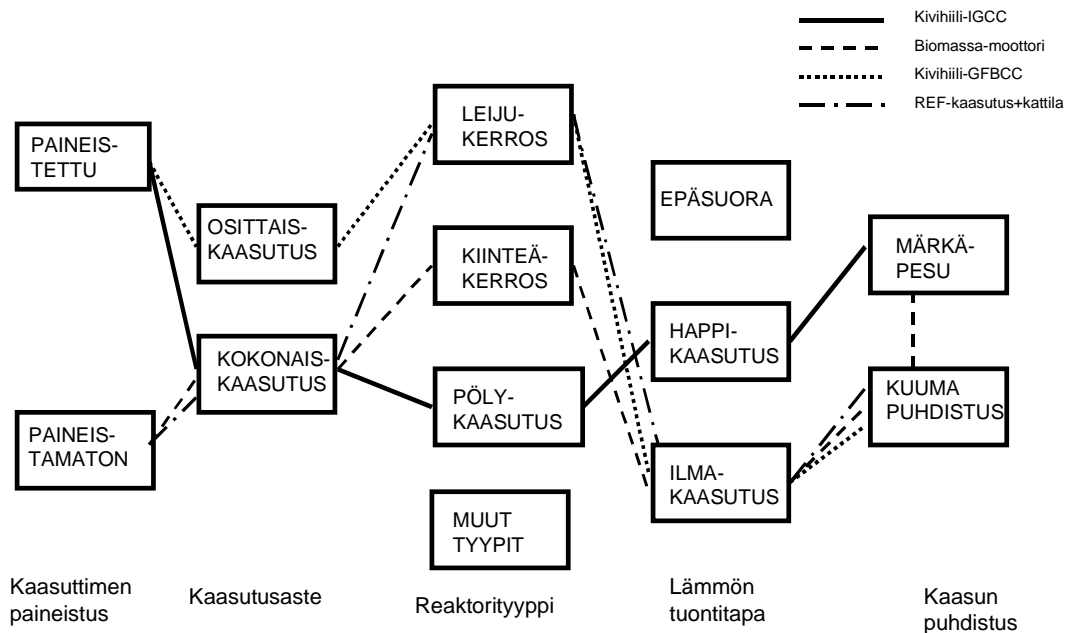
1. Maakaasun poltolla tehostettu Topping-cycle, jossa PFBC:n savukaasun lämpötila nostetaan maakaasua polttamalla turbiininmateriaalien sallimalle tasolle. Tällöin PFBC:n savukaasut on kuitenkin suodatettava eikä pelkkä syklonipuhdistus riitä.
2. Osittaiskaasutuksella tehostettu PFBC: Kivihiili johdetaan aluksi kaasutusreaktoriin, jossa siitä vapautuvat haihtuvista aineista syntyvät pyrolyysikaasut ja osa jäännöshiilestä kaasuuntuu. Jäljelle jäävä hiiltojäännös poltetaan sitten paineistetussa PFBC-kattilassa. PFBC-kattilasta tulevan savukaasun lämpötila nostetaan tasolta 800–900 °C kaasuturbiinin sallimalle tasolle (1 200–1 300 °C) polttamalla osittaiskaasutuksesta saatavaa tuotekaasua.
3. Osittaiskaasutus ja hiiltojäännöksen loppuunpoltto ilmanpaineisessa kattilassa. Tässä prosessissa kaasuuntumatta jäänyt hiiltojäännös poltetaan esimerkiksi ilmanpaineisessa CFB-kattilassa, jonka palamisilmana voidaan käyttää kaasuturbiinin savukaasuja. Foster Wheeler tutkii mm. tämän prosessin toteutusta.

Leijukerrospolton ohella kehitetään hiilen paineistettuun pölypolttoon perustuvia kombivoimalaitosprosesseja. Tämän prosessin kehitys on selvästi varhaisemmassa vaiheessa kuin PFBC-tekniikan. Prosessissa hienoksi jauhettu kivihiili poltetaan korkeassa lämpötilassa (1 600–1 700 °C) paineistetussa polttokammiossa, savukaasua jäähdytetään kehittämällä höyryä höyryturbiinille, syntynyt kuuma savukaasu puhdistetaan hiukkasista ja alkalimetalleista ja johdetaan kaasuturbiinin läpi (yli 1 100 °C sisäänmenolämpötila). Prosessilla voidaan saavuttaa varsin korkea (yli 50 %) hyötysuhde, mutta nähtäväksi jää, pystytäänkö kehittämään riittävän tehokkaita ja toimintavarmoja savukaasun puhdistusmenetelmiä, joilla voidaan saavuttaa kaasuturbiinien vaatimustaso (alle 5 mg/m³n hiukkasia, alle 0,03 ppm-m alkaleja). Erityisesti poltossa höyrystyvien alkalimetallien sitomiseen ja korkeassa lämpötilassa toimivien hiukkaserottimien materiaaleihin liittyy vielä useita ratkaisemattomia ongelmia.

2.2 Paineistettuun kaasutukseen perustuvat kombivoimalaitokset

2.2.1 Kivihiilen tai pohjaöljyn happikaasutus

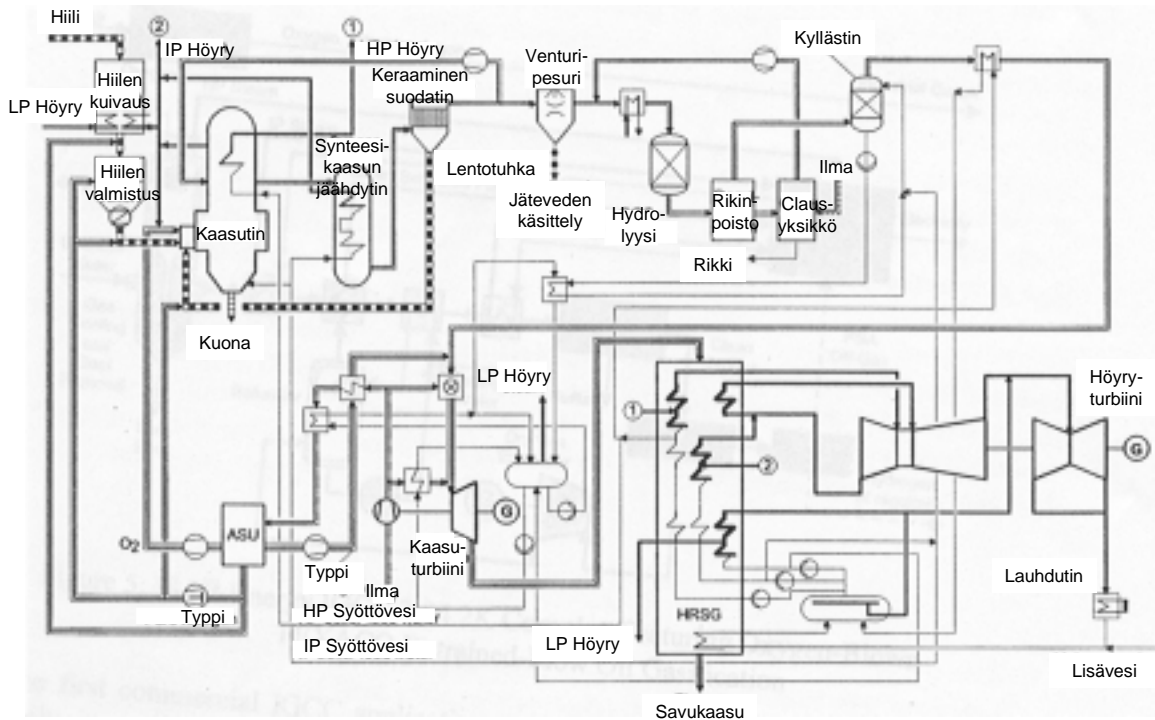
Kombivoimalaitos on mahdollista toteuttaa myös kiinteiden polttoaineiden tai pohjaöljyn kaasutustekniikkaan perustuvana. Kaasutuskombivoimalaitosprosessi (IGCC) voidaan toteuttaa hyvin monella eri tavalla, jotka poikkeavat toisistaan mm. käytetyn kaasutusmenetelmän (happi- tai ilma kaasutus, pöly-, leijukerros- tai kiinteäkerrosreaktori) ja kaasujen puhdistustekniikan perusteella (kuva 2). Taloudellisista syistä kivihiilen tai pohjaöljyn kaasutukseen perustuvien kombivoimalaitosten yksikkökoon on oltava vähintään 300–500 MW_e. Tässä kokoluokassa lähes kaikki toistaiseksi rakennetut noin 20 laitosta perustuvat hapella tapahtuvaan paineistettuun pölykaasutukseen ja kaasujen märkäpuhdistukseen.



Kuva 2. Kaasutusprosessien jaotteluperusteet.

Suurimmat toistaiseksi rakennetut kivihiiltä polttoaineena käyttävät IGCC-laitokset ovat Euroopassa sijaitsevat Buggenum (235 MW_e) ja Puertellano (300 MW_e) sekä Yhdysvalloissa sijaitsevat Wabash River (265 MW_e) ja Polk County (260 MW_e). Tässä kokoluokassa ja käytössä olevaan tekniikkaan perustuvien laitosten hyötysuhde on 43–45 %. Italiassa on otettu käyttöön tai rakenteilla kolme vastaavaan tekniikkaan perustuvaa noin 500 MW_e:n kaasutuskombilaitosta, joissa polttoaineena käytetään öljynjalostamon pohjaöljyä. Johtavat kaasutusprosessit ovat Texaco, Shell, Krupp Uhde (Prenflow) ja Global E-Gas.

Esimerkkinä IGCC-laitosten tämän hetken teknologiasta kuvataan seuraavassa Puertollanossa Espanjassa sijaitsevan IGCC-laitoksen prosessia (kuva 3). Laitoksen ytimenä on Krupp-Uhden PRENFLOW-kaasutustekniikka, joka on pitkälti samanlainen kuin Shellin vastaava prosessi. Puertollanon laitoksella käytettävät polttoaineet (kivihiili ja petrolkoksi) kuivataan 1–2 %:n kosteuteen ja jauhetaan alle 60–100 µm:n hiukkas-kokoon.



Kuva 3. Espanjassa sijaitsevan Puertollanon IGCC-laitoksen prosessikaavio (Mendez-Vigo ym. 2001).

Hiilen sekaan lisätään noin 2 % kalkkikiveä, jolla parannetaan tuhkan sulamiskäyttämistä kaasuttimessa. Kuiva polttoainepöly paineistetaan ja syötetään kaasuttimeen lock-hopper-järjestelmän avulla. Kaasuttimen reaktoriosa on keraamisesti muurattu kammio, johon hienojakeinen hiilipöly sekä hapen ja vesihöyryn seos johdetaan. Kaasuuntuminen tapahtuu korkeassa lämpötilassa ja paineessa (n. 25 bar). Hiilen tuhka sulaa kaasuttimessa ja poistetaan reaktorin pohjalta vesijähdytyksen kautta lasittuneena kuonana. Kuuma (1 400–1 500 °C) raakakaasu kulkee reaktorikammioista ylöspäin ja johdetaan seuraavaksi lämmönvaihtimien läpi. Ensin kaasua jähdytetään kierrättämällä jähdytettyä ja puhdistettua tuotekaasua kuuman raakakaasun sekaan. Näin päästään lämmönvaihtimateriaalien ja tuhkan sulamisen kannalta riittävän matalaan lämpötilatasoon, että loppujähdytys voidaan toteuttaa höyrystin- ja tulistinputkin.

Jäähdytetty (250–300 °C) tuotekaasu suodatetaan keraamisilla kynttiläsuotimilla, pestään tehokkaalla vesipesulla ja johdetaan seuraavaksi rikinpoistoprosessiin, jonka lopputuotteena saadaan alkuainerikkiä. Puhdas tuotekaasu (pääkomponentit tyypillisesti CO: 60 %, H₂: 22 %, CO₂: 4 %, N₂ 12 %) kyllästetään vesihöyryllä, mikä lisää kaasuturbiinin läpi kulkevaa kaasun massavirtaa sekä alentaa termisen NO_x:n muodostumista kaasuturbiinin polttokammiossa. Kaasuturbiinina Puertollanossa on Siemens V93.4-turbiini, jonka sisäänmenolämpötila (ISO) on 1 120 °C. Kaasuturbiinin kuumilla savukaasuilla kehitetään jätelämpökattilassa höyryä höyryturbiiniprosessia varten. Puertollanossa on myös toteutettu varsin pitkälti prosessiin integroitu hapen valmistus. Happitehtaalta tuleva suhteellisen puhdas tyyppi hyödynnetään hiilipölyn paineistuksessa ja epäpuhdas tyyppi sekoitetaan tuotekaasuun ennen kaasuturbiinia. Koko kaasutuskombilaitoksen sähköntuotannon hyötysuhde on 45 %. Kivihiilen tai pohjaöljyn kaasutukseen perustuvissa kombilaitoksissa on tämänhetkisen tekniikan perusteella mahdollista saavuttaa 500 MW_e:n kokoluokassa jopa 51,5 %:n nettohyötysuhde (Hourfar ym. 1999). Erilaisten kaasuturbiini- ja höyryturbiiniprosesseihin tehtävien parannusten avulla on arvioitu olevan mahdollista nostaa IGCC-laitosten hyötysuhde 10–20 vuoden kuluessa 56 %:iin. Yhdistämällä prosessiin SOFC-polttokenno voidaan prosessin kokonaishyötysuhde nostaa 60 %:iin.

Kaikki toistaiseksi rakennetut IGCC-laitokset ovat olleet luonteeltaan demonstraatiolaitoksia, joissa on testattu eri laitevalmistajien ratkaisuja ja eri polttoaineita sekä jatkokehitetty tekniikkaa. IGCC-tekniikan oletetaan kaupallistuvan ensin öljynjalostamoihin integroiduissa pohjaöljyn kaasutussovelluksissa ja sitten kivihilikäyttöisissä lauhdevoimalaitoksissa. Kaupallistumisen aikataulu riippuu lähinnä taloudellisesta kilpailukyvyistä verrattuna perinteisiin höyryvoimalaitoksiin ja maakaasukombeihin (Pruschek ym. 1999).

Suomessa tämän tekniikan mahdollinen soveltaminen rajoittunee 1–2 pohjaöljynkaasutuslaitoksen rakentamiseen öljynjalostamon yhteyteen. Nämä laitokset voitaisiin ainakin osittain toteuttaa yhdistettyinä sähkön ja prosessihöyryn tuotantolaitoksina.

Happikaasutukseen perustuvien kivihiilen tai pohjaöljyn IGCC-laitosten etuina muihin kilpaileviin suuren kokoluokan voimalaitostekniikkoihin verrattuna pidetään seuraavia tekijöitä:

- hyvä sähköntuotannon hyötysuhde (toiminnassa olevat demonstraatiolaitokset 45 %, 2005–2010: 51,5 %, 2010–2020: 56 %, yhdistettynä polttokennoihin 60 %)
- erittäin pienet savukaasupäästöt, tuhkan poisto lasittuneena kuonana, rikki raaka-ainekäyttöön soveltuvana alkuainerikkinä ym.
- hyvät edellytykset CO₂:n erottamiseen ja talteenottoon tuotekaasusta ennen kaasun polttoa kaasuturbiinissa

- soveltavuus erilaisiin yhdistettyihin sähkön ja kemikaalien tuotantoprosesseihin
- IGCC-prosessin eri osaprosesseihin liittyy vielä useita potentiaalisia keinoja prosessin tehokkuuden, talouden ja/tai käytettävyyden parantamiselle.

IGCC-prosessin merkittävimpinä jatkokehityksen kohteina ja mahdollisuuksina (Holt 2001) pidetään seuraavia:

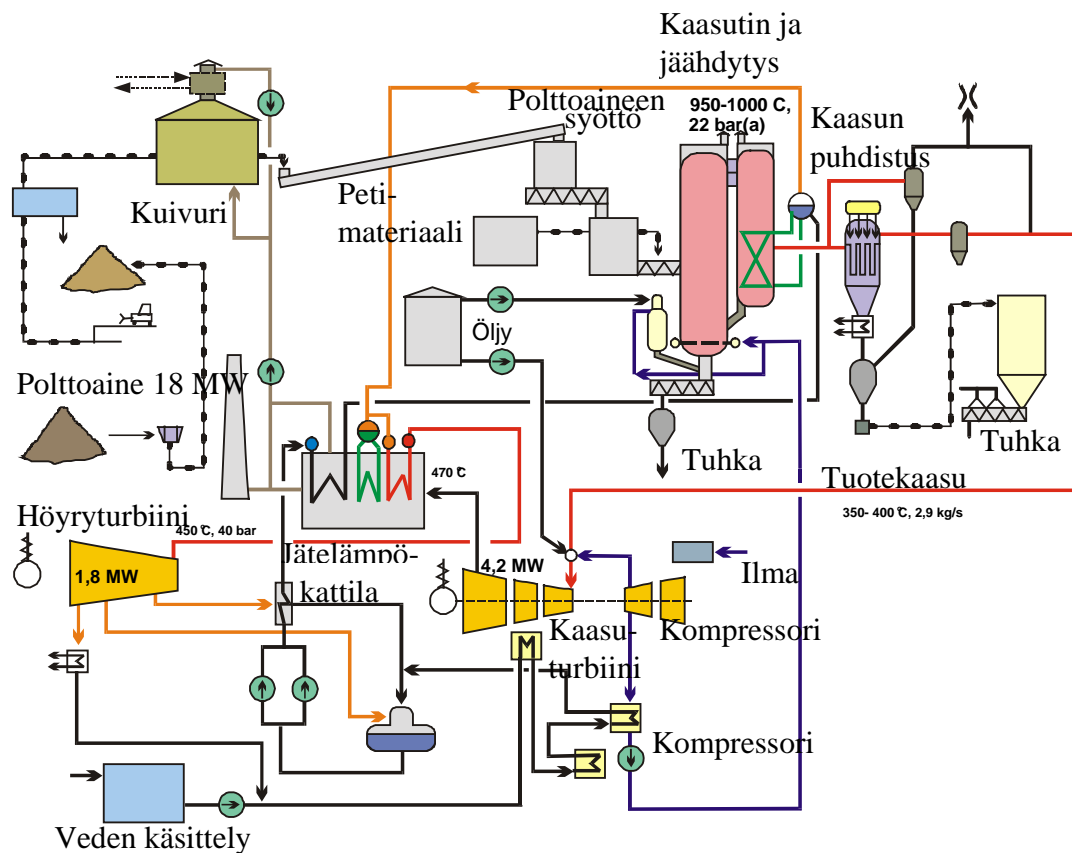
- nykyprosessin käytettävyyden parantaminen ja ominaisinvestointikustannusten alentaminen
- perinteisen kryogeenisen hapenerotustekniikan korvaaminen membraanitekniikkaan perustuvilla menetelmillä (pienempi investointikustannus, parempi hyötysuhde)
- uudet erittäin korkeassa paineessa (n. 70 bar) toimivat prosessit, joilla saavutetaan etuja etenkin jos halutaan poistaa hiilidioksidi tuotekaasusta. Näissä prosesseissa suunnitellaan käytettäväksi mm. hiilen syöttöä nestemäiseen CO₂:iin lietettynä, nestemäisen hapen syöttöä, polttoaineviesilietteen lämmitystä ja höyrystämistä ennen kaasutinta, yms.
- pölykaasuttimen kehittäminen, mm. rakenteen optimointi, yksikkökoon kasvattaminen, hiilikonversion parantaminen, muurausten käyttöiän pidentäminen, kierto-kaasun määrän vähentäminen yms.
- kaasunjäähdyttimen uudet ratkaisut, mm. uusien materiaalien käyttö (korkeammat lämpötilat ja parempi hyötysuhde) ja uudet tavat kytkeä tuotekaasun jäähdytyksen ja kaasuturbiinin jätelämpökattilan höyrypiirit (yksinkertaisempi ja halvempi tuotekaasunjäähdytys).
- tuotekaasun puhdistuksen kehittäminen (tavoitteena lähinnä investointi- ja käyttökustannusten alentaminen): suodatuslämpötilan nostaminen 200–300 °C:sta 500–600 °C:een, kuivat rikinpoistotekniikat (metallisorbentit tai membraani-tekniikka), elohopean pidätys aktiivihiilisorbentein yms.
- uudet tehokkaammat kaasuturbiinit ja höyryturbiiniprosessit sekä kytkennät polttokennoihin. Näillä maakaasukombeihin ensin kehitettävillä tekniikoilla on kaikkien suurin hyötysuhteen nostopotentiali myös IGCC-tekniikassa.

2.2.2 Ilmakaasutus ja kuumapuhdistus

Paineistettuun kaasutustekniikkaan perustuvaa kombivoimalaitosprosessia on kehitetty myös yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon soveltuvaan keskisuureen voimalaitoskokoluokkaan (30–150 MW_e). Toisin kuin edellä kuvatussa IGCC-laitosten lauhde-

voimalaitoskokoluokassa (yli 300 MW_e) tässä kokoluokassa ei taloudellisista syistä voi-
da soveltaa happikaasutusta eikä monimutkaista märkäpuhdistustekniikkaa.

Suomessa panostettiin 1990-luvulla voimakkaasti ns. yksinkertaistetun kaasutuskombi-
prosessin (simplified IGCC) kehittämiseen. Tässä prosessissa kiinteä polttoaine (bio-
massa, turve, hiili) kaasutetaan paineistetussa leijukerroskaasuttimessa ilman avulla.
Syntyvä tuotekaasu jäähdytetään 350–600 °C:seen ja suodatetaan ennen johtamista kaa-
saturbiinin polttokammioon. Muilta osin prosessi on maakaasukombin kaltainen. Tois-
taiseksi tällä tekniikalla on toteutettu vain yksi demonstraatiolaitos (kuva 4), jonka säh-
köteho on 6 MW ja kaukolämpöteho 9 MW. Laitos sijaitti Etelä-Ruotsissa Värnamon
kaupungissa, ja sen koekäyttöohjelma saatiin päätökseen loppuvuonna 1999. Kaasutus-
tekniikkana Värnamossa on suomalaisen Foster Wheeler Energia Oy:n kehittämä pai-
neistettu kiertoleijukaasutus. Teknisesti prosessi on valmis myös suuren kokoluokan
demonstrointiin. Puupolttoaineilla tämän prosessin (kokoluokka 40–100 MW_e) raken-
nusaste on kaukolämmöntuotannossa 0,8–1,2, sähköhyötysuhde 40–45 % ja kokonais-
hyötysuhde 85–90 % (Palonen ym. 1996). Pelkässä sähköntuotannossa prosessilla voi-
daan päästä kaasuturbiinista ja prosessikytkennöistä riippuen noin 45–48 %:n hyöty-
suhteeseen (nykytekniikalla).



Kuva 4. Värnamon IGCC-laitos (6/9MW) (Palonen ym. 1996).

Toinen Suomessa 1990-luvulla kehitetty prosessi on Carbona Oy:n (aiemmin Enviro-power) kerrosleijukaasutukseen perustuva prosessi, jonka toiminta erilaisilla puupolttoaineilla ja kivihiilellä demonstroitii Tampereella sijaitsevalla noin 20 MW_{pa}:n tehoisella pilottilaitoksella (Salo & Keränen 1995). Myös Carbonan IGCC-prosessia on suunniteltu useisiin demonstraatiokohteisiin (mm. Summa 1995), mutta toistaiseksi yhtään laitosta ei ole rakennettu.

Simplified-IGCC-tekniikan suurin potentiaali on yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa, jossa tekniikan avulla voidaan kaksinkertaistaa sähkö-lämpösuhde tavanomaiseen vastapainehöyryvoimalaitokseen verrattuna. Suomessa tekniikan avulla on arvioitu voitavan tuottaa yli 1 000 MW lisää sähköä olemassa olevista teollisuuden ja yhdyskuntien lämpökuormista (Sipilä 1993). Maailmanlaajuisesti tekniikan päämarkkinoina voidaan pitää sellu- ja paperiteollisuutta, sokeriruokoteollisuutta sekä pohjoisten maiden kaukolämpövoimalaitoksia (Wilen & Kurkela 1997). Syyt tekniikan hitaaseen kaupallistumiseen ovat olleet ei-tekniisiä. Sähkömarkkinoiden vapautuminen yhdessä alhaisen sähkön hinnan kanssa (Suomi ja Ruotsi) ei suosi uutta korkean sähköhyötusuhteen tekniikkaa. Ensimmäiset demonstraatiolaitokset ovat selvästi kilpailevia perinteisiä voimalaitoksia kalliimpia, ja niiden toteutukseen olisi tarvittu 1990-luvulla saatavissa olutta suurempaa julkista tukea (kuten Yhdysvalloissa Clean Coal -hankkeille).

2000-luvun ensimmäisellä vuosikymmenellä leijukerroskaasutus- ja kaasujen kuumasuodatustekniikka näyttää kaupallistuvan ensin ilmanpaineisissa kattilasovelluksissa, joissa tavoitteena on korvata nykyisissä voimalaitoksissa fossiilisia polttoaineita paikallisilla bio- ja jätepolttoaineilla. Näiden hankkeiden onnistunut toteutus helpottanee jatkossa myös paineistettuun kaasutukseen perustuvan simplified-IGCC-tekniikan markkinoille tuleamista (Kurkela 2001).

2.2.3 Mustalipeän kaasutus

Tavanomaisissa sulfaattiselutehtaissa mustalipeä poltetaan soodakattilassa. Polttoprosessissa yhdistyvät epäorgaanisten kuidutuskemikaalien talteenotto ja lipeän orgaanisesta aineksestä peräisin olevan lämpöenergian (höyryn) tuotanto. Mustalipeän kaasutus ja kaasun poltto tarjoaa vaihtoehdoisen mahdollisuuden kuidutuskemikaalien talteenotolle ja energian tuotannolle. Mustalipeän kaasutus voidaan suorittaa höyryn avulla lähes paineistamattomana tai paineistettuna ilman tai hapen avulla (Tam ym. 1999). Kehitteillä olevat mustalipeän kaasutusprosessit voidaan jakaa kahteen tyyppiin myös toimintalämpötilan mukaan. Toimintalämpötila määrää, missä olomuodossa suurin osa epäorgaanisista yhdisteistä poistuu reaktorista. Korkealämpötilakaasuttimet perustuvat pölykaasutukseen. Kaasutuslämpötila on 950°C tai korkeampi, jolloin epäorgaaniset yhdisteet poistuvat reaktorista sulana. Tarvittavan lämmön tuottamiseen voidaan käyttää ilmaa tai happea. Matalalämpötilaprosessit perustuvat taas leijukerroskaasutukseen, ja

kaasutuslämpötila on 700°C tai alhaisempi, jolloin epäorgaaniset yhdisteet poistuvat kaasutimesta kiinteinä (Larson & Raymond 1997).

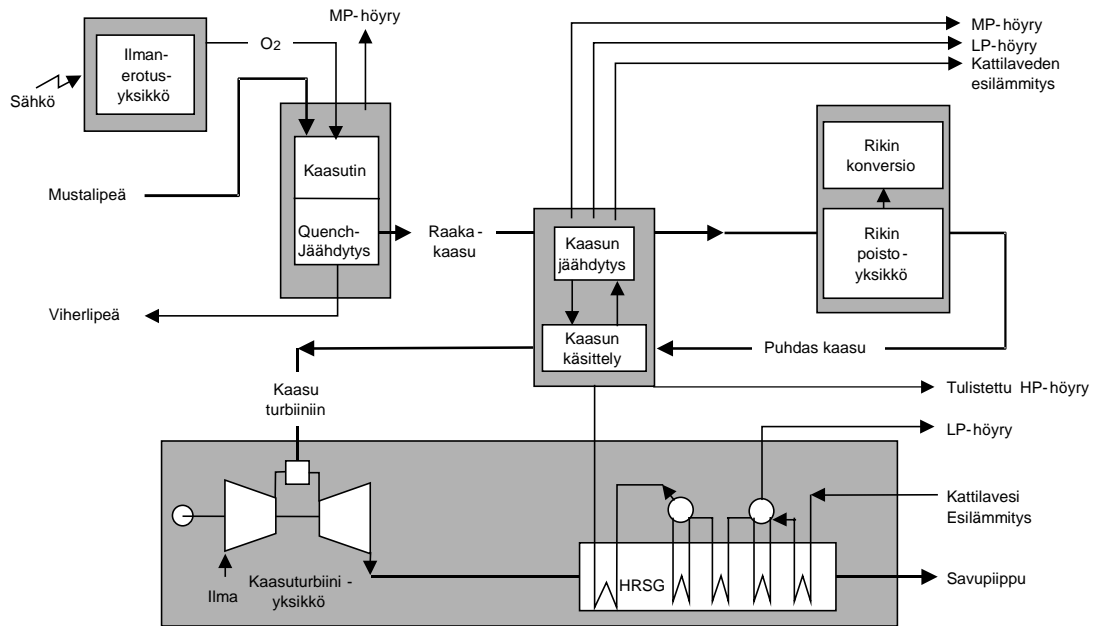
Mustalipeän kaasutus tarjoaisi perinteiselle soodakattilalle vaihtoehdon, jolla olisi mahdollista nostaa sellutehtaiden energiantuotannon rakennusastetta (sähköenergia / lämpöenergia). Nykyaikaisissa sellutehtaissa saadaan mustalipeästä ja kuoresta tuotettua energiaa ylimäärin sellutehtaiden omiin tarpeisiin. Sellu- ja paperiteollisuus on kokonaisuudessaan kuitenkin suuri sähkön tuoja. Mustalipeän kaasutus-IGCC:llä voitaisiin saavuttaa rakennusaste 0,70, seuraavan sukupolven kuumakaasunpuhdistusta käyttävässä laitoksessa rakennusaste voisi olla jopa 0,83 (McKeough & Fogelholm 1991, Solantausta ym 1994). Konventionaalisen soodakattilan rakennusaste on 0,26.

Muita mustalipeän kaasutuksen etuja tavanomaiseen soodakattilapolttoon verrattuna ovat (Tam ym. 1999):

- 5–10 % korkeampi lämmöntuotannon hyötysuhde
- alemmat NO_x-, rikki-, SO₂- ja CO₂-päästöt
- turvallisuuden paraneminen (ei vesi-sula-räjähdyriskiä)
- mahdollisuus 2–4 % kuidutussaannon nostamiseen rikin talteenoton paranemisen seurauksena.

Kaasutukseen perustuvan voimalaitoksen on arvioitu maksavan noin 30 % enemmän kuin perinteisen prosessin, mutta kaasutusvaihtoehdon sähköntuotantokustannukset jäävät alhaisemmiksi kuin soodakattilan (McKeough ym. 1995). Integroidulla sellu- ja paperitehtaalla soodakattilan korvaaminen IGCC-prosessilla johtaisi yleensä prosessilämmön vajaukseen, jolloin kaasutusprosessin kilpailukyky riippuisi myös puuttuvan lämmön tuottamisen edullisuudesta (Anon. 1998). Toisaalta kaasutustekniikka voisi tarjota sellutehtaalle mahdollisuuden kemikaalikierron kapasiteetin kasvattamiseen ilman investointia uuteen kalliiseen soodakattilaan. Näissä sovelluksissa kaasuttimeen ohjattaisiin osa tehtaan mustalipeästä ja tuotettu kaasu poltettaisiin esim. tehtaan monipolttolaitteissa.

Kehitteillä olevista mustalipeän kaasutusprosesseista teknisesti pisimmällä on Chemrec-prosessi. Ilmanpaineisen prosessin voidaan sanoa olevan demonstroitu, vaikka siinä onkin edelleen esim. joitakin hankalia materiaaliongelmia. Paineistetun prosessin (kuva 5) demonstrointi on käynnistymässä sekä Ruotsissa että Yhdysvalloissa. Chemrec-prosessin parempi tekninen varmuus verrattuna muihin kaasutusvaihtoehtoihin perustuu quench-jäähdytykseen. Chemrec-prosessiin perustuvan IGCC-prosessin sähköntuotanto on kuitenkin pienempi kuin muissa kehitteillä olevissa prosesseissa, mutta silti kaksi kertaa suurempi kuin soodakattilan sähköteho.



Kuva 5. Chemrec-prosessin kaavio (Stigsson 1998).

Chemrec-kaasutin on ilmanpaineisena demonstroitu Weyerhaeuserin New Bernin tehtailla Pohjois-Carolinassa Yhdysvalloissa. Kaasuttimen kapasiteetti on noin 330 t ka/d, noin 20 % tehtaan mustalipeämäärästä. Kaasutinlaitoksella on lisätty kemikaalikierron kapasiteettia, ja kaasutuksen tuotekaasu poltetaan uudessa voimakattilassa. Koelaitos käynnistyi joulukuussa 1996 (Erickson & Brown 1999). Pienempi, niin ikään ilmanpaineinen koelaitos (75 t ka/d) on ollut käytössä Ruotsissa AssiDomänin Fröviforsin tehtailla vuodesta 1992 alkaen (Anon. 1998). AssiDomän Kraftlinerin Piteån tehtailla Ruotsissa on rakenteilla paineellinen pilottilaitteisto (20 t/d). Vastaava laitos on ollut suunnitteilla myös Championin (nykyisin International Paper) Courtlandin tehtaille Alabamaan, Yhdysvaltoihin. Laitoksen kokoluokka olisi 550 t mustalipeää/d (McDonald 1999).

Georgia-Pacific Corp. on ilmoittanut rakentavansa Big Islandin tehtailleen Virginiaan, Yhdysvaltoihin mustalipeän kaasutuslaitoksen (Georgia-Pacific 2001, Anon. 2000). Laitoksen tekniikaksi on valittu MTCI:n prosessi, joka perustuu matalassa lämpötilassa toimivaan vesihöyrykaasutukseen. Laitoksen kapasiteetiksi on ilmoitettu 200 tonnia mustalipeää vuorokaudessa. Laitos käynnistyy jo vuonna 2002.

Suomessa mustalipeän kaasutustekniikan kehitykseen panostettiin erityisesti vuosina 1989–1992, jolloin mustalipeän kaasutusta tutkittiin muun muassa Äänekoskelle rakennetulla koelaitteistolla. Koelaitostoiminnan päätyttyä tutkimus on jatkunut pienimuotoisempina VTT Prosesseissa ja Åbo Akademiassa. (Anon. 1998).

2.3 Katalyyttinen poltto

Katalyyttisessä poltossa happi reagoi palavan kaasumaisen yhdisteen kanssa katalyytin pinnalla mahdollistaen yhdisteen täydellisen hapettumisen. Prosessi tapahtuu ilman liekkiä huomattavasti alemmassa lämpötilassa kuin tavanomaisessa poltossa. Katalyyttisen polton pääasiallinen hyöty on polton stabiilisuus ja tehokkuus, jolloin hiilimonoksidin ja hiilivetyjen sekä erityisesti termisen NO_x :n päästöt ovat erittäin pieniä. Polttokatalyytit ovat tavallisesti metalleja tai metallioksiedeja. Jalometallikatalyyttejä (Anson ym. 1996) käytetään perusmetallikatalyyttejä yleisemmin, koska ne toimivat tehokkaammin matalassa lämpötilassa.

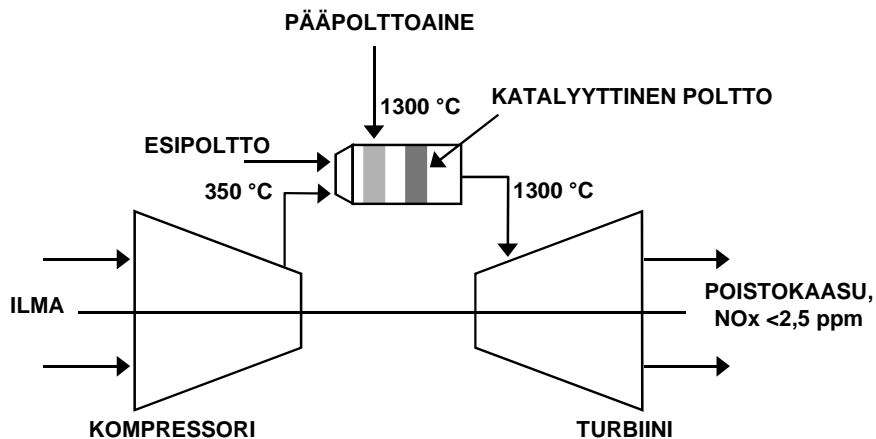
Katalyyttisen polton kehitys aloitettiin Yhdysvalloissa 1970-luvulla (McCarty ym. 1999). Katalyyttejä kehitettiin bensiiniä ja dieselpolttoaineita käyttäviin kaasuturbiineihin, joiden tuolloin uskottiin olevan vaihtoehto polttomootoreille. Vaikka turbiinikehitys ei onnistunut toivotulla tavalla, työn tuloksena kehitettiin bensiini- ja dieselmootoriajoneuvojen pakokaasujen puhdistuskatalyytit. 1980-luvulta lähtien japanilaisilla sähkö- ja kaasuyhtiöillä on ollut katalyyttiseen polttoon liittyviä tutkimus- ja kehitysohjelmia, jotka ovat jatkuneet läpi 1990-luvun. 1990-luvun lopulla Catalytica Energy Systems Inc. (McCarty ym. 1999, McCarty 2000, Silicon Valley Business Ink 2001) on pyrkinyt voimakkaasti kaupallistamaan tekniikkaa Kaliforniassa Yhdysvalloissa. Euroopassa kiinnostus katalyyttiseen polttoon on virinnyt 1990-luvulla, lähinnä ympäristösyistä.

Pienten NO_x -päästöjen vuoksi kiinnostus soveltaa katalyyttistä polttotekniikkaa sähköntuotannossa, erityisesti kaasuturbiiniprosessin yhteydessä, on jälleen kasvamassa (Dalla Betta 1997). Nykyisin NO_x -päästöjen ehkäisy kaasuturbiini- tai muissa polttoprosesseissa tapahtuu pääasiassa vesi- ja höyrylisäyksillä, sekoituspolttimilla ja selektiivisellä katalyyttisellä pelkistyksellä (SCR, selective catalytic reduction). Dalla Bettan (1997) mukaan kahdella ensiksi mainitulla tekniikalla päästään noin 25 ppm:n NO_x -päästötasolle. Sitä vastoin SCR:n avulla voidaan NO_x -päästöjä alentaa tasolle 5–10 ppm. Katalyyttisellä maakaasun poltolla on testeissä päästy 1–5 ppm:aan riippuen käytetyistä kaasuturbiini- ja polttojärjestelmistä. Katalyyttisen polton on arvioitu olevan paras ja halvin vaihtoehto, jos NO_x :n päästötaaso-vaatimukset ovat alle 5 ppm.

Nykyiset polttokatalyytit eivät toimi yli 1 000 °C:n lämpötilassa (Thevenin ym. 2001). Siksi onkin kehitetty erilaisia hybridiratkaisuja, joissa katalyytin toimintalämpötila rajoitetaan 400–1 000 °C:een. Lopullinen polttolämpötila saavutetaan katalyytin jälkeisessä homogeenisessä polttovyöhykkeessä. Maakaasua poltettaessa parhaat katalyytit ovat jalometallikatalyyttejä, erityisesti Pd (syttymiskatalyytti) ja korkeassa lämpötilassa aktiiviset ja stabiilit seosoksidikatalyytit (Burch 1997). Polttokammiossa vallitsevat olosuhteet ovat kuitenkin mille tahansa katalyytille erittäin haastavat. Suuret kaasun no-

peudet, korkea lämpötila ja paine sekä suuret lämpötilan vaihtelut asettavat katalyytti-materiaalille suuria vaatimuksia. Katalyytin kestävyys ja sen deaktivoitumisnopeus ky-seisissä olosuhteissa ovatkin erittäin tärkeitä tekijöitä tulevissa kaupallisissa sovelluk-sissa. Katalyyttien eliniän tulisi olla vähintään 30 000 h (Thevenin ym. 2001).

McCarty ym. (1999) mukaan katalyyttisen polton odotetaan kaupallistuvan aluksi maakaasua käyttävissä pienissä kaasuturbiineissa (1–5 MW_e) ja bensiiniä käyttävissä mikroturbiineissa (<100 kW_e, hybridiajoneuvot). Catalytica Energy Systems Inc. on testannut Yhdysvalloissa jo yli vuoden ajan 1,4 MW:n Kawasakin maakaasulla toimivaa kaasuturbiinia (Yee ym. 2000, Silicon Valley Business Ink 2001), johon on asennettu yhtiön kehittämä katalyyttinen XononTM-polttotekniikka (kuva 6). Turbiinin toiminta on ollut erittäin luotettavaa ja päästöt ovat olleet hyvin pieniä (NO_x ja CO <2 ppm, hiilive-dyt <1 ppm) (ETV 2000). Enron Energy Services on tilannut kolme katalyyttisellä pol-tolla varustettua 1,4 MW:n yksikköä. Alliance Power Inc. on puolestaan tilannut kuusi XononTM-polttotekniikalla varustettua General Electricin (GE) turbiinia (11 MW). Toi-minnan on määrä alkaa vuoden 2002 aikana (Silicon Valley Business Ink 2001). So-veltuvuustutkimuksia on tehty myös GE:n 170 MW:n turbiineille, joiden varustaminen katalyyttisellä poltolla toteutunee vasta vuosina 2003–2004. McDonellin (2001) mukaan kuitenkin jo kuluvan vuoden aikana pitkälti selvinnee katalyyttisen polttotekniikan markkinakelpoisuus.



Kuva 6. XononTM-katalyyttinen poltto (McCarty 2000).

Biomassaa käyttävän IGCC-laitoksen yhtenä ongelmana ovat kaasun sisältämät typpi-yhdisteet, kuten ammoniakki, joka poltossa muodostaa NO_x:a. Ammoniakin poistamista kaasutuskaasusta, mm. katalyyttisesti, ennen kaasun polttoa, tutkitaan ja kehitetään mm. VTT:ssa voimakkaasti. Toisena vaihtoehtona ammoniakista peräisin olevan NO_x:n muodostumisen ehkäisemiseksi on katalyyttinen poltto (Johansson & Järås 1999, Berg ym. 2000, Lebas & Martin 2000). Menetelmällä on mahdollista päästä hyvin pieniin polttoaineperäisiin NO_x-päästöihin. Samalla voidaan eliminoida tehokkaasti CO:n ja

hiilivetyjen päästöt sekä matalalämpöarvoisen kaasun polton stabiilisuusongelmat. Matalalämpöarvoisen kaasun katalyyttisissä polttotutkimuksissa on testattu erilaisia katalyyttejä (Berg ym. 2000). Matalassa lämpötilassa (140–270 °C) jalometallikatalyytit toimivat hyvin syttymiskatalyytteinä. Kuitenkin ammoniakkin konversio NO_x:ksi on ollut pienempi perusmetallikatalyyteillä kuin jalometallikatalyyteillä. NO_x:n on todettu muodostuvan miltei täysin polttoaineesta peräisin olevista typpiyhdisteistä. Vaikkakin katalyyttisissä polttotutkimuksissa saavutetut ammoniakkin konversiot NO_x:ksi ovat olleet varsin korkeita (30–90 %), pidetään katalyyttistä polttoa mielenkiintoisena mahdollisuutena paljon typpiyhdisteitä sisältäville polttoaineille. Katalyyttimateriaalien tulevan kehitystyön uskotaan tuottavan haluttuja tuloksia.

Katalyyttinen poltto on viimeisten kymmenen vuoden aikana kaupallistunut höyrystyvien orgaanisten yhdisteiden (VOC, Volatile Organic Compounds) polttosovelluksissa (McCarty ym. 1999). Monissa VOC-polttolaitoksissa käytetään katalyyttistä polttoa myös tukipolttolaitoksen poltossa. Tukipolttolaitosta käytetään lämpötilan nostoon ja palamisen tehostamiseen. Järjestelmät toimivat yleensä ilmanpaineessa, lämpötilatasolla 300–800 °C. Uudet, kehittyneemmät katalyyttimateriaalit voivat toimia myös korkeammassa lämpötiloissa ja paineessa.

Suomessa Kemira Metalkat Oy kehitti 1980-luvun lopulla uudentyyppisen tekniikan ajoneuvoissa tarvittavien pakokaasukatalyysaattorien valmistukseen. Samalla tekniikalla on valmistettu katalyysaattoreita myös orgaanisten yhdisteiden (VOC) käsittelyyn (Silvonen 2001). Suomessa on tällä tekniikalla varustettu katalyyttinen VOC-polttolaitos toiminut jo vuodesta 1993 lähtien Tikkurila Oy:ssä (kapasiteetti 42 000 m³/h), ja sillä päästään yhä yli 98 %:n puhdistustehoon. Vuonna 2001 otettiin käyttöön Eimo OYj:n Lahden tehtaiden liuotinkaasujen katalyyttinen polttolaitos, jonka käsittelyteho on 7 200 m³/h. Saastuneen maaperän puhdistuksessa Ekokem Oy on jo muutaman vuoden ajan käyttänyt katalyyttistä polttoa ns. "huokosimumenetelmän" puhdistustekniikkana. Ehovoc Oy, joka käyttää Kemiran valmistamia katalyyttejä ja vastaa VOC-laitosten toiminnasta, markkinoinnista ja myynnistä, on toimittanut jo kolme polttolaitosta (noin 650 m³/h) Ekokem Oy:lle tähän tarkoitukseen. Suomalaista VOC-tekniikka on tilattu myös ulkomaille.

2.4 Kaasutukseen ja pyrolyysitekniikkaan perustuvat moottorivoimalaitokset

Moottorivoimalaitoksissa voidaan käyttää myös kiinteistä polttoaineista valmistettua kaasutuskaasua tai pyrolyysiöljyä. Kaasutuskaasun käyttö liikkuvan kaluston moottoreissa on tunnettua kriisiaikojen tekniikkaa (häkäpönttöautot). Kaasutusmoottorivoimalat ovat nykyäänkin kaupallisessa käytössä mm. Kiinassa, missä tuotetaan pienessä ko-

kolokuokassa (< 500 kW_e) sähköä paikallisista biopolttoaineista. Tekniikan kaupallistumisen esteenä pienvoimalasovelluksissa ovat olleet tekniset ongelmat, jotka liittyvät kaasun puhdistamiseen orgaanisista epäpuhtauksista ilman myrkyllisten jätevesien tuottamista sekä pyrolyysiöljyn laatuun liittyvät kysymykset.

Suomessa on viime vuosina kehitetty uutta katalyyttistä kaasujen puhdistustekniikkaa, joka tekee mahdolliseksi kaasutusmoottorivoimalan toteuttamisen kokoluokassa 0,5–3 MW_e eli kokoluokassa, joka ei oikein ole taloudellisesti kilpailukykyistä vastapainehöyryvoimalaitosprosesseilla. Kehitetty prosessi koostuu matalalämpötilaisella jätelämmöllä toimivasta kostean biopolttoaineen kuivurista, kiinteäkerroskaasuttimesta, katalyyttisestä kaasujen puhdistusmenetelmästä, ahdetusta kaasumoottorista ja kaukolämpöä tuottavasta kaasujen jäähdytyslaitteistosta (Kurkela ym. 2000). Kosteilla biopolttoaineilla tämän prosessin hyötysuhteiksi on arvioitu 33–36 % sähköksi ja 50–53 % lämmöksi. Rakennusaste on noin 0,7. Prosessin kaupallistuminen edellyttää demonstraatiolaitoksen rakentamista ja pitkäaikaista kokemusta, jonka perusteella voidaan arvioida mm. huolto- ja käyttökustannusten suuruus. Perinteisissä kaasutukseen perustuvissa moottoriratkaisuissa, joissa kaasun jäähdytystä ja polttoaineen kuivausta ei ole optimoitu, sähköhyötysuhde jää tehokkaillakin moottorivaihtoehdoilla 24–32 %:iin (Solantausta & Huotari 2000).

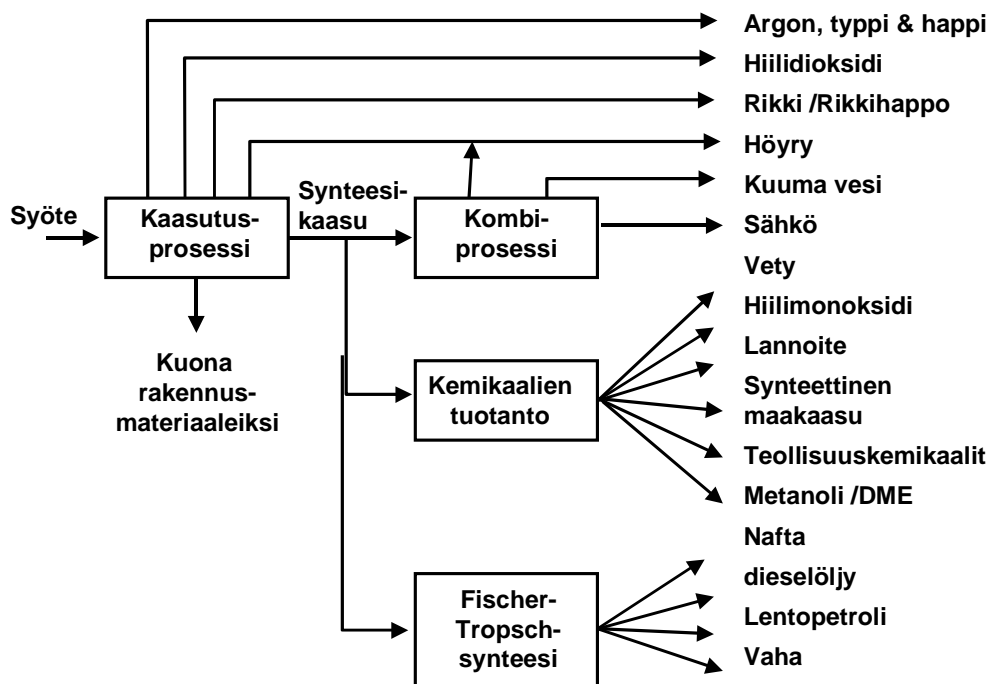
Pyrolyysiöljyn käyttö moottorivoimaloiden polttoaineena perustuu perusideaan, että puusta tai muusta biomassasta valmistetaan öljyä suhteellisen suurissa yksiköissä. Tuotettua öljyä voidaan varastoida ja kuljettaa kattiloissa tai moottorivoimaloissa käytettäväksi. Tekniikka on tällä hetkellä pilotointivaiheessa ja edellyttää kaupallisen kokoluokan demonstrointia ennen kaupallistumista. Prosessin sähköhyötysuhteen (puusta sähköksi) on arvioitu olevan 24–32 % (Solantausta & Huotari 2000), kun moottorivoimalaitoksen sähköteho on 2 MW ja pyrolyysiöljy tuotetaan polttoaineteholtaan noin 40–80 MW olevissa laitoksissa.

3. Energian, polttoaineiden ja kemikaalien yhteistuotanto

Energian, polttoaineiden ja kemikaalien yhteistuotanto tarjoaa tulevaisuudessa uusia ja taloudellisia tapoja yhteiskunnan energiahuollolle. Yhteistuotannolla tarkoitetaan seuraavien kolmen prosessin yhdistämistä (CPFC 2001):

- synteesikaasun valmistus hiiltä sisältävistä polttoaineista kaasuttamalla
- synteesikaasun osittainen muuntaminen esimerkiksi nestemäisiksi polttoainejaloiteiksi ja kemikaaleiksi
- energiantuotanto kombiprosessissa synteesikaasua polttamalla.

Kuvassa 7 on yleiskaavio kaasutukseen perustuvasta energian, polttonesteiden ja kemikaalien yhteistuotannosta. Seuraavassa tarkastellaan lähemmin yhteistuotannon tekniikkaa ja kehitysnäkymiä. Lisäksi arvioidaan tekniikoiden vaikutusta ympäristöpäästöihin ja niiden soveltuvuutta Suomen energiantuotantoon.



Kuva 7. Kaavio kaasutukseen perustuvan energian, polttonesteiden ja kemikaalien yhteistuotannosta (Rao 2001).

3.1 Synteesikaasun valmistus ja sähköntuotanto

Yhteistuotannon ensimmäinen vaihe on edellä kohdassa 2.2.1 kuvattu paineistettu happikaasutus. Järjestelmän ydin on kaasutin, jossa hiilipitoinen polttoaine hapen ja vesihöyryn läsnä ollessa kaasuntuu eli osittaihapettuu paineessa kehittämällä lämpöä. Tuotteena saadaan synteesikaasua (CO, H₂), joka sisältää myös pieniä määriä hiilidioksidia ja metaania. Polttoaineen sisältämä rikki pelkistyy prosessissa rikkivedyksi ja typpi ammoniakiksi. Nämä yhdisteet, yhdessä muiden epäpuhtauksien, kuten kloorivedyn ja kaasun sisältämän tuhkan kanssa, poistetaan kaasuttimen jälkeisissä kaasun puhdistuslaitteistoissa. Kaasutusvaiheesta tuleva puhdas synteesikaasu voidaan energian, polttoaineiden ja kemikaalien kysynnästä riippuen polttaa joko kokonaan tai osittain kaasuturbiinissa. Synteesikaasua voidaan käyttää myös sähköntuotantoon polttokennoissa tai siitä voidaan valmistaa vetyä, jota puolestaan voidaan käyttää moniin käyttötarkoituksiin teollisuudessa ja liikenteen energiana.

3.2 Polttoaineiden ja kemikaalien valmistus synteesikaasusta

Yhteistuotannossa avainkysymys on synteesikaasun käyttö muuhun kuin energiantuotantoon (CPFC 2001). Synteesikaasusta voidaan valmistaa erilaisia tuotteita, kuten vetyä, ympäristöystävällisiä liikennepolttonesteitä ja kemikaaleja. Vety on erityisen käyttökelpoinen tuote. Sen tuotanto vaatii vain alle 10 %:n lisäinvestointeja pelkän IGCC-prosessin investointeihin verrattuna. Vedyllä on tärkeä käyttö petrokemianteollisuuden hydrokrakkaus- ja rikinpoistoprosesseissa ja se on myös perusraaka-aine ammoniakkin valmistuksessa. Siksi sen tuottaminen voi mahdollistaa merkittäviä lisätuloja. Puhtaiden polttoaineiden, kuten vedyn, uskotaan tulevaisuudessa muuttavan tai korvaavan nykyisiä liikenteen polttoaineita. Yhteistuotantoprosesseihin kuuluvat lisäksi synteesikaasun konvertointi metanoliksi, korkeammiksi alkoholeiksi, Fischer-Tropsch (F-T) -nesteiksi, vahoiksi ja muiksi korkea-arvoisiksi tuotteiksi. F-T-polttoaineet, jotka eivät sisällä aro-maatteja, rikkiä ja typpeä ja joilla on korkea oktaaniluku, ovat arvokkaita dieselpolttoaineen korvaajia ja seosteita. Monia kaupallisia synteesikaasun konversiotekniikoita on jo kehitetty.

3.2.1 Fischer-Tropsch-prosessi

F-T-prosessi (CPFC 2001) muuntaa synteesikaasun pääasiassa suoraketjuisiksi hiilivedyiksi; parafiineiksi ja olefiineiksi. Synteesi, jossa CO ja H₂ reagoivat tuottaen hiiliveytyä ja vettä, tapahtuu kobolttia tai rautaa sisältävien katalyyttien läsnä ollessa. Prosessin toimintalämpötila on 470–570 °C ja paine 10–37 bar. Synteesikaasu syötetään rikinpoiston jälkeen F-T-reaktoriin. Reaktori toimii H₂/CO:n moolisuhteella 1–2. Reaktio on

eksoterminen ja sen selektiivisyys on lämpötilasta riippuva. Siksi hyvä lämmönsiirto on välttämätön. F-T-reaktoreita on kehitetty neljää eri tyyppiä: putkimainen kiinteäkerrosreaktori, kiertävä leijukerrosreaktori, kupliva leijukerrosreaktori ja kuplakolonnireaktori. Jokaisella reaktortyyppillä on omat etunsa ja haittansa. Kuplakolonnireaktoria pidetään toiminnaltaan parempana pääasiassa siitä syystä, että siinä lämpötilan hallinta on helpompaa kuin muissa reaktoreissa. F-T-prosessin tuotteet ovat ultrapuhtaita, joten ne eivät sisällä rikkiä eivätkä tyypeä ja ovat käytännössä aromaattivapaita. F-T-pohjainen dieselpolttoaine on erityisen hyvälaatuista. F-T-teknologialla tuotettua naftaa voidaan sekoittaa matalarikkiseen bensiiniin.

Euroopassa ja Yhdysvalloissa liikennepolttoainetuotannossa ollaan menossa yhä puhtaampiin polttonesteisiin (CPFC 2001). Mm. tämä laajentanee F-T-tuotteiden käyttöä tulevaisuudessa. F-T-teknologian toteuttamiseksi on rakennettu useita laitoksia. Merkittävää kaupallista toimintaa on harjoittanut jo useita vuosia Sasol Synfuels International (SASOL) Etelä-Afrikassa. Päämääränä on minimoida maan riippuvuutta tuontiöljystä ja hyödyntää olemassa olevia suuria hiilireservejä. Myös muilla yhtiöillä, kuten Exxon-Mobilella ja Shellillä sekä Rentechillä ja Syntroleumilla, on käytössä joko kaupallisia tai pilotti-F-T-laitoksia. Lisäksi useat yhtiöt ovat kiinnostuneet osallistumaan kaupallisiin F-T-projekteihin. Projekteissa on tarkoitus hyödyntää myös epätaloudellisesti pidettyjä maakaasuesiintymiä.

3.2.2 Alkoholien tuotanto

Metanolia tuotetaan hiilen oksideja (CO , CO_2) hydraamalla sopivan katalyytin läsnä ollessa (CSDLPM 1999). Tyypilliset reaktio-olosuhteet ovat: lämpötila 225–270 °C ja paine 50–100 bar. Reaktiot ovat voimakkaasti eksotermisiä. Metanolisynteesin hankalimpia ongelmia onkin lämpötilan hallinta reaktionopeuden ja katalyytin eliniän optimoimiseksi. Metanolin tuotantoprosessi soveltuu runsaasti hiilimonoksidia sisältävälle, kaasutuksesta peräisin olevalle synteetikaasulle. Reaktion konversiota rajoittaa kuitenkin vedyn pitoisuus synteetikaasussa. Jos tavoitteena on korkeampi konversio kuin synteetikaasun vedyn määrä edellyttää, yhtenä mahdollisuutena on käyttää hyväksi metanointikatalyytin aktiivisuutta vesikaasutasapainoreaktion suhteen. Tällöin reaktoriin täytyy lisätä vesihöyryä, jolloin syntyy lisää vetyä. Metanointireaktio on tasapainon rajoittama. Jos pyritään yli 50 %:n konversioon, täytyy prosessiin kytkeä höyrylisäyksen yhteyteen vielä hiilidioksidin poistoyksikkö.

Hiilen kaasutukseen perustuvaa metanointiprosessia on demonstroitu kaupallisessa mittassa U.S. DOE:n CCT-ohjelmassa (CSDLPM 1999). IGCC-tekniikan yhteyteen soveltuva, LPMEOHTM (Liquid Phase Methanol Process) -prosessin nimellä tunnettu menetelmä poikkeaa tavanomaisesta metanoliprosessista siinä, että reaktorina käytetään lie-

tekuplakolonia kiinteäkerrosreaktorin sijasta. Erinomainen lämpötilan säätömahdollisuus reaktorissa on yksi sen monista merkittävistä eduista tavanomaiseen tekniikkaan verrattuna.

Metanolin tuotantoteknologian ja kaasutuksen yhdistämisellä voidaan parantaa sähkön tuotannon taloutta ja tehokkuutta (CPFC 2001). Puhtaasti palavaa, varastokelpoista, nestemäistä metanolia voidaan tuottaa sähköntuottotarpeen ollessa vähäistä. Toisaalta metanolia voidaan käyttää kaasuturbiinipolttoaineena sähkön tuotantotarpeen ollessa suuri. Metanolin pääkäyttökohde on kuitenkin kemikaalien, kuten formaldehydin, etikkahapon ja muiden johdannaisien, valmistuksessa sekä polttoainekäytössä. Olefiineja, joiden markkinat ovat suuret ja yhä kasvavat, voidaan valmistaa metanolista dehydraamalla. Metanolin lisäksi synteetikaasusta voidaan valmistaa alkoholeja, joiden molekyylipaino on korkeampi (C_2 - C_6 -alkoholit) kuin metanolin. Kaupalliseen käyttöön sopivien tuotantoprosessien kehittäminen on meneillään. Korkeammat alkoholit on mahdollista sisällyttää bensiinin joukkoon oksygenaatteina, jolloin ne voivat ehkäistä mm. liikenteen savusumun muodostumista.

3.3 Kehitysnäkymät

Maakaasuun perustuva sähköntuotanto on kasvanut kaasun hyvän saatavuuden ja sen halvan hinnan vuoksi. Lisäksi maakaasukombivoimaloilla voidaan saavuttaa erittäin korkea sähköntuotannon hyötysuhde. Kaasun kallistuessa halvemmat energialähteet, kuten hiili ja vaihtoehtoiset polttoaineet, esim. teollisuuden sivutuotteet, biomassa ja erilaiset jättemateriaalit, valtaavat alaa. Kehitteillä on erilaisia kombivoimalaitoksia, jotka voivat käyttää polttoaineenaan hiiltä ja em. vaihtoehtoisia polttoaineita ja joiden sähköntuotannon tehokkuus on verrannollinen maakaasukombivoimaloihin. Näistä laitoksista esimerkkeinä ovat kaasutuskombivoimalaitokset (IGCC) sekä paineistetut leijukerros- ja hiilipölypolttolaitokset.

Maakaasukombivoimalan pääomakustannukset ovat noin puolet vastaavan hiilen käyttöön perustuvan IGCC-laitoksen kustannuksista (CPFC 2001). IGCC-laitos on kallis ja vaatii taloudellisen kokoluokan ja edullisen polttoaineen ollakseen kannattava investointi. Kaasutuksen kustannuksia voidaan kuitenkin pienentää polttoaineiden ja kemikaalien tuotannolla (CPFC 2001).

Kaasutuksen soveltuvuus erilaisille polttoaineille sekä kaasutusprosessissa syntyvien erilaisten tuotteiden moninainen käyttömahdollisuus ovat luoneet jo kaasutuksen erilaisille teollisuussovellutuksille markkinoita (CPFC 2001). Öljynjalostusteollisuudessa on olemassa lukuisia sovellusalueita. Kaasutusta käytetään jo jalostamoilla syntyvien jätevirtojen (esim. pohjaöljyjen) prosessointiin. Tällöin vältetään jätteen sijoittamiselta ja

voidaan käyttää tavallista hankalammin hyödynnettäviä raakaöljyalaatuja. Tuotetulla sähköllä ja höyryllä voidaan kattaa jalostamon oma kulutus. Lisäksi ylimääräisestä synteetikaasusta voidaan tuottaa jalostamon toimintaan integroidusti vetyä tai polttoaineita. Sellu- ja paperiteollisuuden kuidutusprosessissa syntyvä mustalipeä voitaisiin kaasuttaa, jolloin sen energiasisältöä voidaan käyttää meesauunin toimintaan ja saada samalla kuidutuskemikaalit uusiokäyttöön. Terästeollisuudessa kaasutuksella voidaan tuottaa synteetikaasua sekä pelkistysreaktioita varten että sähkön tuottamiseksi. Tekniikka on erityisen käyttökelpoinen maissa, joilla ei ole helposti saatavilla maakaasua tai koksia. Happikaasutuksen käytöstä biomassolle, etenkin suuressa kokoluokassa, on vielä vähän kokemuksia.

Arvioidaan (CPFC 2001), että noin vuoteen 2015 mennessä kaasutukseen perustuva tekniikka on saavuttanut maailmanlaajuisen hyväksynnän ja sen seurauksena kaasutus tunkeutuu sähköntuotantomarkkinoille, saa laajamittaisempaa käyttöä öljynjalostusteollisuudessa ja valloittaa polttoaine- ja kemikaalimarkkinoita. Kaasutustekniikalla voidaan päästä yhtä vähäisiin ympäristöpäästöihin kuin maakaasuun perustuvilla tekniikoilla. Suuri etu polttotekniikoihin verrattuna on myös, että kaasutustekniikassa syntyvää kiintoainetta voi hyödyntää (GWUA 2000). Useimmat kaasuttimet tuottavat tuotteita, kuten alkuainerikkiä ja lasitettua kuonaa, joiden markkina-arvo on sekä määrältään että laadultaan suurempi kuin poltossa syntyvien tuotteiden.

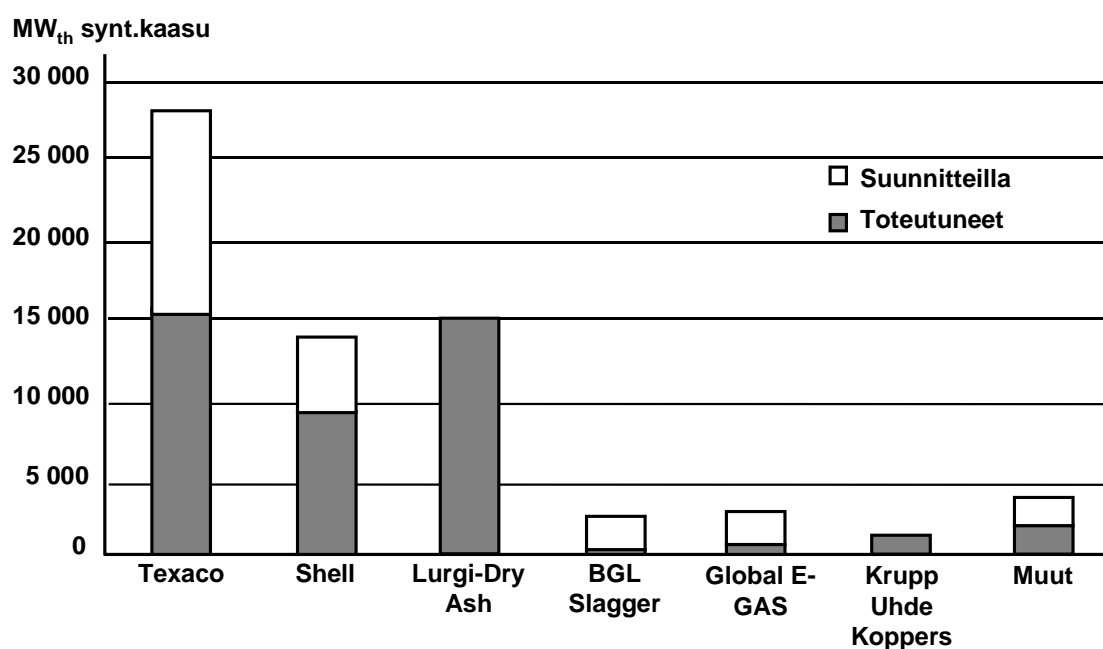
3.3.1 Kaasutusteknologia

Toteutuneita tai suunniteltuja kaupallisia kaasutusprojekteja on Simbeckin & Johnsonin (2001) mukaan maailmassa 163. Projektien runsaan 460 kaasuttimen yhteenlaskettu synteetikaasun tuotantoteho on noin 68 000 MW_{th} (vastaa noin 37 400 MW_e IGCC). Toteutuneiden ja rakenteilla olevan kapasiteetin osuus em. luvusta on noin 64 %. Suunnitteilla olevien, yleensä suurten sähköntuotantolaitosten, osuus on loput 36 %. Teholtaan 30 suurinta toteutunutta tai suunnitteilla olevaa synteetikaasuprojektia esitetään taulukossa 1. Kaasutusprojektit (GWUA 2000) ovat sijoittuneet eri puolille maapalloa, ja niissä on käytetty erilaisia kaasutustekniikoita. Myös kaasutuksessa käytettyjen lähtöaineiden ja tuotteiden jakauma vaihtelee. Suurin osa kaupallisesta kaasutustekniikasta perustuu Texacon, Shellin ja Lurgin (Dry ash) tekniikoihin (kuva 8). Kokonaiskapasiteettin perusteella (GWUA 2000) Texaco on suurin kaasutustekniikan lisensoija, osuus on lähes 40 %. Texaco ja Shell suunnittelevat uusia kaasutusprojekteja. Sen sijaan Lurgin kaasuttimen menestystä heikentävät tekniikkaan liittyvät ongelmat, kuten lähtöaineen laatua koskevat rajoitukset, suuri höyryntarve ja jätevirtojen puhdistusvaatimukset.

Taulukko 1. 30 suurinta kaupallista kaasutusprojektia (GWUA 2000).

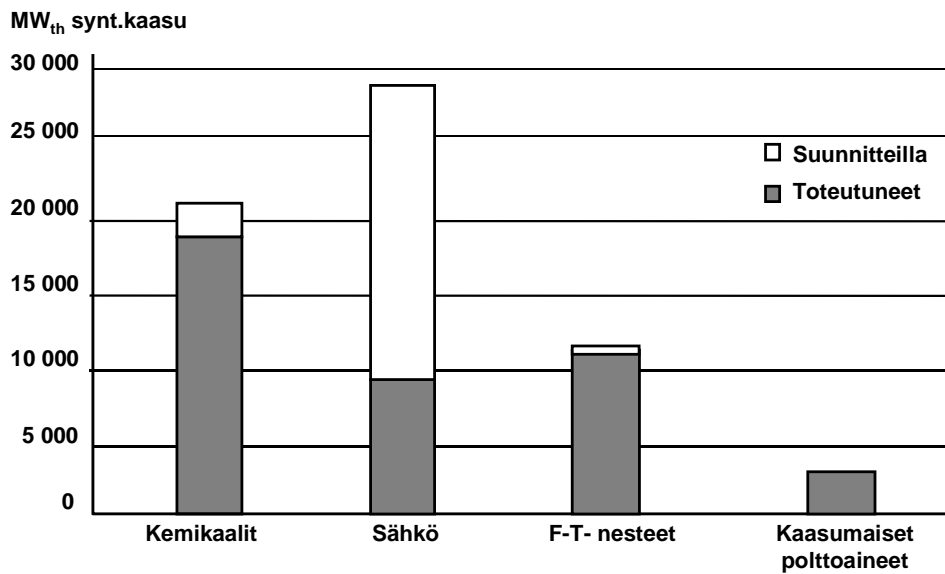
Kaasutuslaitos	Sijainti	Kaasutus- tekniikka	MW (synt. kaasua)	Käynn.- vuosi	Syöte ja tuote
Sasol-II	Et.-Afrikka	Lurgi Dry Ash	4 130	1977	Hiili, FT-nesteet
Sasol-III	Et.-Afrikka	Lurgi Dry Ash	4 130	1982	Hiili, FT-nesteet
Repsol/Iberdrola	Espanja	Texaco	1 654	2004*	Pohjaöljy, Sähkö
Dakota Gasification Co.	USA	Lurgi Dry Ash	1 545	1984	Ligniitti & pohjaöljy, Synt. maakaasu
SARLUX sd	Italia	Texaco	1 067	2000 ^b	Pohjaöljy, Sähkö & H ₂
Shell MDS Scin.Bhd.	Malesia	Shell	1 032	1993	Maakaasu, Keskitisleet
Linde AG	Saksa	Shell	984	1997	Pohjaöljy, H ₂ & metanoli
ISAB Energy	Italia	Texaco	982	1999 ^b	ROSE-bitumi, Sähkö & H ₂
Sasol-I	Et.-Afrikka	Lurgi Dry Ash	911	1995	Hiili, FT-nesteet
Total France/EdF/Texaco	Ranska	Texaco	895	2003*	Polttoöljy, Sähkö & H ₂
Tuntematon omistaja	USA	Texaco	656	1979	Maakaasu, Metanoli & CO
ShellNederland	Hollanti	Shell	637	1997	Pohjaöljy, H ₂ & Sähkö
SUV/EGT	Tsekki	Lurgi Dry Ash	636	1996	Hiili, Sähkö & höyry
Chinese Petroleum Corp.	Taiwan	Texaco	621	1984	Bitumi, H ₂ & CO
Hydro Agri Brunsbütel	Saksa	Shell	615	1978	Pohjaöljy, Ammoniakki
Public Service of Indiana	USA	Destec	591	1995	Hiili, Sähkö
VEBA Chemic AG	Saksa	Shell	588	1973	Pohjaöljy, Ammoniakki & metanoli
Ekogas SA	Espanja	PRENFLO	588	1997	Hiili & petrolikoksi, Sähkö
Motiva Enterprises LLC	USA	Texaco	558	1999 ^b	Petrolikoksi, Sähkö & höyry
API Raffineria di Anocna Chemoperol a.s.	Italia	Texaco	496	1999 ^b	Pohjaöljy, Sähkö
Demkolec BV	Tsekki	Shell	492	1971	Pohjaöljy, Metanoli & ammoniakki
Tampa Electric Co.	Hollanti	Shell	466	1994	Hiili, Sähkö
Ultrafertil S.A.	USA	Texaco	455	1996	Hiili, Sähkö
Shanghai Pacific Chemical	Brasilia	Shell	451	1979	Bitumijäännös, Ammoniakki
Shanghai Pacific Chemical	Kiina	Texaco	439	1995	Hiili, Metanoli & kaupunkikaasu
Exxon USA Inc.	USA	Texaco	436	2000 ^b	Petrolikoksi, Sähkö & synteesikaasu
Shanghai Pacific Chemical	Kiina	IGTU-GAS	410	1994	Hiili, Polttokaasu & kaupunkikaasu
Gujarat National Fertilizer	Intia	Texaco	405	1982	Pohjaöljy, Ammoniakki & metanoli
Esso Singapore Pty. Ltd	Singapore	Texaco	364	2000 ^b	Pohjaöljy, Sähkö & vety
Quimigal Aclubos	Portugali	Shell	328	1984	Pohjaöljy, Ammoniakki

*Suunnitteilla ^bRakenteilla

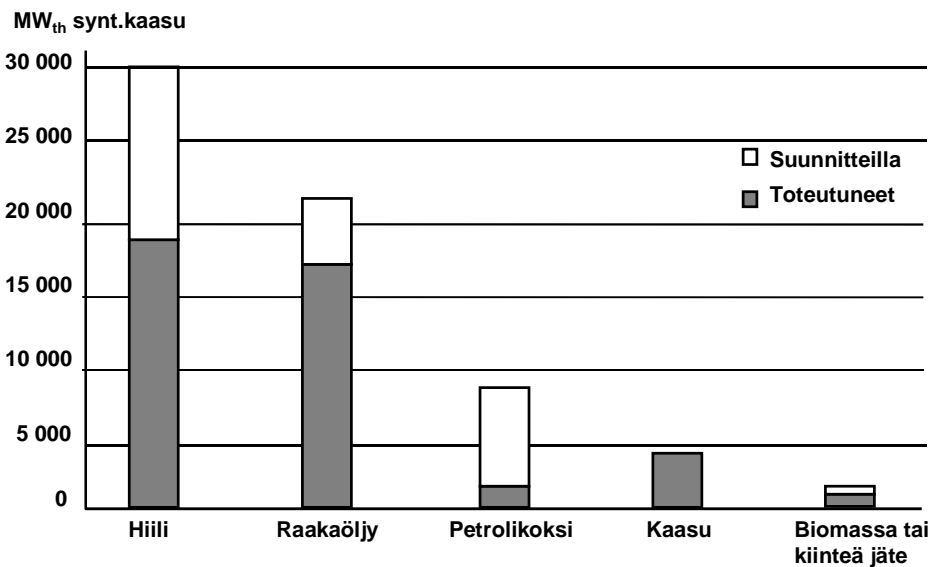


Kuva 8. Kaasutustekniikoiden yhteenlaskettu kapasiteetti kaasutustekniikan mukaan jaoteltuna (Simbeck & Johnson 2001).

Synteetikaasun valmistus kemikaalien tuottamiseksi on kaasutuksen pääsovellusalue (GWUA 2000) (kuva 9). Kokonaisuudessaan sovelluksen piirissä (noin 90 projektia) on synteetikaasun tuotantokapasiteettia hieman yli 18 000 MW_{th}. Sähköntuotanto on lisääntymässä nopeasti, ja se vastaakin suurimmasta osasta viimeaikaista kapasiteetin lisäystä. Suurin osa tästä tuotantokapasiteetin lisäyksestä liittyy sähköntuotantoon öljynjalostuksessa. Kaasutusprojektien pääraaka-aineet ovat kivihiili ja raakaöljy (raskaat jakeet) (kuva 10). Hiilen käyttö rajoittuu noin 30 projektiin (GWUA 2000), joiden kapasiteetti on noin 18 000 MW_{th} synteetikaasua. Sasolin Dakotan kaasutus ja muutamat IGCC-demonstraatioprojektit kattavat suurimman osan tästä kapasiteetista. Loput hiilikapasiteetista on muutamissa pienissä synteetikaasuprojekteissa Kiinassa, Intiassa, Afrikassa ja Yhdysvalloissa. Raakaöljyä käyttäviä kaasutusprojektien (noin 60) (GWUA 2000) synteetikaasun tuotantokapasiteetti on noin 17 000 MW_{th}. Lisäksi on viisi projektia jotka perustuvat petrolikoksin käyttöön (noin 1 400 MW_{th}). Huonolaatuisen pohjaöljyn ja petrolikoksin hinta on halpaa hiileen verrattuna.



Kuva 9. Kaasutustekniikoiden yhteenlaskettu kapasiteetti synteetikaasun loppukäytön mukaan jaoteltuna (Simbeck & Johnson 2001).



Kuva 10. Kaasutustekniikoiden yhteenlaskettu kapasiteetti lähtöaineiden mukaan jaoteltuna (Simbeck & Johnson 2001).

3.3.2 Yhteistuotantolaitokset

Euroopassa on eniten toteutettua tai suunnitteilla olevaa synteetikaasun tuotantokapasiteettia. Useimmat Länsi-Euroopan uudemmat kaasutuslaitokset ovat suuria öljynjalostamojen yhteistuotantoprojekteja (GWUA 2000), joissa on päämääränä jalostusasteen

nosto vähentämällä raskaan polttoöljyn tuotantoa. Aikaisemmin huonolaatuisella ras-
kaalla polttoöljyllä oli vahvat markkinat voimalaitospolttoaineena etenkin Etelä-
Euroopassa. Nykyään sähköntuotantomarkkinoiden vapautuminen ja uusien tiukkojen
päästöraja-arvojen voimaantulo on muuttamassa Euroopassa sähköntuotantoa ja öljyn-
jalostuksen tuotevalikoimaa. Länsi-Euroopan öljynjalostamot investoivat eliminoidak-
seen tai supistaakseen jäännösöljyn tuotantoa. Kaasutusta käytetään tehokkaasti vähäar-
voisen raakaöljyn jalostamiseen. Saatavaa puhdasta synteetikaasua käytetään sähkön,
höyryn ja vedyn tuottamiseen. Sähköntuotannon kokoluokka on tavallisesti suuri. Eri-
tyisesti Italiassa tuetaan tämäntyyppistä toimintaa. Merkittäviä ei-tuettuja projekteja on
menossa myös Hollannissa, Ranskassa ja Espanjassa.

Aasiassa ja Australiassa on myös huomattavaa kaasutukseen perustuvaa synteetikaasun
tuotantoa (GWUA 2000). Kiina on alueella hallitseva kaasutuksen markkina-alue suh-
teutettuna projektien määrään ja synteetikaasukapasiteettiin. Kaasutus on Kiinassa kui-
tenkin rajoittunut kemiallisiin synteetikaasusovelluksiin, mikä johtuu säädellyistä ener-
giamarkkinoista. Tämä rajoittaa yhteistuotantolaitosten tuottaman sähkön myyntiä säh-
köverkkoon. Japanissa kaasutus on lisääntynyt jalostamatoiminnassa. Japanin energia-
politiikka suosii halvan sähkön tuotantoa yksityisellä sektorilla.

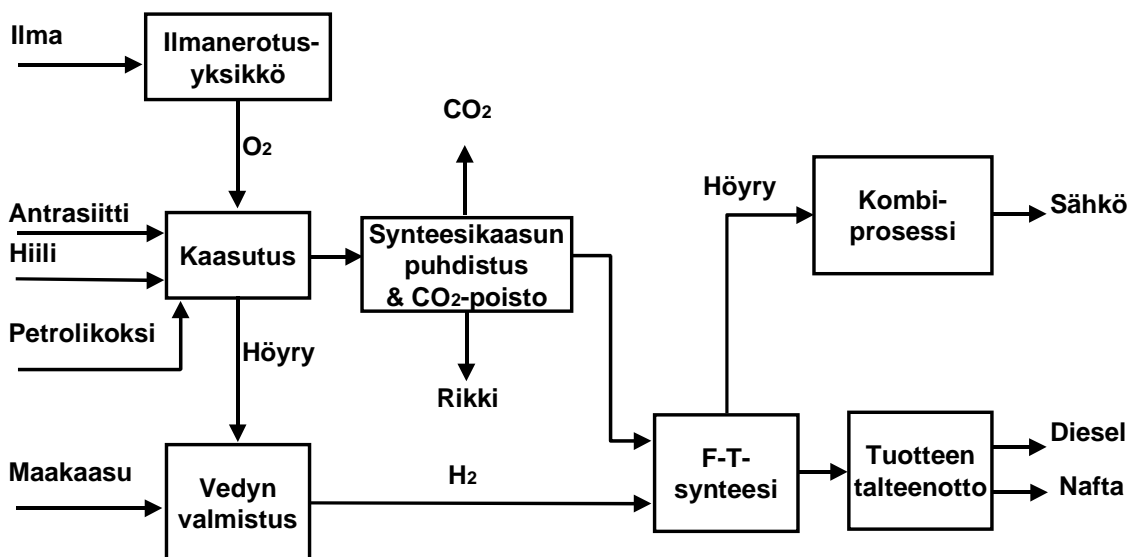
Afrikan ja Lähi-Idän alueella dominoivat Sasolin kolme suurta kaasutuslaitosta. Uusia
Sasol-tyyppisiä kaasuttimia ei olla rakentamassa (GWUA 2000) tälle alueelle, koska
öljyn maailmanmarkkinahinta on alhainen ja tukitoimet ovat vähentyneet.

Myös Pohjois-Amerikka on alue, jossa on käytössä merkittävästi kaasutustekniikkaa
(GWUA 2000). Yhdysvaltojen markkinat ovat suurimmat. Kuten Saksassa, Yhdys-
valloissakin on pieniä tavanomaisia synteetikaasutuslaitoksia kemikaalien tuottamiseen.
Siellä on myös muutamia ei-tavanomaisia kaasutusprojekteja, kuten vuonna 1984 käyn-
nistynyt Dakotan kaasutuslaitos, jossa hiilen kaasutuskaasusta syntetisoidaan maakaasua.
Suurin osa Yhdysvaltojen uudemmassa kaasutusaktiivisuudesta on suurissa säh-
köntuotantoprojekteissa. Niistä puolet on IGCC-demonstraatioita ja puolet ei-tuettuja
öljynjalostuksen yhteistuotantohankkeita.

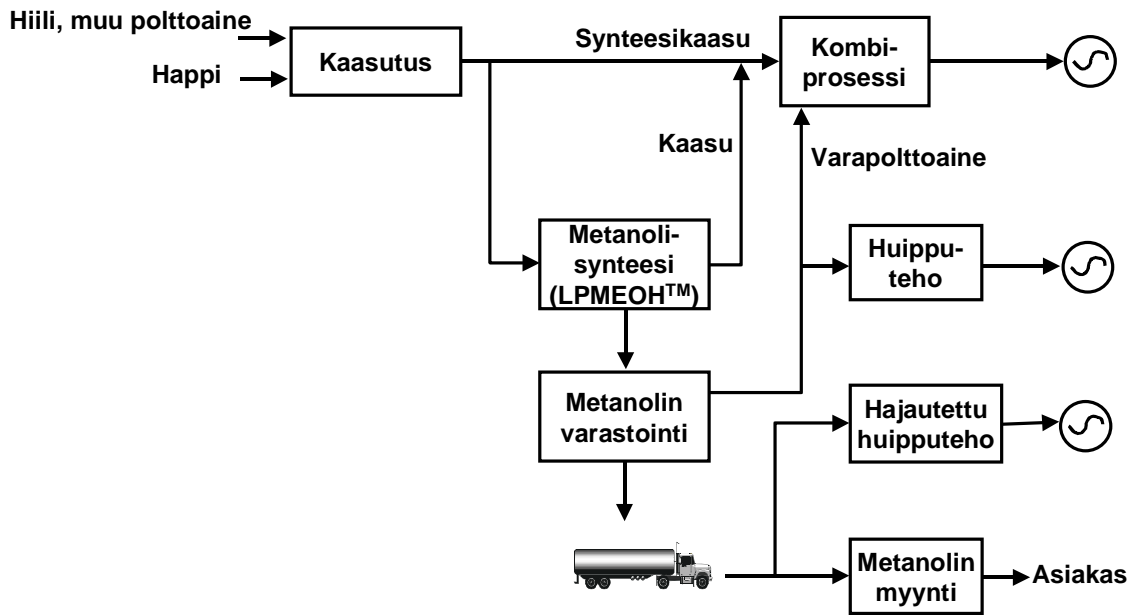
Yhdysvaltain energiaministeriö (U.S. DOE) tukee hankkeita, joiden tarkoituksena on
selvittää erilaisiin yhteistuotantomuotoihin, käytettäviin raaka-aineisiin ja laitosten si-
joituspaikkoihin liittyviä toteuttamismahdollisuuksia. Päämääränä on yrityksille yhteis-
tuotantolaitosten rakentamisesta koituvien investointiriskien pienentäminen. Kolme
projektia on jo aloitettu (CPFC 2001). Jokaisen päämääränä on yhteistuotantoon kyke-
nevän esikaupallisen laitoksen suunnittelu. Jos tulokset ovat toteuttamiskelpoisia, seu-
rauksena on pienten, yhteistuotantotekniikoiden toimivuutta demonstroivien laitosten
rakentaminen. Laitokset pystytettäisiin olemassa olevien teollisuuslaitosten yhteyteen,
ja niissä voitaisiin käyttää erilaisia raaka-aineita ja tuottaa enemmän kuin yhtä tuotetta.

Laitosten rakentamiseen osallistuisivat teollisuuden yhteenliittymät valtion myötävai-
kutuksella. Saatujen kokemusten perusteella uskotaan varsinaisten kaupallisten laitosten
toteuttamismahdollisuuksiin. Yhdysvalloissa menossa olevat yhteistuotantoprojektit
(CPFC 2001) ovat:

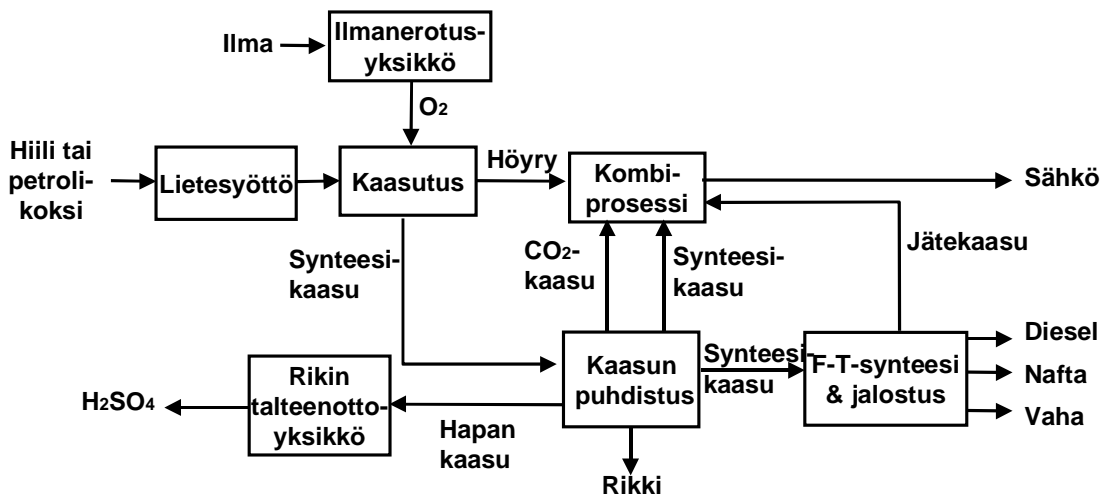
- Waste Management and Processors (WMP) -yhtiön projekti käsittää runsastuhkaisen
jäännöshiilen konvertoimisen korkealuokkaisiksi liikennepolttoaineiksi ja sähköksi
(kuva 11). Jäännöshiili on halpa raaka-aine ja sen käyttö on ympäristöystävällistä tarkoi-
tuksenmukaista. WMP:n lisäksi projektin osapuolina ovat Texaco (kaasutustekniik-
ka) ja SASOL Technology Ltd. (F-T-teknikka).
- Global Energy Inc. (Gasification Engineering Corp.) -yhtiön projektissa arvioidaan
sähkön ja kemikaalien yhteistuotantoa laitoksella, joka käyttää hiiltä ja muita hiiltä
sisältäviä raaka-aineita (kuva 12). Muina osapuolina hankkeessa ovat Air Products
& Chemicals Inc.(metanolin tuotanto), Dow Chemical Company, Dow Corning
Corporation, Methanex Corporation ja Siemens Westinghouse (sähköntuotanto).
- Texaco Energy Systems Inc:n projektissa yhdistyvät Texacon kaasutusosaaminen ja
Rentech Inc:n F-T-teknikan osaaminen (kuva 13). Muina osapuolina ovat Brown &
Rooth Services, GE Power Systems ja Praxair Inc. Prosessissa tuotetaan teknista-
loudellista tietoa erilaisista prosessioptioista, joiden tarkoituksena on tuottaa sähköä,
korkealaatuisia liikennepolttoaineita ja kemikaaleja hiilestä ja/tai petrolikoksista.



Kuva 11. WMP-yhtiön projektin prosessikaavio (CPFC 2001).



Kuva 12. Global Energy Inc:n projektin prosessikaavio (CPFC 2001).



Kuva 13. Texaco Energy Systems -yhtiön projektin prosessikaavio (CPFC 2001).

3.4 Vaikutukset päästöihin ja sovellettavuus Suomeen

Sähkömarkkinoiden vapautumisen seurauksena kilpailu sähköntuotannosta lisääntyy. Samalla yhä tiukempien ympäristösäädösten seurauksena haitallisten aineiden, kuten rikin ja typen oksidien, hiukkasten ja raskasmetallien sekä ns. kasvihuonekaasujen,

päästöjä ympäristöön joudutaan vähentämään. Näillä seikoilla on ilmeisen merkittävä vaikutus teollisuuteen ja koko yhteiskuntaan. Kaasutuskombivoimalaitokset (IGCC) kuuluvat yhdessä maakaasukombivoimaloiden kanssa puhtaimpiin ja tehokkaimpiin energiantuotantovaihtoehtoihin, joissa voidaan käyttää erilaisia hiiltä sisältäviä polttoaineita. IGCC-tekniikassa kaasun epäpuhtaudet täytyy poistaa tehokkaasti ennen kaasun turbiinipolttoa tai kaasun prosessointia polttoaineiksi tai kemikaaleiksi. Tuotekaasusta on mahdollista poistaa myös hiilidioksidi hyötykäyttöä tai varastointia varten huomattavasti tehokkaammin kuin savukaasusta. Tällöin käsiteltävän kaasun määrä on pienempi ja hiilidioksidipitoisuus korkeampi kuin tavanomaisessa savukaasussa. CO₂-neutraalien biomassapohjaisten raaka-aineiden käytöstä happikaasutuksessa ja yhteistuotannossa on toistaiseksi vähän kokemuksia. Valmistamalla yhteistuotannossa ultrapuhtaita polttoaineita liikennesektorille voidaan myös liikenteestä aiheutuvia päästöjä vähentää merkittävästi.

Suomelle energiaa, polttonesteitä ja kemikaaleja tuottavat yhteistuotantolaitokset voisivat luonnollisista syistä liittyä maamme biomassareserveihin. Näiden käyttöä eri tuotteiden valmistamiseen on arvioitu viime aikoina (Mäkinen ym. 1999, Ohström ym. 2001). Soodakattilan korvaamista mustalipeän kaasutukseen perustuvilla IGCC-laitoksilla kehitetään. 1990-luvun alussa metsäteollisuus tutki IGCC-laitosten (100 MW) sijoitusmahdollisuuksia Suomeen (Mäkinen ym. 1999). Tuolloin osoittautui mm., että olisi ollut vaikeuksia saada kerätyksi riittäviä puupolttoainemääriä laitoksille kilpailukykyiseen hintaan. Voimakas metsätähteiden korjuutekniikoiden kehitystyö on tuomassa kasvavia ja halvempia puupolttoainemääriä laitoksille. Olennaista ovat metsäteollisuuden strategiavalinnat metsätähteiden käytölle. Mäkisen ym. (1999) mukaan vaihtoehtona on saatavissa olevan lisäpuun käyttö leijukattiloissa korvaamaan hiiltä tai turvetta CO₂-päästösyistä tai kyseisen määrän käyttö lisäsähkön tai biojalosteiden tuotantoon. Happikaasutukseen perustuvasta biojalosteiden tuotannosta on suuressa kokoluokassa vähän kokemusta, vaikkakin leijukerroskaasutus lienee käyttökelpoisin kaasutusratkaisu. Kehitystyötä on tehty lähinnä IGCC-tekniikan kehityksen yhteydessä. Biomassan käyttöönotto vaatii kuitenkin vielä lisäpanostusta.

Tehdyn selvityksen (Ohlström ym. 2001) mukaan 100 MW_{pa}:n biomassapohjaiselle alkoholitehtaalle näyttäisi löytyvän sijoituspaikkoja vain isojen sellutehtaiden yhteydestä. Työssä arvioitiin sellutehtaaseen integroidun bioalkoholien ja vedyn valmistuksen kustannuksia. Arvioidut tuotantokustannukset olivat selvästi (2–4 kertaa) nykyisten raakaöljyyn ja maakaasuun perustuvien bensiinin ja metanolin (verottomia) hintoja korkeammat. Siksi biopolttoaineiden käytölle tuleekin löytää lisäperusteita mm. ympäristöpäästöistä. Selvitysten mukaan sähkön, polttoaineen ja lämmön yhteistuotannon ansiosta metanolin tuotantoprosessin tehokkuus nousi huomattavasti ja tuotantokustannukset alenivat. Ilmeistä lisätehokkuutta saataisiin vielä prosessien optimoimisella ja käyttämällä muodostunut jätelämpö tehokkaasti aluelämmityksessä. Tulevaisuudessa bioal-

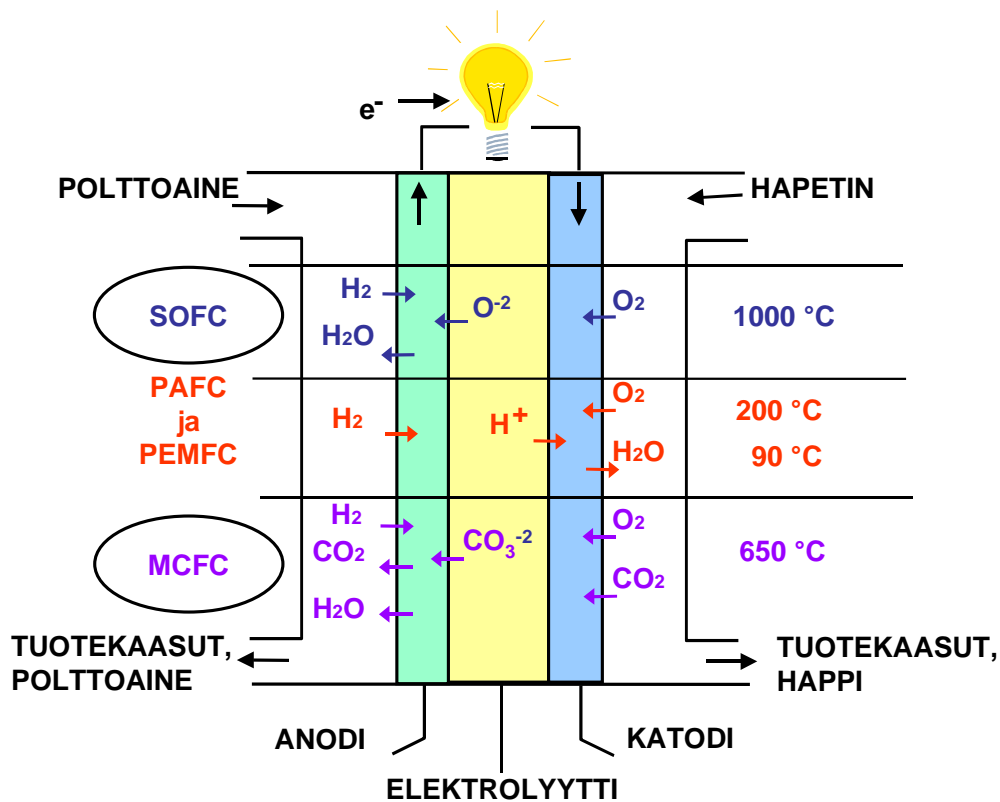
koholien uusi potentiaalinen käyttökohde (Mäkinen ym. 1999) on niiden hyödyntäminen sellun valmistuksen keittokemikaaleina. Esimerkkinä kehitteillä olevista prosesseista on suomalainen IDE-prosessi, jossa keittokemikaaleina ovat etanoli ja natriumhydroksidi.

Puunjalostusteollisuuden ohella yhteistuotanto on mahdollista myös muun prosessiteollisuuden, kuten öljynjalostuksen, kemiallisen prosessiteollisuuden ja metallurgisen teollisuuden, yhteydessä. Samoin keskitetyn energiatuotannon yhteyteen olisi mahdollista kytkeä IGCC-tekniikkaan perustuvia yhteistuotantolaitoksia, jotka voisivat käyttää teollisuuden itsensä käyttämien tai tuottamien raaka-aineiden lisäksi esimerkiksi biopolttoaineita tai jättemateriaaleja.

4. Korkealämpötilapolttokennot ja polttokennohybridit

4.1 Tausta

Polttokennoissa (FCH 2000) kemiallisissa reaktioissa vapautuva energia, tavallisesti vedyn ja hapen välinen reaktio, muuntuu suoraan matalajännitteiseksi tasavirtasähköksi ja lämmöksi. Polttokennon muodostavat anodi (negatiivinen elektrodi), katodi (positiivinen elektrodi) ja elektrolyytti. Yleensä polttokennossa kaasumainen polttoaine syötetään anodille ja hapetin (ilman) katodille jatkuvatoimisesti. Elektrodeilla tapahtuvat elektrokemialliset reaktiot tuottavat sähkövirran (kuva 14). Yksittäiset polttokennot tuottavat tasavirtaa vajaan voltin jännitteellä tehon ollessa muutamia kymmeniä tai satoja watteja (NRE 1999). Jotta voitaisiin tuottaa korkeampia jännitteitä ja suurempia tehoja, voidaan kennot koota sarjassa ja rinnan toimiviksi moduuleiksi ("stackeiksi"), jotka voivat käsittää tuhansia yksittäisiä kennoja.



Kuva 14. Polttokennon toimintakaavio (Samuelsen 2001).

Polttoaine voi olla peräisin monesta lähteestä. Kaupalliset polttokennosovellukset käyttävät fossiilisista hiilivedyistä, kuten maakaasusta, peräisin olevaa vetyä. Pitämällä tulevaisuudessa (NRE 1999) vety voi olla peräisin myös uusiutuvista energialähteistä. Käytännössä polttokennojärjestelmän osana on näin ollen polttoaineen reformeri, joka muuntaa hiilivedyt vetypitoiseksi kaasuksi. Toinen polttokennojärjestelmään kuuluva olennainen komponentti on sähkön muuntamiseen ja vakiointiin tarvittava yksikkö, jolla tasavirtasähkö muunnetaan käyttökelpoiseen muotoon. Polttokennoilla on mahdollista saavuttaa korkeampi sähköntuotannon hyötysuhde ja huomattavasti pienemmät ympäristöpäästöt kuin tavanomaisilla energiantuotantotekniikoilla. Kennojen toiminta on suhteellisen äänetöntä ja niiden moduulirakenne sallii helposti koon suurentamisen. Kennoilla voi olla laaja sovellusalue (FCH 2000) sähköntuotannossa, yhdistetyssä lämmön- ja sähköntuotannossa (CHP) sekä polttomoottorin korvaajana liikenteessä.

Polttokennoja on erityyppisiä ja ne ovat erilaisessa kehitysvaiheessa. Kennot voidaan luokitella esimerkiksi käytetyn elektrolyyttimateriaalin ja siitä riippuvan toimintalämpötilan mukaan. Polttokennon toimintalämpötila ja käyttökelpoinen elinikä riippuvat mm. polttokennokomponentteina käytettyjen materiaalien fysikaalis-kemiallisista ja termomekaanisista ominaisuuksista (FCH 2000). Taulukossa 2 on yhteenveto tavallimpien polttokennotyyppien eroista, saavutettavista sähköntuotannon hyötysuhteista ja sovellusmahdollisuuksista. Veden korkean höyrynpaineen ja/tai korkean lämpötilan aiheuttaman toiminnan heikkenemisen takia vesipitoisia elektrolyyttejä käyttävien kennojen (PEFC, AFC) toimintalämpötila on maksimissaan noin 200 °C. Toimintalämpötilalla on olennainen merkitys myös kennossa käytettävän polttoaineen laadulle (FCH 2000). Matalassa lämpötilassa toimivat polttokennot voivat käyttää vain vetyä polttoaineenaan. Korkealämpötilakennoissa (MCFC, SOFC) voidaan sitä vastoin käyttää polttoaineena hiilimonoksidia ja jopa metaania. Kennoissa em. kaasut konvertoituvat kuitenkin pääasiassa vedyksi, jota kennot ensi sijassa käyttävät.

Polttokennoissa syntyy sähkön ohella runsaasti lämpöä, joka on poistettava järjestelmästä (FCH 2000). Polttokennon jätelämmöllä, jota ei hyödynnetä polttoaineen prosessoinnissa tai polttokennon muissa osajärjestelmissä, voidaan tuottaa kuumaa vettä, höyryä tai lisäsähköä. Lämmön hyödyntäminen riippuu loppukäyttäjän tarpeista ja prosessin erityispiirteistä. Korkean toimintalämpötilan takia korkealämpötilakennojen (MCFC, SOFC) jätelämmöllä voidaan tuottaa merkittäviä määriä korkeapaineista, tulistettua höyryä. Tulevaisuudessa suurissa polttokennovoimalaitoksissa voi olla kannattavaa tuottaa sähköä jätelämmöstä höyryturbiinilla. Paineistetuissa polttokennovoimalaitoksissa voidaan käyttää myös kaasuturbiinia tai kaasu- ja höyryturbiinikiertojen yhdistelmiä.

Polttokennot ovat mielenkiintoisia erityisesti hajautetun sähköntuotannon- ja CHP-tuotannon sovelluksissa. Näissä laitoksissa käyttämättömän polttoaineen hyväksikäyt-

töön ja jätelämmön talteenottoon liittyvien osajärjestelmien tasapainotuksen puute rajoittaa kuitenkin niiden tehokasta käyttöä (FCH 2000). Yhteinen lähestymistapa laitosten tasapainottamiseksi on yhdistää polttokenno toiseen sähköntuotantotekniikkaan (HFC 2001). Tuloksena on synergismi, jossa yhdistelmä toimii paljon tehokkaammin kuin järjestelmät yksinään. Esimerkkeinä näistä ns. polttokennohybrideistä eli "turbo-polttokennoista" ovat korkealämpötilakennot yhdistettynä kaasuturbiiniin, polttomoottoriin tai toiseen polttokennoon.

Taulukko 2. Tavallisimpien polttokennotyyppien eroavuudet (NRE 1999 ja FCH 2000).

Ominaisuus	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	ITSOFC	TSOFC
Elektrolyytti	Ioninvaihtomembraani	Kaliumhydroksidi	Fosforihappo	Alkali-karbonaattien seos	Kiinteä keraamioksidiksi	Kiinteä keraamioksidiksi
Toimintalämpötila, °C	60–90	50–200	190–210	630–650	600–800	800–1 000
Varauksen kuljettaja	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ⁻²	O ⁻²	O ⁻²
Kenno-materiaali	Hiili-perusteinen	Hiili-perusteinen	Grafiitti-perusteinen	Ruostumaton teräs	Keraami	Keraami
Katalyytti	Platina	Platina	Platina	Nikkeli	Perovskiitti	Perovskiitti
Sähköhyötysuhde, %	30–35	50	36	45–55	42–45	45–47
Soveltuvuus	Liikenne, kannettavat laitteet, hajautettu sähköntuotanto, CHP	Liikenne, avaruus-sovellukset	Hajautettu sähköntuotanto, CHP	Keskitetty ja hajautettu sähköntuotanto, CHP	Hajautettu sähköntuotanto, CHP	Keskitetty ja hajautettu sähköntuotanto, CHP

PEFC: Polymeeri-elektrolyyttipolttokenno, AFC: Alkalipolttokenno, PAFC: Fosforihappopolttokenno, MCFC: Sulakarbonaattipolttokenno, ITSOFC: Kiinteäoksidipolttokenno, alennettu lämpötila, TSOFC: Kiinteäoksidipolttokenno, korkea lämpötila

Ensimmäinen "kaupallinen" polttokenno oli 1950-luvulla Yhdysvaltojen avaruusohjelmassa menestyksekkäästi käytetty alkalipolttokenno. Myös stationaarisovelluksiin tarkoitettu fosforihappopolttokenno on ollut "kaupallinen", mutta hinnaltaan kallis, tuote jo useita vuosia. Stationaarisovelluksia varten on useita polttokennotyyppejä, jotka ovat lähellä kaupallistumista. Nämä kehitteillä olevat kennot, jotka on suunniteltu toimiviksi pääasiassa maakaasulla, tulevat lähitulevaisuudessa talo- ja kiinteistökokoluokkaan sekä hajautetun sähkön- ja CHP-tuotannon markkinoille. Kennojen korkea hinta ja vähäiset käyttökokemukset voivat kuitenkin suosia nykyisiä tai halvempia tulossa olevia energiantuotantotekniikoita, kuten mikroturbiineja. Polttokennojen kehityksen painopiste olisikin kohdistettava niiden hinnanalentamispyrkimykseen, jotta niiden tunkeutuminen laajemmin markkinoille olisi mahdollista. Mitkään nyt kehitteillä olevista polttokennotekniikoista eivät tulle käyttöön suuren kokoluokan perusvoimalaitoksissa ennen vuotta

2020. Kokemusta on haettava ensin pienemmän kokoluokan sovelluksista, jotka liittyvät em. hajautettuun sähköntuotantoon sekä yhdistettyyn lämmön- ja sähköntuotantoon. Taulukossa 3 on arvioita tulevasta maakaasukäyttöisten korkealämpötilapolttokennojen ja polttokennohybridien hyötysuhde- ja hintakehityksestä. CHP-sovelluksessa kokonaisyötysuhteeksi (sähkö + lämpö) arvioidaan yleensä 80–85 %. Hiilen ja biomassan kaasutukseen perustuvissa polttokennotarkasteluissa (Benson 2001) korkealämpötilakennojen investointikustannukset on arvioitu jonkin verran korkeammiksi kuin maakaasulla toimivilla kennoilla, noin 2 100–2 750 $\$/kW_e$:ksi tarkastelutapauksesta riippuen.

Taulukko 3. Maakaasulla toimivien korkealämpötilapolttokennojen ja polttokennohybridien hyötysuhde- ja hintakehitysarvioita eri kokoluokissa (Rastler 2001).

Ominaisuus	MCFC	SOFC	SOFC/MCFC-HYBRIDI		
	2005	2005	2005	2010+	2015+
Vuosi	2005	2005	2005	2010+	2015+
Kokoluokka, kW_e	250–3 000	1–300	300–30 000		
Sähköhyötysuhde, % (LHV)	50–55	50	63–70		
Investointikustannukset, $\$/kW_e$	1 250–1 715	800–1 500	1 600–1 100	1 100–660	690–480
Käyttökustannukset, $\$/kWh_e$	0,004–0,006	0,007–0,02	0,005–0,007		

Maailmalla on useita satoja yrityksiä ja organisaatioita, joiden toiminta liittyy tavalla tai toisella polttokennoihin. Tällä hetkellä stationaaristen polttokennojen demonstraatio-projekteissa käytetään pääasiassa yksinkertaisia, matalan molekyylipainon omaavia, polttoaineita, kuten vetyä ja maakaasua. Myös kaikki merkittävimmät polttokennokehittäjät pyrkivät markkinoille aluksi maakaasukäyttöisillä tuotteilla. Tekniikan kehittäjien jatkosuunnitelmat ja kaupallistumiskaavailut lienevät usein kuitenkin varsin optimistisia.

Seuraavassa tarkastellaan lähemmin korkealämpötilakennojen ja polttokennohybridien tekniikkaa ja esitetään katsaus tärkeimpien korkealämpötilakennojen ja polttokennohybridien kehittäjien merkittävimmistä demonstraatioprojekteista sekä jatkosuunnitelmista. Lisäksi arvioidaan tekniikoiden vaikutusta ympäristöpäästöihin ja niiden soveltuvuutta Suomen energiantuotantoon.

4.2 Sulakarbonaattipolttokenno

Sulakarbonaattipolttokennon (MCFC) elektrolyytti on yleensä alkalikarbonaattien seos, joka on sidottu keraamiseen $LiAlO_2$ -matriisiin. Kenno toimii 600–700 °C:n lämpötilas-

sa, jossa alkalikarbonaatti muodostaa johtokyvyltään hyvän suolasulan. Korkean käyttölämpötilan ansiosta ei kalliita jalometallikatalyyttejä tarvita, kuten matalalämpötilakennoilla, vaan nikkeli (anodi) ja nikkelioksidi (katodi) ovat riittävän aktiivisia elektrodimateriaaleja. MCFC:n korkea toimintalämpötila tuo mukanaan myös muita etuja matalalämpötilakennoihin verrattuna (FCH 2000). Reformointi voidaan tehdä itse kennossa, jos reformointikatalyytti on läsnä. Ulkopuolisen reformointiyksikön poistuessa järjestelmän teho paranee. Tällöin kuitenkin kennorakenne mutkistuu ja huoltokustannukset nousevat. Sisäistä reformointia käyttävä MCFC toimii yleensä ilmanpaineessa. Sitä vastoin ulkoista reformointia käyttävää MCFC-kennoa kehitetään myös paineistettuihin sovelluksiin. Hiilimonoksidia voidaan vedyn ohella käyttää suoraan polttoaineena, ja poistokaasun lämpötilataso on riittävän korkea höyry- ja kaasuturbiinille tai tehokkaaseen lämmityskäyttöön. Lisäksi MCFC pystyy toimimaan tehokkaasti hiilidioksidia sisältävän kaasun, kuten hiilestä ja biopolttoaineista peräisin olevan kaasutuskasun, kanssa. MCFC:llä on myös omat ongelmansa (FCH 2000). Elektrolyytti on liikkuva ja erittäin syövyttävä. Katodilla tarvitaan jatkuvasti hiilidioksidia, joka saadaan tavallisesti kierrättämällä anodin poistokaasuja karbonaatti-ionin muodostamiseksi. Reformointikatalyytin rikinsietokyky on heikko, kuten kaikilla reformointikatalyyteillä. Korkeasta lämpötilasta aiheutuu myös materiaaliongelmia, ts. kennon mekaaninen stabiilisuus heikkenee ja elinikä laskee.

4.2.1 Kehitysnäkymät

Sulakarbonaattikennoja kehitetään (FCH 2000, Benson 2001) maakaasua ja hiiltä (myös biopolttoaineita ja jätemateriaaleja) käyttävään energiantuotantoon sekä teollisuuden, yhdyskuntien että armeijan sovelluksiin. Yhdysvalloissa tekniikan kaupallistamiseen pyrkii erityisen aktiivisesti Fuel Cell Energy Inc. Euroopassa tekniikan kehittäjiä ovat mm. MTU Friedrichshafen GmbH ja Ansaldo Ricerche Srl sekä Japanissa mm. Hitachi, Ishikawajima-Harima Heavy Industries ja Mitsubishi Electric Corporation.

Sulakarbonaattipolttookennojen (MCFC) integrointia kiinteiden polttoaineiden kaasutustekniikkaan pidetään erittäin lupaavana mahdollisuutena (Benson 2001). Perusteluna on lähinnä se, että sulakarbonaattikennojen käyttövoimana voidaan käyttää sekä CO:a että CO₂:a. Muutaman seuraavan vuoden kuluessa on suunniteltu toteutettaviksi useita demonstraatioprojekteja kaasutuskasun käytölle MCFC:ssä. Fuel Cell Energy on mukana projektissa, johon kuuluu 2 MW_e:n MCFC:n demonstrointi 400 MW:n IGCC-laitoksella, joka on määrä rakentaa Kentuckyyneen, Yhdysvaltoihin. Japanissa on rakenteilla hiilen kaasutinlaitosprototyyppi, jossa on määrä kokeilla MCFC-kennoa kaasutuskasulla. Italialainen Ansaldo Ricerche demonstroi kehittämäänsä MCFC-tekniikkaa, joka voitaisiin integroida biomassan tai hiilen kaasutukseen.

Fuel Cell Energy Inc. kehittää sulakarbonaattikennoa (Direct Carbonate Fuel CellTM (DFC)), jonka polttoaineena voidaan käyttää maakaasua, kaasutuskaasua, biokaasua, dieselöljyä ym. polttoaineita (Benson 2001). Lähitulevaisuuden kaupalliseen tuotantoon kehitetyt tuotteet, jotka ovat kooltaan 300 kW_e, 1,5 MW_e ja 3 MW_e, on tarkoitettu hajutetun sähköntuotannon tarpeisiin. Suurin DFC:n demonstraatioprojekti yhtiöllä oli vuosina 1996–1997 Kaliforniassa toteutettu maakaasulla toiminut 2MW_e:n laitos. Se jouduttiin kuitenkin sulkemaan toimintahäiriöiden vuoksi 5 200 tunnin käytön jälkeen. Näiden kokemusten jälkeen yhtiö on demonstroinut kaupallistyyppistä 250 kW_e:n yksikköä Connecticutissa Yhdysvalloissa. Laitos toimi asetettujen tavoitteiden mukaisesti, ja se suljettiin tarkastuksia varten vuoden 2000 puolivälissä 1 800 käyttötunnin jälkeen. Tällä hetkellä Yhdysvalloissa, Euroopassa ja Japanissa on menossa tai suunnitteilla tekniikan demonstroimiseksi useita kenttäkokeita, lähinnä maakaasulla toimivia ja 250 kW_e:n kokoluokassa (Patel ja Ghezal-Ayagh 2001, Benson 2001). Japanilainen Marubeni-yhtymä on tilannut yhteensä 1,25 MW_e:n kokoisen DFC:n. 250 kW_e:n yksikkö toimitetaan vuonna 2001 ja muut myöhemmin 1 MW:n tai 250 kW_e:n yksikköinä. Euroopassa Fuel Cell Energyn eurooppalainen kumppani MTU Friedrichshafen GmbH on demonstroinut tekniikkaa jo vuodesta 1999 lähtien. Yhtiöllä on suunnitelmassa toimittaa useita uusia demonstraatiolaitoksia Eurooppaan (MTU Fuel Cell 2001). Toimitusten oli määrä alkaa jo vuoden 2001 lopulla. Fuel Cell Energyn ja MTU:n nykyisiä ja tulevia demonstraatiokohteita on taulukossa 4. DFC:n valmistuskapasiteetti on suunniteltu nostettavaksi nykyisestä kapasiteetista 50 MW/a aina 400 MW:iin vuoteen 2004 mennessä. Kaupallistuminen tapahtunee demonstraatioprojekteista saatavien kokemusten myötä vuoden 2005 paikkeilla. Laitosten hinnan arvellaan tuolloin laskevan nykyisten demonstraatiolaitosten (250 kW_e) noin 8 000 \$/kW_e:n yksikköhinnosta (Strakey 2001) huomattavasti, ts. 1 000–1 500 \$/kW_e:iin, kokoluokissa 0,25–3 MW_e.

Kawagoen voimalaitoksella Japanissa (Benson 2001) on toiminut vuonna 1999 nesteytettyä maakaasua käyttävä 1 MW_e:n MCFC-pilottilaitos. Laitoskokeilu kesti 5 000 tuntia (0,5 MPa) ja päättyi vuoden 2000 alussa. Demonstraatiossa saavutettiin tavoiteltu 1 MW:n sähköntuotantoteho (hyötysuhde 45 %). Kennoston heikkenemisnopeus oli alle tavoitteeksi asetetun yhden prosentin eli vain 0,5–0,7 % /1000 h. Laitoksella oli testattavana neljä 250 kW_e:n MCFC-moduulia, joista kaksi oli Ishikawajima-Harima Heavy Industriesin (IHI) ja kaksi Hitachin kehittämiä. Laitoksesta saatujen kokemusten perusteella menossa olevassa viisivuotisessa kehitysprojektissa kehitetään 750 kW_e:n kenno-moduuli, joka toimisi 1,2 MPa:n paineessa. Tarkoituksena on projektin loppuvaiheessa demonstroida laitosta hiilen kaasutuskaasulla. Myöhemmin tarkoituksena on laajentaa järjestelmää rakentamalla 7–8 MW:n demonstraatiolaitos, jossa MCFC yhdistettäisiin kaasuturbiiniin. Myös Mitsubishi Electric kehittää MCFC-yksikköä (200 kW_e). Ilmanpaineessa toimivaa, sisäisellä reformerilla varustettua kennoa on testattu yli 5 000 tuntia. Kennon toiminnan heikkenemisnopeus on ollut IHI:n ja Hitachin kennojen luokkaa.

Taulukko 4. Fuel Cell Energyn ja MTU:n MCFC-koelaitoksia (Patel & Ghezal-Ayagh 2001, MTU Fuel Cell 2001).

Asiakas	Toimitus	Sovellus
Ruhrgas, Dorstein, Saksa	1997	Koelaitos
Bielefeld University, Saksa	1999	Kenttäkoelaitos
Rhön Klinikum AG, Saksa	2001	Varavoima, CHP
Mercedes-Benz/FCE, USA	2001	Teollisuussovellus
LADWP/FCE, USA	2001	Sähköntuotanto
Marubeni 1, Japani	2001	Teollisuussovellus
RWE Essen, Saksa	2001	Energiapuisto Meteoriiiti
U.S. Coast Guard, USA	2001	CHP
Marubeni 2, Japani	2002	Teollisuussovellus
IZAR, Cartagena, Espanja	2002	Teollisuussovellus
Deutsche Telecom, Saksa	2002	Varavoima
LADWP 2/FCE, USA	2002	Hajautettu sähköntuotanto
LADWP 3/FCE, USA	2002	Hajautettu sähköntuotanto
Marubeni 3, Japani	2002	Teollisuussovellus
ENBW/Michelin, Saksa	2002	Teollisuussovellus
IPF KG, Magdeburg, Saksa	2002	Varavoima, CHP
VSE AG, Enseldorf, Saksa	2002	CHP, CO ₂ kasvihuoneen lannoitukseen
E-ON, Degussa, Saksa	2002	CHP, CO ₂ teollisuuskäyttöön
King County/1 MW, USA	2003	Anaerobinen mädättämökaasu
DOE/Global Energy/2 MW, USA	2004	Hiilen kaasutuskaasu

Italialaisen Ansaldo Ricerche Srl:n tavoitteena (Benson 2001) on MCFC:n käyttö hajautetun sähköntuotannon markkinoilla kokoluokassa 100 kW_e–5 MW_e. Ansaldoon kiinnostuksen kohteena on mm. biomassan kaasutus sekä hiilen ja jätteen kaasutuskaasun käyttö MCFC:ssä. EU:n tuella on menossa yhteisprojekti, jossa Ansaldoon tavoitteena on demonstroida 125 kW_e:n MCFC biomassan kaasutuskaasulla. Yhtiön kehittämä 500 kW_e:n MCFC-yksikkö on perusrakenneyksikkönä aina 20 MW_e:n kokoluokkaan asti.

4.3 Kiinteäoksidipolttokenno

Kiinteäoksidikennossa (SOFC) elektrolyytti on kiinteä metallioksidi, tavallisesti Y₂O₃-stabiloitu ZrO₂. Toimintalämpötila on 900–1 000 °C, jolloin happi-ionien diffuusio elektrolyytissä mahdollistuu. Tyypillinen anodi on Co-ZrO₂ tai Ni-ZrO₂ ja katodi Sr:lla seostettu LaMnO₃ (FCH 2000). SOFC:n kiinteä keraaminen rakenne helpottaa korrosio- ja käsittelyongelmia, joita sulaa elektrolyyttiä käyttävällä MCFC:llä on. Kennossa tapahtuvat reaktiot ovat nopeita, ja hiilimonoksidia voidaan käyttää polttoaineena suoraan, kuten sulakarbonaattikennossakin. Sitä vastoin katodilla ei tarvita hiilidioksidia, kuten MCFC:llä. Korkean toimintalämpötilan takia polttoaine voidaan reformoida ken-

nossa sisäisesti ja kehittyvä jätelämpö hyödyntää, kuten sulakarbonaattikennossakin. Kennon haittoina (FCH 2000) ovat korkeasta lämpötilasta aiheutuvat materiaalien vaurio-, valmistus- ja lämpölaajenemisongelmat. Myös kiinteäoksidikennon elektrolyytin korkea ominaisvastus heikentää kennon toimintaa MCFC:hen verrattuna.

Perinteisten zirkoniumiin perustuvien kiinteäoksidikenttien lisäksi kehitellään uusia elektrolyyttimateriaaleja, mm. cerium-gadolinium-elektrolyyttejä (NRE 1999). Nämä elektrolyytit voivat toimia matalammassa lämpötilassa (600–800 °C) kuin perinteinen kenno. Matalampaan lämpötilaan kehitteillä olevat kiinteäoksidikennot sallivat myös keraamirakenteita halvempien teräsrakenteiden käytön. Alemman toimintalämpötilan haittana on kennoreaktioiden hidastuminen. Ongelmaan pyritään vastaamaan uusien materiaalien ja ohuempien elektrolyyttien kehittämisellä (FCH 2000). Materiaalien kehittämistä pidetään yhtenä merkittävimmistä SOFC:n hinnan alentamiseen tähtäävistä toimenpiteistä. Tällä hetkellä täysin yhteensopivia materiaaleja kyseisellä lämpötilatasolla toimivalle kiinteäoksidikennolle ei ole vielä kehitetty (FCH 2000).

4.3.1 Kehitysnäkymät

Pisimmälle kehitetty kiinteäoksidikkenno on Siemens Westinghousen kehittämä putkikkenno, joka toimii noin 1 000 °C:ssa. Valmistajat eri puolilla maailmaa (mm. japanilaiset) ovat kehitelleet putkikenttien ohella myös levykenttien ja muita ratkaisuja, joiden uskotaan olevan sarjatuotannossa halvempia kuin putkikennot. Yleisesti levykenttien kehittäminen, sveitsiläisen Sulzer Hexis Ltd:n markkinoimaa pieneen kokoluokkaan soveltuvaa pyöreää levykenttää lukuun ottamatta, on kuitenkin vielä jäljessä Westinghousen putkikenttien kehittämisestä. Merkittävimpiin levykenttien kehittäjiin kuuluvat em. Sulzer Hexis Ltd, kanadalaiset Global Thermoelectric Inc. ja Fuel Cell Technology Ltd, australialainen Ceramic Fuel Cells Ltd ja englantilainen Rolls Royce (Benson 2001).

Vuonna 2001 päättyi Hollannissa Siemens Westinghousen 100 kW:n putkikenttien kahden vuoden ilmanpaineinen CHP-kenttäkoe. Kenno toimi luotettavasti yli 16 000 h ja sen sähköntuotannon hyötysuhde oli 46 % (Veyo 2001). Tällä hetkellä kenttien demonstraatiota jatketaan Essenissä, Saksassa. Paineistetun 220 kW:n polttokennohybridin (kenno yhdistettynä kaasuturbiiniin) kokeilu on meneillään Kaliforniassa Yhdysvalloissa (ks. 4.4 Polttokennohybridit). Siemens Westinghousen polttokennojen (CHP) ja kaasuturbiinihybridien (PSOFC/MTG) tulevia demonstraatiokohteita esitellään taulukossa 5. Siemensin putkikenttien valmistuskapasiteetti (Veyo 2001) on nykyään noin 2 MW_e/a. Vuosiksi 2002–2003 arvellaan toteutuvan 250 kW_e:n CHP-laitosten esikaupallistuminen, ja vuoden 2004 jälkeen odotetaan laitosten (CHP ja PSOFC/MTG) varsinaista kaupallistumista. Laitosten investointihinnan arvellaan laskevan esikaupallisen laitoksen hinnasta 10 000–20 000 \$/kW_e:sta jopa 2800–1500 \$/kW_e:iin, jolloin kyseessä olisi jo suurempi, megawatin PSOFC/MTG-laitos.

Taulukko 5. Siemens Westinghousen suunnittelemaa SOFC(CHP)- ja SOFC/PH-demonstraatiohankkeita (Veyo 2001).

Tyyppi	Arvioitu			Asiakas	Sijainti
	Käynnistyminen	Maksimi KW-AC	Maksimi AC/LHV		
CHP 250	2001	250	>45	Kinetics Inc. (Ontario Power Generation)	Toronto, Ontario, Kanada
PH 300	2002	300	>55	RWE, Thyssen Gas, Enel Produzione	Essen, Saksa
PH 300	2002	300	>55	Edison Spa	Spinetta, Marengo, Italia
CHP 250	2003	250	>45	(Alaska)	Alaska, USA
PH 1000	2003	1 000	>55	EPA/DOE	FT. Meade, Maryland USA
PH 1000	2003	1 000	>55	ENBW, EDF, GDF, TIWAG, EC	Marbach, Saksa
CHP 250 ZE	2003	250	45	Norske Shell	Kollsnes, Norja

CHP: Yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto
PH Paineistettu hybridi

Sveitsiläinen Sulzer Hexis Ltd kehittää ja markkinoi pyöreää 1 kW_e:n levykennoa talokohtaiseen CHP-sovellukseen (Benson 2001). Osan kennoista toimittaa hollantilainen ECN (Energy Research Centre of the Netherlands). Kennon polttoaineena voidaan käyttää maakaasua. Kennoa on myös demonstroitu lämmitysöljyllä. Tulevaisuudessa voitaneen käyttää myös biokaasua tai muita sopivia polttoaineita. Esikaupallisen laitoksen oli määrä käynnistyä jo vuonna 2001. Kaupallistumisen uskotaan tapahtuvan vuosina 2002–2003. Sarjatuotannossa (100 000 kennostackia/vuosi) kennon hintatavoite \$ 1 000/kW_e uskotaan saavutettavan.

Kanadalainen Global Thermoelectric Inc. (Benson 2001) kehittää 1–25 kW_e:n kennoa mm. syrjäseutujen sähkö- ja CHP-sovellukseen. Kennot perustuvat saksalaisen tutkimuslaitoksen Jülichin kehittämään tekniikkaan ja ne toimivat tällä hetkellä maakaasulla. Tutkimuksella pyritään alentamaan kennon toimintalämpötilaa 700 °C:seen, jotta voitaisiin käyttää halvempia rakennemateriaaleja.

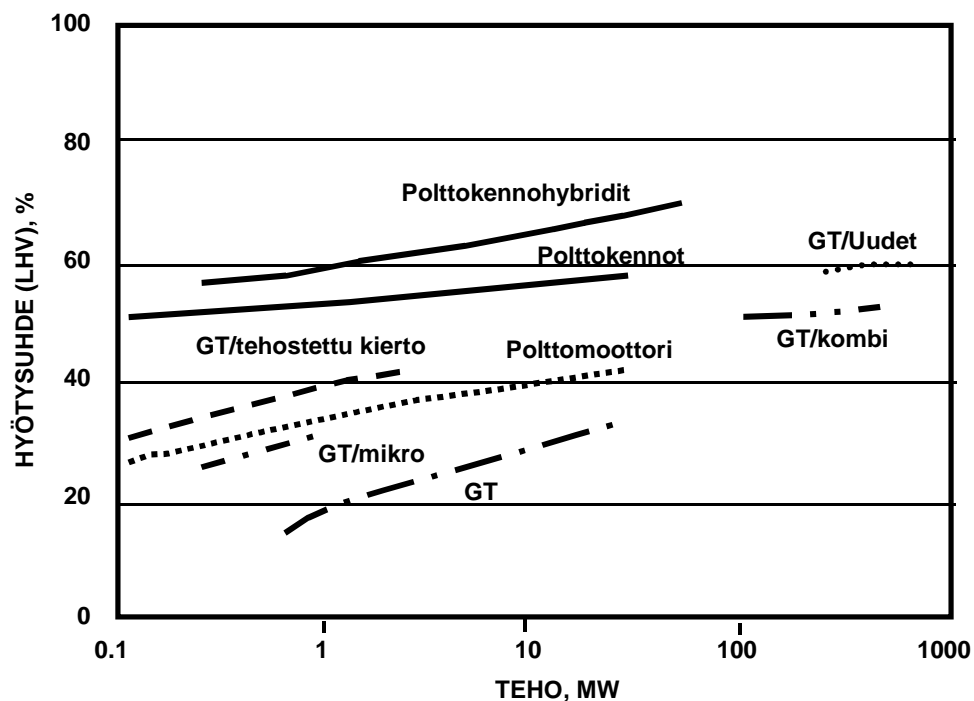
Toinen kanadalainen SOFC:n kehittäjä Fuel Cell Technologies Ltd on solminut yhteistyösopimuksen Siemens Westinghousen kanssa (FCT 2002). Yhteistyön päämääränä on kehittää 5 kW:n kennostacki mm. talokohtaiseen ja syrjäseutujen sähkö- ja CHP-sovellukseen. Kaupallistumisen tapahtunee jo vuoden 2002 lopulla. Yhtiön ensimmäinen eurooppalainen kolmen kennoyksikön sovelluskohde on Ruotsissa Tukholman uudella asuntoalueella. Siellä polttoaineena tullaan käyttämään pääasiassa biokaasua.

Englantilaisella Rolls Roycella (Benson 2001) on ollut SOFC:n kehitysprojekteja vuodesta 1993 lähtien. Tavoitteena on kehittää polttokennohybridi, jossa käytettäisiin Rolls Roycen kaasuturbiinia. Nykyiset demonstraatiot ovat 1–5 kW_e:n kokoluokassa. EU:n tukemassa projektissa on vuosien 2002–2003 aikana tavoitteena rakentaa 20 kW_e:n kennotacki. Rolls Roycen kehittämä kenno on levy- ja putkikennon yhdistelmä. Se voidaan rakentaa halvemmalla levykennotekniikalla, mutta sillä on putkikennon edut mm. materiaalien lämpölaajenemisen suhteen.

Australialainen Ceramic Fuel Cells Ltd (Benson 2001) kehittää 50–300 kW_e:n kennoa hajautetun sähköntuotannon tarpeisiin. Kaupallistumisen arvioidaan toteutuvan vuonna 2003. Vuoden 2000 aikana on rakennettu ja testattu 25 kW_e:n kennojärjestelmää. Kaupallisen prototyypin kehittäminen on menossa.

4.4 Polttokennohybridit

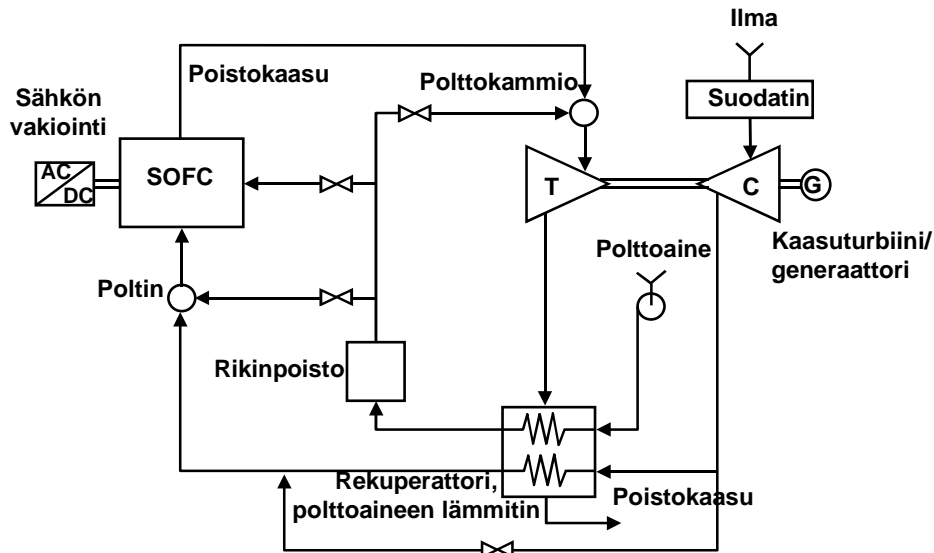
Esimerkkeinä tulevaisuuden hybridivoimalaitoksista on korkealämpötilapolttokennojen yhdistäminen kaasuturbiineihin, polttomoottoreihin tai toiseen polttokennoon (HFC 2001). Tällaisilla voimalaitoksilla on periaatteessa mahdollista saavuttaa yli 70 %:n sähköntuotannon hyötysuhde (kuva 15).



Kuva 15. Eri sähköntuotantotapojen tehokkuusvertailu (HFC 2001).

Polttokennon ja turbiinin muodostamassa hybridivoimalassa yhdistetään tavanomainen sulakarbonaattipolttokenno (MCFC) tai kiinteäoksidipolttokenno (SOFC) matalassa paineessa toimivaan kaasuturbiiniin, kompressoriin, polttokammioon ja joissakin tapauksissa lämmönvaihtimeen. Em. hybridilaitoksella voi olla lukuisia erilaisia kokoonpanoja (HFC 2001). Suorassa käytössä polttokenno toimii kaasuturbiinin polttokammiona, ja kaasuturbiini, joka tuottaa osan sähköstä, toimii laitoksen tasapainottajana. Epäsuorassa käytössä polttokennon tarvitsema happi saadaan kaasuturbiinin poistokaasuista ja kaasuturbiini tasapainottaa laitoksen. Epäsuorissa järjestelmissä käytetään korkeassa lämpötilassa toimivia lämmönvaihtimia. Tietyissä hajautetun sähkön tuotannon sovelluksissa myös kiinteäoksidipolttokennon yhdistäminen matalalämpötilakennoon (PEFC) voi olla tehokas ratkaisu laitoksen tasapainotuksessa (HFC 2001). SOFC voisi tuottaa peruskuormalaitoksena sekä sähköä että vetyä. Vetyä voitaisiin edelleen käyttää, mahdollisesti varastointijärjestelmään kytkettynä, joustavasti PEM-polttokennossa lisäsähkön tuotantoon.

Kuvassa 16 on esimerkkikaavio polttokennohybridistä (HFC 2001). Kaasuturbiini käyttää hyväkseen kennosta poistuvan kaasun energiasisältöä (lämpö ja käyttämätön polttoaine). Kennon poistokaasut sekoittuvat ja palavat, jolloin turbiiniin menevän kaasun lämpötila nousee. Toiminta korvaa kaasuturbiinin tavanomaisen polttokammion tehtävän. Rekuperattoria (metallinen kaasu-kaasu-lämmönvaihdin) käyttämällä kaasuturbiinilta poistuvan kaasun lämpö siirtyy polttokennoon syötettävään polttoaineeseen ja ilmaan. Kuvassa näkyvä ennen kaasuturbiinia oleva polttokammio on vain laitoksen käynnistämistä varten.



Kuva 16. Siemens Westinghousen polttokennohybridi (HFC 2001).

4.4.1 Kehitysnäkymät

Kaikki merkittävät polttokennovalmistajat ovat kiinnostuneita myös polttokennohybridien kehittelystä. Aktiivisimpia hybridien kehittäjiä ovat Siemens Westinghouse, Rolls Royce, Fuel Cell Energy ja Honeywell.

Siemens Westinghouse on kehittänyt ja valmistanut maailman ensimmäisen hybridipolttokennon, jossa on yhdistetty kiinteäoksidipolttokenno ja kaasuturbiini. Hybridilaitos on ollut toiminnassa vajaan vuoden Kalifornian yliopistossa Irvinissä toimivassa Fuel Cell Research Centerissä (Veyo 2001). 220 kW_e:n laitos toimii kolmen atmosfäärin paineessa. Itse polttokenno käsittää 1 152 yksittäistä putkimaista keraamista kennoa, jotka tuottavat noin 200 kW:n sähkötehon. Mikroturbiini tuottaa lisäksi täydellä teholla noin 20 kW lisäsähköä. Laitoksen sähköntuotannon hyötysuhde on ollut yli 50 %. Taulukossa 5 esitettiin Siemens Westinghousen suunnitelmia kiinteäoksidipolttokenno- ja kaasuturbiinihybridien tulevista demonstraatioista. Kuten taulukosta voidaan havaita, kiinnostus tehokkaisiin hybridivoimalaitoksiin on virinnyt myös eri puolilla maailmaa. Mm. Saksassa on suunniteltu käynnistettäväksi vuonna 2002 300 kW_e:n hybridilaitos (SOFC ja kaasuturbiini), jota käyttää teollisuusyhteisliittymä, jonka johdossa on RWE Energie AG. Edelleen Saksassa on suunniteltu vuonna 2003 alkavaksi 1 MW:n hybridiprojekti, jota käyttävät Energie Baden-Württemberg AG (EnBW), Electricite de France (EDF), Gaz de France ja Itävallan TIWAG.

Tällä hetkellä Yhdysvaltain energiaministeriö (U.S. Department of Energy, DOE) rahoittaa useita hybridiprojekteja (HFC 2001). Fuel Cell Energyllä on, yhdessä Allison Engine Companyn ja Capstone Turbinen kanssa, sopimus kehittää tärkeimpiä järjestelmäkomponentteja korkeassa lämpötilassa toimiville polttokennohybrideille. Lisäksi tavoitteena on suunnitella tehokas 40 MW_e:n voimalaitos. Fuel Cell Energy kehittää myös polttokennohybridivoimalaa (MCFC/kaasuturbiini), joka perustuu yhtiön kehittämän DFC polttokennon käyttöön. Honeywell Internationalilla on 3,5 vuoden projekti, jossa se kehittää ja demonstroi kiinteäoksidipolttokennoon (levykennoon) liittyvän hybridijärjestelmän hajautetun sähköntuotannon tarpeisiin. Rolls Roycella on sopimus kehittää pieni kaasuturbiini monikäyttösovelluksiin. Yhtiön tavoitteena on kehittää polttokennohybridi, jossa käytettäisiin Rolls Roycen kaasuturbiinia ja uutta kennorakennetta. U.S. DOE on myös aikaisemmin (HFC 2001) rahoittanut projekteja, joissa on etsitty mahdollisuuksia kytkeä eri tekniikoita (mm. polttokenno ja turbiini) tavalla, jolla voitaisiin tuottaa maakaasusta entistä tehokkaammin sähköä. Myös Euroopassa on menossa EU:n rahoituksella (FP5/EESD Projects, 2001) tarkasteluja ja selvityksiä, jotka liittyvät hybridivoimalaitoksiin. Näissä selvityksissä on mukana mm. Rolls Royce.

Hybridilaitosten on arvioitu maksavan vähemmän kuin samankokoisten polttokennojen (HFC 2001). Sähköntuotannon näillä laitoksilla arvellaan olevan 10–20 % halvempaa

kuin nykyisillä turbiinilaitoksilla. Laitoksen käytön ennakoidaan olevan miltei täysin automatisoitua. Tämän vuoksi jopa satojen laitosten valvonta ja hoito voitaneen tehdä keskitetysti etäisvalvontana. Ensimmäisten laitosten koko tulee olemaan alle 20 MW ja tyypillinen laitoskoko 1–10 MW:n luokkaa. Kaupallistumisen uskotaan tapahtuvan vuoden 2010 paikkeilla tai sitä ennen. Myöhemmin laitoskehityksen seurauksena (megawattikokoluokka) voi hybridilaitosten sähköntuotannon tehokkuus maakaasulla nousta yli 75 %:n. Tulevaisuuden kaavailuna on esitetty mm. kahden kiinteäoksidipolttokenomoduulin yhdistämistä uudenaikaisiin kaasuturbiineihin sekä kehittyneiden jäähdytys- ja lämmitysmenetelmien kytkemistä kiertoprosessien osaksi.

4.5 Vaikutukset päästöihin ja sovellettavuus Suomeen

Korkealämpötilapolttokennojen ja polttokennohybridien ympäristöystävällisyys on merkittävä lisäetu tavanomaisiin energiantuotantomenetelmiin verrattuna. Elektrokemiallisen konversion seurauksena korkealämpötilapolttokennossa syntyy lämpöä, hiilidioksidia ja vettä mutta ei kiinteää jätettä. Prosessilämpöä voidaan hyödyntää monella tavalla. Polttoaineelta vaadittavan puhtauden vuoksi syntyvien rikin ja typen oksidien määrä on hyvin pieni, tavallisesti alle mittaustarkkuuden (Patel & Ghezel-Ayagh 2001). Höyrystyvien orgaanisten yhdisteiden päästöjä ei myöskään käytännössä synny. Sähköntuotannon korkean hyötysuhteen vuoksi polttokennojen hiilidioksidipäästöt tuotettua energiaa kohti ovat huomattavasti pienemmät kuin tavanomaisten energiantuotantomenetelmien. Lähiajan polttokennomarkkinoilla pääasiallinen polttoaine on maakaasu, joka on mm. hiilidioksidipäästön osalta puhtaampi polttoaine kuin hiili tai öljy. Käytettäessä kennoissa orgaanisten aineiden hajoamiskaasuja, jotka ovat peräisin kaatopaikoilta ja jätevedenpuhdistamoilta, voidaan kasvihuonekaasujen (mm. metaanin) päästöjä pienentää. Samoin ympäristövaikutuksia voidaan vähentää käyttämällä prosessiteollisuuden jätekaasuja polttokennoissa. Lisäksi kennosta poistuvan kaasuvirran hiilidioksidipitoisuus, ilman typen laimentavaa vaikutusta, on korkea, mikä helpottaa CO₂:n talteenottoa. Menetelmiä poistokaasun hiilidioksidipitoisuuden edelleen nostamiseksi ja hiilidioksidin talteen ottamiseksi kehitetään (Haines ym. 2001). Tulevaisuudessa kyseen tuleen myös polttokennoissa käytettävän polttoaineen valmistus CO₂-neutraaleista biopolttolaitteista sekä tuuli- tai aurinkoenergian suora käyttö polttoaineen valmistukseen. Tällöin välttyään lisäksi fossiilisen raaka-aineen tuotantoketjun aiheuttamilta kasvihuonekaasupäästöiltä.

Suomessa korkealämpötilapolttokennoihin kohdistuvaa tutkimusta ja kehitystä on tehty hyvin vähän. Suomessa ei ole toistaiseksi korkealämpötilakennojen kaupallista valmistusta. Mielenkiinto on kuitenkin ulkomaisten kennokehittäjien voimakkaiden kaupallistamispyrkimysten ja suomalaisen teollisuuden, kuten Wärtsilän, kiinnostuksen seurauk-

sena lisääntymässä. Wärtsilän (Jumppanen 2002) mielenkiinnon kohteena ovat kiinteäoksidipolttokennosovellukset (stationaari- ja laivaliikennesovellus) kokoluokassa 0,2–5 MW. VTT:ssä onkin juuri alkamassa kansallinen kiinteäoksidipolttokennoihin liittyvä kehitysprojekti, jonka rahoittajina ovat Tekes, joukko teollisuusosapuolia ja VTT.

Suomessa, kuten muuallakin, tulevissa sovelluksissa käytettäneen nykyisille kennoille parhaiten soveltuvia polttoaineita, kuten maakaasua, kaatopaikkakaasuja, jäteveden käsitteilylaitoksilta peräisin olevia kaasuja sekä teollisuuden jätekaasuja. Liikenteen puolella myös öljyjalosteiden käyttö korkealämpötilapolttokennon polttoaineena on kiinnostuksen kohteena. Suomessa maakaasun saatavuus rajoittuu suppean kaasuputkiverkoston vuoksi vain eteläiseen Suomeen. Muita em. potentiaalisia jättepolttoaineita on saatavissa suurimpien taajamien ja teollisuuslaitosten läheltä. Suomessa energian, polttonesteiden ja kemikaalien yhteistuotantolaitoksia voisivat olla esimerkiksi suurten selutehtaiden yhteydessä olevat bioalkoholitehtaat. Metanolin käyttö polttokennojen polttoaineena voisi silloin olla varteenotettava vaihtoehto.

Koska korkealämpötilakennojen tutkimusta ja kehitystä on harjoitettu jo kymmeniä vuosia ulkomailla, lienee ainakin aluksi järkevää siirtää tietotaitoa Suomeen, tehdä yhteistyötä ulkomaisten tahojen kanssa sekä pyrkiä kehittämään tekniikoita maamme erityisolosuhteet huomioon ottaen. Ei liene mitään estettä sille, etteikö Suomesta voisi tulla merkittävä tekniikoiden kehittäjä, varsinkaan pitemmällä aikavälillä, jos niin halutaan ja panostukset ovat riittäviä. Korkealämpötilakennojen kytkentä uusiutuvien, kuten mm. biomassapohjaisten energiaratkaisujen, osaksi voisi olla yksi T&K-vaihtoehto.

Kaasutustekniikan käytön laajentuessa ja sen maailmanlaajuisen hyväksynnän lisääntyessä voidaan tekniikkaa käyttää monien erilaisten lähtöaineiden, kuten hiilen ja halpojen teollisuuden jätteiden ja sivutuotteiden sekä biomassan ja yhdyskuntajätteiden, muuntamiseen polttokennoille sopiviksi polttoaineiksi. Suomessa on kehitetty ja kehitetään voimakkaasti biomassan ja jätteiden kaasutustekniikkaa energiantuotantoon. Suomen kannalta erityisen kiinnostava hieman pitemmän aikavälin vaihtoehto on biomassan ja erilaisten jätteiden kaasutuskaasun (mahdollisesti myös pyrolyysiöljyn) käyttäminen myös korkealämpötilakennoissa ja polttokennohybrideissä. Optimaalisen kaasutustekniikan kehittäminen kennoa varten ja kaasutuskaasun (kuuma)puhdistaminen polttokennokäyttöön nousisi tällöin yhdeksi keskeiseksi tutkimus- ja kehityskohteeksi. Toimiakseen tehokkaasti polttokennot vaativat tuotetulta kaasulta sopivaa H_2/CO -koostumusta ja ultrapuhtautta mm. rikkiyhdisteiden suhteen. Tällä hetkellä kaasunpuhdistuksen puhtaustavoitteena on turbiini- ja moottorikäyttö. Suomessa on runsaasti uusiutuvia luonnonvaroja, kuten biomassaa, jota käytetäänkin energiantuotantoon lukuisissa aluelämpölaitoksissa eri puolilla maata. Kaasutuksen avulla biomassasta voitaisiin kuitenkin tuottaa polttokennoille käyttökelpoista polttoainetta, jolloin tulevaisuuden aluelämpölaitoksilla voitaisiin tuottaa valtakunnallisestikin huomattava määrä lisäsäh-

köä aluelämmön ohella. Erityisesti biomassaa ja jätteitä käyttävien pienten kaasutuslaitosten taloudellisuutta voitaisiin parantaa yhdistämällä näiden polttoaineiden kaasutus fossiilisia polttoaineita käyttävän kaasutuslaitoksen tai maakaasuvoimalan yhteyteen. Kaasutustekniikan ja sitä hyödyntävän polttokennotekniikan tulevaisuus Suomessa, kuten muuallakin maailmassa, riippuu kuitenkin tulevista kaasutuslaitosten rakentamispäätöksistä, jotka määräytyvät viime kädessä taloudellisuuden perusteella.

Vaikka tarkastelujen mukaan kiinteäoksidipolttokenno on tehokkaampi kaasutus-kombiprosessin osana, varsinkin sähkötehon kannalta, ensimmäisissä kaasutuskaasusovellutuksissa käytettäneen sulakarbonaattikenoja. Kaasutuskaasun käyttökokemukset ja kennon toimintalämpötilan sopivuus olemassa oleville oheislaitteille puoltavat sulakarbonaattikenojen käyttöä. Kaasutuksen avulla saatavaa synteetikaasua ei tarvitse reformoida, mikä voi helpottaa polttokennostackin suunnittelua, koska esimerkiksi sisäisiä reformointilevyjä ja katalyyttiä ei tarvita. Kehitteillä olevissa maakaasukäyttöisissä kennoissa, joissa käytetään sisäistä reformointiyksikköä, on kyseisellä operaatiolla kuitenkin tärkeä merkitys koko kennostackin lämpötalouden hallinnan kannalta. Tois-taiseksi kaasutuskaasulla hyvin toimivaa kennostackia, joka ei tarvitse sisäistä reforme-ria, mutta tarvitsee tehokkaan ja taloudellisen lämmön käyttöjärjestelmän, ei ole vielä kehitetty.

5. Yhteenveto ja johtopäätökset

Energiantuotannon tehostaminen uuden voimalaitostekniikan avulla on mahdollista sekä fossiilisiin polttoaineisiin että uusiutuviin bio- ja jätepolttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa. Fortum Oy:n ja VTT:n yhteisprojektissa selvitettiin keskitetyn energiantuotannon hyötysuhteen nostamiseen liittyvää uutta tekniikkaa ja kehitysnäkymiä. Samalla arvioitiin tekniikan vaikutusta päästöihin ja sovellettavuutta Suomeen energiantuotantoon. Tässä julkaisussa esitetään projektin tulokset VTT:n aihealueiden osalta: kaasutus- ja polttotekniikat; yhdistetyt energian, polttoaineiden ja kemikaalien tuotantovaihtoehdot sekä korkealämpötilapolttokennot ja polttokennohybridit.

5.1 Kombivoimalat

Ensimmäisen sukupolven paineistetun leijukerrospolton (PFBC) potentiaali- ja markkinanäkymät ovat heikentyneet. Tämän muutoksen syitä ovat perinteisen höyryvoimalaitoksen hyötysuhteen paraneminen ja erityisesti ylikriittisten prosessien kehitys, maakaasukombitekniikan yleistyminen ja hyvä kilpailukyky, kiristyneet päästönormit, jotka edellyttävät erittäin tehokasta rikin- ja typenoksidien poistoa, sekä kaasutuskombitekniikan paremmat mahdollisuudet täyttää tulevaisuuden hiilivoimaloiden hyötysuhde-, päästö- ja CO₂:n poistotavoitteet. Leijukerrospolton ohella kehitetään hiilen paineistettuun pölypolttoon perustuvaa kombivoimalaitosprosessia. Tämän prosessin kehitys on kuitenkin selvästi varhaisemmassa vaiheessa kuin leijukerrostekniikan.

Toistaiseksi rakennetut, happikaasutukseen perustuvat IGCC-laitokset ovat olleet luonteeltaan demonstraatiolaitoksia. IGCC-tekniikan oletetaan kaupallistuvan ensin öljynjalostamoihin integroiduissa pohjaöljyn kaasutussovelluksissa ja sitten kivihiilikäyttöisissä lauhdevoimalaitoksissa. Kaupallistumisen aikataulu riippuu lähinnä taloudellisesta kilpailukykyvystä verrattuna perinteisiin höyryvoimalaitoksiin ja maakaasukombeihin. Suomessa tämän tekniikan mahdollinen soveltaminen rajoittunee pohjaöljyn kaasutuslaitosten rakentamiseen öljynjalostuksen yhteyteen. Nämä laitokset voitaisiin ainakin osittain toteuttaa yhdistettyinä sähkön ja prosessihöyryn tuotantolaitoksina.

Suomessa panostettiin 1990-luvulla voimakkaasti ns. yksinkertaistetun kaasutuskombiprosessin (simplified IGCC) kehittämiseen, jossa kiinteä polttoaine (biomassa, turve, hiili) kaasutetaan paineistetussa leijukerroskaasuttimessa ilman avulla. Toistaiseksi tällä tekniikalla on toteutettu vain yksi koelaitos. Laitos sijaitsi Etelä-Ruotsissa Värnamon kaupungissa ja sen koekäyttöohjelma saatiin päätökseen vuonna 1999. Teknisesti prosessi on valmis myös suuren kokoluokan demonstrointiin. Ensimmäisten laitosten toteuttaminen kuitenkin edellyttää tavanomaista investointitukea suurempaa julkista tukea

ja/tai uusiutuvista polttoaineista valmistetun sähkön tuotannon kilpailukyvyn huomattavaa parantumista.

Kehitteillä olevista mustalipeän kaasutusprosesseista teknisesti pisimmällä on Chemrec-prosessi. Ilmanpaineinen prosessi on demonstroitu, vaikka siinä onkin edelleen esim. joitakin hankalia materiaaliongelmiä. Paineistetun prosessin demonstroitinta on käynnistymässä sekä Ruotsissa että Yhdysvalloissa. Onnistuessaan mustalipeän kaasutus tarjoaisi perinteiselle soodakattilalle IGCC-prosessin kautta mielenkiintoisen vaihtoehdon, jolla olisi mahdollista nostaa sellutehtaiden energiantuotannon rakennusastetta. Nykyaikaisissa sellutehtaissa saadaan mustalipeästä ja kuoresta tuotettua energiaa ylimäärin sellutehtaiden omiin tarpeisiin. Sellu- ja paperiteollisuus on kuitenkin kokonaisuudessaan suuri sähköntuoja.

Katalyyttisen polton pääasiallinen hyöty on polton stabiilisuus ja tehokkuus, jolloin hiilimonoksidin ja hiilivetyjen sekä erityisesti termisen NO_x :n päästöt ovat erittäin pieniä. Pienten NO_x -päästöjen vuoksi kiinnostus soveltaa katalyyttistä polttotekniikkaa sähköntuotannossa, erityisesti kaasuturbiiniprosessin yhteydessä, on kasvamassa. Katalyyttisen polton on arvioitu olevan paras ja halvin vaihtoehto, jos NO_x :n päästötasovaatimukset ovat alle 5 ppm. Katalyyttisen polttotekniikan markkinakelpoisuus selvinnee jo lähivuosina. Katalyyttisen polton odotetaan kaupallistuvan aluksi maakaasua käyttävissä pienissä kaasuturbiineissa (1–5 MW_e) ja bensiiniä käyttävissä mikroturbiineissa (<100 kW_e , hybridiajoneuvot).

Biomassaa käyttävän IGCC-laitoksen yhtenä ongelmana ovat kaasun sisältämät typpi-yhdisteet, kuten ammoniakki, joka poltossa muodostaa NO_x :a. Ammoniakin poistamista kaasutuskaasusta mm. katalyyttisesti ennen kaasun polttoa tutkitaan ja kehitetään mm. VTT:ssä voimakkaasti. Toisena vaihtoehtona ammoniakista peräisin olevan NO_x :n muodostumisen ehkäisemiseksi on katalyyttinen poltto. Menetelmällä on mahdollista päästä hyvin pieniin polttoaineperäisiin NO_x -päästöihin. Samalla voidaan eliminoida tehokkaasti CO :n ja hiilivetyjen päästöt sekä matalalämpöarvoisen kaasun polton stabiilisuusongelmat. Höyrystyvien orgaanisten katalyyttinen poltto on jo kaupallista tekniikkaa, jossa suomalaisilla yrityksillä on erityisosaamista.

Moottorivoimalaitoksissa voidaan käyttää myös kiinteistä polttoaineista valmistettua kaasutuskaasua tai pyrolyysiöljyä. Tekniikan kaupallistumisen esteenä pienvoimalasovelluksissa ovat olleet tekniset ongelmat, jotka liittyvät mm. kaasun puhdistamiseen ja öljyn laatuksymyksiin. Suomessa on viime vuosina kehitetty uutta katalyyttistä kaasujen puhdistustekniikkaa, joka tekee mahdolliseksi kaasutusmoottorivoimalan toteuttamisen kokoluokassa 0,5–3 MW_e . Prosessin kaupallistuminen edellyttää demonstraatiolaitoksen rakentamista ja pitkäaikaista kokemusta. Puusta tai muusta biomassasta valmistettua öljyä voidaan varastoida ja kuljettaa kattiloissa tai moottorivoimaloissa käytettä-

viksi. Tekniikka on tällä hetkellä kokeiluvaiheessa ja edellyttää kaupallisen kokoluokan demonstrointia ennen kaupallistumista.

5.2 Yhteistuotantolaitokset

Kaasutustekniikalla voidaan muuntaa erilaiset hiiltä sisältävät lähtöaineet, kuten hiili ja halvat teollisuuden jätteet ja sivutuotteet sekä biomassa ja yhdyskuntajätteet, puhtaaksi synteetikaasuksi, joka koostuu vedyn ja hiilimonoksidin seoksesta. Tuotettua synteetikaasua voidaan käyttää erilaisten kaasumaisten tai nestemäisten polttoaineiden ja kemikaalien valmistamiseen sekä energian tuotantoon. Kaasutuksen perinteinen markkina-alue on ollut synteetikaasun valmistaminen teollisuuskemikaalien tuotantoa varten. Kaasuturbiinien kehityksen, vapautuneiden sähkötuotantomarkkinoiden sekä kiristyneiden ympäristösäädösten vuoksi kaasutus on valtaamassa mm. uusia energiantuotantomarkkinoita. Yhteistuotannossa synteetikaasun käytön osuus energiantuotantoon tai polttoaineiden ja kemikaalien valmistukseen riippuu markkinoiden kysynnästä. Päämääränä on raaka-aineen käytön ja tuotteiden arvon maksimointi. Tällöin myös laitokseen investoitu pääoma on tehokkaammassa käytössä kuin pelkässä energiantuotannossa. Hyödyntämällä lähtöaineiden ja tuotteiden joustava käyttö yhteistuotanto tarjoaa huomattavasti taloudellisemman vaihtoehdon nykyisiin pelkkää energiaa tuottaviin laitoksiin verrattuna.

Energiantuotantoon voidaan käyttää paineistettuun kaasutukseen perustuvaa kombivoimalaitosprosessia (IGCC), jossa on yhdistetty kaasutus ja kaasun puhdistus sähköntuotantoon kaasu- ja höyryturbiinilla. IGCC on yksi tehokkaimmista ja puhtaimmista (verrannollinen maakaasukombivoimalaan) sähköntuotantomenetelmistä, joka on tarjolla em. monille vaihtoehtoisille kaasutuksen lähtöaineille. Sekä IGCC-tekniikan että tuotetun synteetikaasun muuntamista nestemäisiksi tuotteiksi on demonstroitu menestyksekkäästi mm. Yhdysvaltojen energiaministeriön tutkimusohjelmissa. Yhteistuotantoon tähtäävissä projekteissa on tarkoituksena muuntaa eri raaka-aineista peräisin oleva synteetikaasu polttoaineiksi ja kemikaaleiksi. Fischer-Tropsch-tekniikalla tuotetaan polttonesteitä korvaamaan bensiiniä ja dieselpolttoaineita. Synteetikaasun metanointiprosesseilla pyritään monikäyttöisen teollisuuskemikaalin, metanolin, tuotantoon. Jos jo käynnistyneissä hankkeissa todetaan, että tutkitut prosessikonseptit ovat sekä teknisesti että taloudellisesti toteutuskelpoisia, uusien yhteistuotantolaitosten rakentaminen ja käyttöönotto aloitettaneen. Yhteistuotantolaitosten rakentamisen seurauksena myös kasvihuonekaasujen päästöjä, erityisesti hiilidioksidipäästöjä, on mahdollista vähentää tehokkaasti.

Suomessa energian, polttonesteiden ja kemikaalien yhteistuotantolaitokset voisivat perustua maamme biomassavarantoihin, Happikaasutukseen perustuvasta biojalosteiden

tuotannosta on kuitenkin suuressa kokoluokassa vähän kokemuksia. Kehitystyötä on tehty lähinnä IGCC-tekniikan kehityksen yhteydessä. Suurelle alkoholitehtaalle näyttäisi selvitysten mukaan löytyvän sijoituspaikkoja vain isojen sellutehtaiden yhteydestä. Arvioidut tuotantokustannukset olisivat selvästi nykyisiä raakaöljyyn ja maakaasuun perustuvien bensiinin ja metanolin hintoja korkeammat. Siksi biopolttoaineiden käytölle tulisikin löytää lisäperusteita mm. ympäristöpäästöistä. Puunjalostusteollisuuden ohella myös muu prosessiteollisuus voisi olla yhteistuotantolaitosten sijoituspaikka.

5.3 Polttokennot ja hybridit

Energiantuotannossa korkealämpötilapolttokennot ja polttokennohybridit ovat käyttökelpoisia teknologioita 0,2–10 MW:n kokoluokan sähköntuotannossa ja yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa jo 10 vuoden kuluessa. Suurten polttokennovoimaloiden toteuttamisen aika on kauempana tulevaisuudessa. Kaupallistumispyrkimyksissä em. kokoluokassa pisimmällä ovat saksalais-amerikkalainen Siemens Westinghouse ja amerikkalainen Fuel Cell Energy ja sen saksalainen partneri MTU Friedrichshafen sekä muutamat japanilaiset tunnetut energiayhtiöt. Muita kehittäjiä, pienemmässä kokoluokassa, on myös runsaasti eri puolilla maailmaa. Kaikki merkittävimmät polttokennokehittäjät pyrkivät markkinoille aluksi maakaasukäyttöisillä tuotteilla. Tekniikoilla voidaan saavuttaa korkeampia sähköntuotannon hyötysuhteita pienemmin päästöin kuin nykyisillä tai kehitteillä olevilla kilpailevilla tekniikoilla, ts. polttomoottoreilla ja turbiineilla. Lyhyellä aikavälillä polttokennovalmistajien tavoitteena ovat lähinnä täsmämarkkinat. Energiantuotannon ympäristöystävällisyyttä korostavien julkisten energiaohjelmien seurauksena polttokennotekniikoiden markkinavetoisuus lisääntyy. Korkealämpötilakennojen ja polttokennohybridien T&K tulee kohdistaa polttokennomoduulien ja järjestelmän hinnan alentamiseen ja kennojen tehokkuuden nostoon.

Suomessa korkealämpötilapolttokennoihin kohdistuva tutkimus ja kehitys on ulkomaisten kennokehittäjien voimakkaiden kaupallistamispyrkimysten ja suomalaisen teollisuuden, kuten Wärtsilän, sekä Tekesin ja VTT:n kiinnostuksen seurauksena lisääntymässä. Koska korkealämpötilakennojen tutkimusta ja kehitystä on harjoitettu ulkomailla jo pitkään, lienee aluksi tarkoituksenmukaista siirtää tietotaitoa Suomeen, tehdä yhteistyötä ulkomaisten tahojen kanssa sekä pyrkiä kehittämään tekniikoita maamme olosuhteet huomioon ottaen.

Suomessa on kehitetty ja kehitetään voimakkaasti biomassan ja jätteen kaasutustekniikkaa energiantuotantoon. Suomen kannalta erityisen kiinnostava hieman pitemmän tähtäimen vaihtoehto on biomassan ja erilaisten jätteen kaasutuskaasun ja ehkä pyrolyysiöljyn käyttäminen myös korkealämpötilakennoissa ja polttokennohybrideissä. Optimaalisen kaasutustekniikan kehittäminen kennoa varten ja kaasutuskaasun puhdistus-

minen polttokennokäyttöön olisi tällöin yksi keskeinen tutkimus- ja kehityskohde. Toimintaan tehokkaasti polttokennot vaativat tuotetulta kaasulta sopivaa H₂/CO₂-koostumusta ja ultrapuhtautta mm. rikkiyhdisteiden suhteen. Tällä hetkellä kaasun puhdistuksen puhtaustavoitteena on turbiini- ja moottorikäyttö. Tarkastelujen mukaan kiinteäoksidipolttokenno on tehokkaampi kaasutuskompprosessin osana mm. sähkötehon kannalta. Ensimmäisissä kaasutuskaasusovelluksissa käytetään kuitenkin sulakarbonaattikennoja. Kaasutuskaasun käyttökokemukset näissä kennoissa ja kennojen toimintalämpötilan sopivuus puoltavat sulakarbonaattikennojen käyttöä. Kaasutuskaasulla hyvin toimivaa taloudellista kennostackia ei ole vielä kehitetty.

5.4 Hyötysuhde- ja hinta-arviot

Taulukossa 6 arvioidaan julkaisussa tarkasteltujen eri teknologioiden sähköhyötysuhteen ja investointikustannusten kehitystä. Esitetyt luvut ovat vain suuntaa-antavia, ja niissä ei ole otettu huomioon esimerkiksi kokoluokan vaikutusta.

Taulukko 6. Uusien sähköntuotantoteknologioiden hyötysuhde- ja hinta-arvioita.

Teknologia (polttoaine)	Kokoluokka MW	Hyötysuhde (%) Vuosi			Investointikustannus (\$)/kW _e Vuosi		
		2002	2010	2030	2002	2010	2030
		PFBC (hiili)	50–300	45	50	55	1 250
IGCC (hiili/öljy)	300–1 000	51	55	57	1 200	1 000	850
IGCC (biomassa)	30–150	47	50	53	1 900	1 500	1 200
IGCC (mustalipeä)	100–400	30	35	38	1 700	1 500	1 200
Kaasutus (biomassa ym.) -moottori	0,5–10	35	36	38	2 000	1 800	1 500
MCFC (CH ₄ , ym.)	0,2–50	47	55	58	8 000	1 500	1 000
SOFC (CH ₄ , ym.)	0,2–50	45	55	63	10 000	1 500	700
Hybridi FC/GT (CH ₄ , ym.)	0,3–70	58	70	75	>10 000	1 000	600
Kaasutus (biomassa ym.) -FC	0,5–10	45	50			?	2 000
IGFC (hiili)	300–1 000	60	62			?	
IGFC (biomassa ym.)	30–150	55				?	

Lähdeluettelo

Anon. 1998. Mustalipeän kaasutus etenee. Uudet ratkaisut lisäävät sähköntuotantoa. *Energia* 4–5/1998, s. 54–55.

Anon. 2000. Black liquor gasification will reduce emissions. *Chemical Engineering*. September 2000. S. 19, 21.

Anson, D., Decorso, M. & Parks, W. P. 1996. Catalytic combustion for industrial gas turbines. *Int. Journal of Energy Research*, Vol. 20, s. 693–711.

Benson, S. 2001. Fuel cells – use with coal and other solid fuels. IEA Coal Research CCC/47, London. 58 s.

Berg, M., Johansson, E. M. & Järås, S. G. 2000. Catalytic combustion of low heating value gas mixtures: comparison between laboratory and pilot scale tests. *Catalysis Today*, Vol. 59, s. 117–130.

Burch, R. 1997. Low NO_x options in catalytic combustion and emission control. *Catalysis Today*, Vol. 35, s. 27–36.

CPFC 2001. Coproduction of power fuels and Chemicals. September 2001. Topical Report No. 21. U.S. Department of Energy. 27 s.

CSDLPM 1999. Commercial-scale demonstration of the liquid phase methanol (LPMEOHTM) process. April 1999. Topical Report No. 11. U.S. Department of Energy. 24 s.

Dalla Betta, R. A. 1997. Catalytic combustion gas turbine systems: the preferred technology for low emissions electric power production and co-generation. *Catalysis Today*, Vol. 35, s. 12–135.

Energia-lehti 1997. Humberin 750 MW:n ykkösblokki vihitty käyttöön. No. 9/1997.

Energy News – Wärtsilä NSD:n asiakaslehti. Marraskuu 1999.

Erickson, D. & Brown, C. 1999. Operating experience with a gasification pilot project. *Tappi Journal*, Vol. 82, No. 9, s. 48–50.

ETV Joint Verification Statement, Environmental Technology Verification Program, 2001, U.S. EPA, Dec. 2000. Statement: http://www.epa.gov/etv/08/xonon_vs.pdf Report: <http://www.epa.gov/etv/verifrpt.htm#air>.

FCH. 2000. Fuel cell handbook. 5th ed. CD format. October 2000. Contract DE-AM26-99FT40575. U.S. DOE, National Energy Technology Laboratory (NETL). Morgantown, WV, Pittsburgh, PA.

FCT 2002. Fuel Cell Technologies Ltd. <http://www.fct.ca/>

FP5/EESD Projects. 2001. <http://www.cordis.lu/eesd/src/projects.htm>

Georgia-Pacific 2001. Big Island installs innovative emissions system as part of EPA's project XL. <http://www.gp.com/enviro/2000esrep/excellence/bigisland.html>. luettu 21.9.2001.

GWUA 2000. Gasification. Worldwide use and acceptance. January 2000. Contract DE-AMO1-98FE65271. U.S. DOE. 14 s.

Haines, M. R., Heidug, W. K., Li, K. J. & Moore, J. B. 2001. Progress with the development of CO₂ capturing solid oxide fuel cell. 7th Grove Fuel Cell Symp., London, September 2001.

HFC 2001. Hybrid Fuel Cell. Technology Overview, CD format. May 2001. Contract DE-AM26-99FT40575. U.S. DOE, National Energy Technology Laboratory (NETL). Morgantown, WV, Pittsburgh, PA.

Holt, N. A. H. 2001. Coal gasification research, development and demonstration: Needs and Opportunities. Paper presented at the Gasification Tech. Conf., San Francisco, CA, October 10, 2001. 16 s. + liitt. 26 s.

Hourfar, D., Hirschfelder, A., Haupt, G., Zimmermann, G., Romey, I., Oeljeklaus, G., Folke, C. & Semiao, V. 1999. Requirements on IGCC power plants from utilities's point of view. PowerGen Europe '99, Frankfurt, 1–3 June 1999. 18 s.

Jahkola, A. & Kurkela, E. 1995. Paineistetut poltto- ja kaasutusvoimalaitosprosessit. Julkaisussa: Raiko ym. (toim.). Poltto ja palaminen. Jyväskylä: International Flame Research Foundation, Suomen kansallinen osasto. S. 478–503.

Jahkola, A., Hulkkonen, S. & Saviharju, K. 1988. Power and heat generating PFBC combi processes and their potential markets in Finland. Julkaisussa: Korhonen, M. (toim.). Pressurized fluidized bed combustion and gasification power systems. Espoo: VTT Symposium 83. S. 9–36.

Johansson, E. M. & Järås, S. G. 1999. Circumventing fuel-NO_x formation in catalytic combustion of gasified biomass. *Catalysis Today*, Vol. 47, s. 359–367.

Jumppanen, P. 2002. Polttokennoliiketoiminnan kehitysnäkymät. Kansallinen polttokennoseminaari, VTT, Espoo, tammikuu 2002.

Kurkela, E. 2001. Review of Finnish biomass gasification technologies. OPET Report 4. Espoo, VTT Energy. 21 s.

Kurkela, E., Simell, P., Ståhlberg, P., Berna, G., Barbagli, F. & Haavisto, I. 2000. Development of novel fixed-bed gasification methods for biomass residues and agrobiofuels. Espoo: VTT. 42 s. + liitt. 1 s. (VTT Tiedotteita – Research Notes 2059.)

Larson, E. D. & Raymond, D. R. 1997. Commercializing black liquor and biomass gasifier/gas turbine technology. *Tappi Journal*, Vol. 82, No. 12, s. 50–55.

Lebas, E. & Martin, G. H. 2000. Development of a catalytic combustor for a biomass fueled gas turbine. Proc. ASME TURBOEXPO 2000, 8–11 May, 2000, Munich Germany. Paper: 2000-GT-0546.

McCarty, J. G. 2000. Durability of Xonon™ Combustion Catalyst Modules. Catalytica Energy Systems, Inc. Advanced Turbines Systems Annual Program Review Meeting Hilton Alexandria Mark Center Alexandria, Virginia, 5 Dec. 2000. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/00/ats00/mccarty.pdf>.

McCarty, J. G., Gusman, M., Lwe, D. M., Hildenbrand, D. L. & Lau, K. N. 1999. Stability of supported metal and supported metal oxide combustion catalysts. *Catalysis Today*, Vol. 47, s. 5–17.

McDonald. 1999. Industry's role in commercial gasification: the agenda 2020 perspective. *Tappi Journal*, Vol. 82, No. 12, s. 40–43.

McDonnell, V. G. 2001. Hybrid system introduction. Julkaisussa: First International Conference on Hybrid Power Systems UN/DOE HYBRID, CD format. 2001. Advanced Power and Energy Program. National Fuel Cell Research. University of California, Irvine, USA., toukokuu 2001.

McKeough, P. & Fogelholm, C.-J. 1991. Development of an integrated gasification-combined-cycle process (IGCC) for black liquor. Proc. Intl. Symp. On Energy and Environment. ASHRAE, Atlanta, Yhdysvallat. S. 197–205.

McKeough, P. J., Arpiainen, V., Mäkinen, T. & Solantausta, Y. 1995. Black liquor gasification: downstream processes, plant performances and costs. International Chemical Recovery Conference Preprints. Toronto 24–25 April 1995. TAPPI. Toronto, Kanada. S. B305–B312.

Mendez-Vigo, I., Garcia Pena, F., Karg, J. & Haupt, G. 2001. Puertollano IGCC Plant: Operating experience and potential for further technology development. Power-GEN EUROPE '01. Conf. Proc.

MTU Fuel Cell 2001. Power Point presentation. Vierailu: MTU Friedrichshafen, München, Saksa.

Mäkinen, T., Sipilä, K. & Simell, P. 1999. Esiselvitys biomassapohjaisten liikenne- polttonesteiden tuotanto- ja liiketoimintamahdollisuuksista. Luottamuksellinen loppu- raportti ENE1/25/99. 96 s.

NRE. 1999. New & Renewable Energy: Prospects in the UK for the 21st Century: Supporting Analysis. [http:// www.dti.gov.uk/renew/condic/](http://www.dti.gov.uk/renew/condic/).

Ohlström, M., Mäkinen, T., Laurikko, J. & Pipatti, R. 2001. New concepts for biofuels in transportation. Biomass-based methanol production and reduced emissions in advanced vehicles. Espoo: VTT. 94 s. (VTT Tiedotteita – Research Notes 2074.)

Palonen, J., Lundqvist, R. & Ståhl, K. 1996. IGCC technology and demonstration. Julkaisussa: Sipilä, K. & Korhonen, M. (toim.). Power production from biomass II with special emphasis on gasification and pyrolysis R&DD. Espoo: VTT Symposium 164. S. 41–54.

Patel, P. & Ghezel-Ayagh, H. 2001. Hybrid systems under DOE Vision 21 Program. Proc. First International Conference on Hybrid Power Systems UN/DOE HYBRID, CD format. 2001. Advanced Power and Energy Program. National Fuel Cell Research. University of California, Irvine, USA, May 2001.

Pruschek, R., Haupt, G., Zimmermann, G. & Ullrich, N. 1999. Are integrated gasification combined-cycle power plants competitive? VGB PowerTech, Vol. 79, No. 5, s. 56–60.

Rao, A. 2001. Advanced Central Power Systems. Proc. International Colloquium and Exhibit on Environmentally Preferred Advanced Energy Generation, CD format. 2001. Advanced Power and Energy Program. National Fuel Cell Research. University of California, Irvine, May 2001.

Rastler, D. 2001. Fuel cells for a distributed power market. Seventh Grove Fuel Cell Symposium. London, September 2001.

Salo, K. & Keränen, H. 1995. Biomass IGCC. Julkaisussa: Sipilä, K. & Korhonen, M. (toim.). Power production from biomass II with special emphasis on gasification and pyrolysis R&DD. Espoo: VTT Symposium 164. S. 23–40.

Samuelson, S. 2001. Hybrid system introduction. Proc. First Internat. Conf. on Hybrid Power Systems UN/DOE HYBRID, CD format. 2001. Advanced Power and Energy Program. National Fuel Cell Research. University of California, Irvine, May 2001.

Silicon Valley Business Ink 2001: Graebner, L. Clean power in a box: Catalytica Energy Systems secures deals with GE, Kawasaki for a cleaner way to produce electricity. March 30, 2001, page 1. <http://svbizink.com/headlines/article.asp?aid=1352&iid=171>.

Silvonen, R. 2001. Katalyyttinen poltto jyrää liuotinpäästöjen puhdistukseen. <http://www.ehovoc.fi/Ehovoc.pdf>.

Simbeck, D. & Johnson, H. 2001. World gasification survey: Industry trends & developments. Gasification Technologies 2001 Conf., San Francisco, CA.

Sipilä, K. 1993. New power production technologies: various options for biomass and cogeneration. Bioresource Technology, Vol. 46, s. 5–12.

Solantausta, Y. & Huotari, J. 2000. Power production from wood – comparison of the Rankine cycle to concepts using gasification and fast pyrolysis. Part 3. 46 s. Julkaisussa: Solantausta, Y., Podesser, E., Beckman, D., Östman, A. & Overend, R. P. IEA Bioenergy Task 22: Techno-economic assessment for bioenergy applications 1998–1999. Final report. Espoo: VTT. 241 s. (VTT Tiedotteita – Research Notes 2024.)

Solantausta, Y., Mäkinen, T., Kurkela, E. & McKeough, P. 1994. Performance of cogeneration gasification combined-cycle power plants employing biomass as fuel. Proc. Conf. Advances in Thermochemical Biomass Conversion. Vol. 1. Ed. Bridgwater, A.V. Blackie Academic & Professional. Glasgow, Iso-Britannia. S. 476–494.

Stigsson, L. 1998. Chemrec™ black liquor gasification. 1998 International Chemical Recovery Conference. 674/TAPPI Proceedings.

Strakey, J. P. 2001. U.S. DOE Fossil Energy Fuel Cell Program. Proc. First Internat. Conf. on Hybrid Power Systems UN/DOE HYBRID, CD format. 2001. Advanced Power and Energy Program. National Fuel Cell Research. University of California, Irvine, May 2001.

Tam, P., Mazz, P., Cheng, K. & Edwards, W. 1999. Forest sector table: Assessment of gasification technologies and prospects for their commercial application. Levelton Engineering Ltd. http://www.nccp.ca/NCCP/pdf/Gasification_Study.pdf

Thevenin, P. O., Ersson, A. G., Kusar, H. M. J., Menon, P. G. & Järås, S. G. 2001. Deactivation of high temperature combustion catalysts. Applied Catalysis A: General 212, s. 189–197.

U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. Tidd PFBC Demonstration Project. A DOE Assessment. Morgantown, WV, 2001. 36 s.

Veyo, S. E. 2001. Hybrid Systems Development by The Siemens Westinghouse Power Corporation. Proc. First Internat. Conf. on Hybrid Power Systems UN/DOE HYBRID, CD format. 2001. Advanced Power and Energy Program. National Fuel Cell Research. University of California, Irvine, May 2001.

Wilén, C. & Kurkela, E. 1997. Gasification of biomass for energy production. State of technology in Finland and global market perspectives. Espoo: VTT. 64 s. (VTT Tiedotteita – Research Notes 1842.)

Yee, D. K, Lundberg, K & Weakley, C. K. 2000. Field demonstration of a 1.5 MW industrial gas turbine with a low emissions catalytic combustion system. Proc. ASME TURBOEXPO 2000, Munich, 8–11 May 2000. Paper 2000-GT-0088.



Tekijä(t) Hepola, Jouko & Kurkela, Esa			
Nimeke Energiantuotannon tehostaminen fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa			
Tiivistelmä <p>Selvityksen kohteena olivat kaasutus- ja polttotekniikat, yhdistetyt energian, polttoaineiden ja kemikaalien tuotantovaihtoehdot, korkealämpötilapolttokennot ja polttokennohybridit.</p> <p>Paineistetun leijukerospolton potentiaali ja markkinanäkymät ovat heikentyneet mm. perinteisen höyryvoimalan kehityksen, maakaasukombitekniiikan hyvän kilpailukyvyyn, kiristyneiden päästönormien sekä kaasutuskombitekniiikan kehitysnäkymien myötä. Hiilen paineistettuun pölypolttoon perustuva kombivoimalaitosprosessin kehitys on vielä alkuvaiheessa. Toistaiseksi maailmalla rakennetut happikaasutukseen perustuvat IGCC-laitokset ovat olleet luonteeltaan demonstraatiolaitoksia. IGCC-tekniikan oletetaan kaupallistuvan ensin öljynjalostamoihin integroiduissa pohjaöljyn kaasutussovelluksissa ja sitten kivihiilikäyttöisissä lauhdevoimaloissa. Ilmakaasutukseen perustuvalla, ns. yksinkertaistetulla kaasutuskombiprosessitekniikalla on toistaiseksi toteutettu vain yksi koelaitos, jonka koekäyttö saatiin päätökseen vuonna 1999. Teknisesti prosessi on valmis myös suuren kokoluokan demonstrointiin.</p> <p>Kehitteillä olevista mustalipeän kaasutusprosesseista teknisesti pisimmällä on Chemrec-prosessi. Ilmanpaineinen prosessi on demonstroitu ja paineistetun prosessin demonstrointi on käynnistymässä sekä Ruotsissa että Yhdysvalloissa. Mustalipeän kaasutus tarjoaisi mahdollisuuden nostaa sellutehtaiden energiantuotannon rakennusastetta huomattavasti. Katalyyttisen polton odotetaan kaupallistuvan aluksi maakaasua käyttävissä pienissä kaasuturbiineissa ja bensiiniä käyttävissä mikrotrubiineissa. Katalyyttinen poltto voi olla vaihtoehto myös biomassan kaasutuskasun poltossa syntyvän polttoaineperäisen NO_x:n eliminoimisessa. Moottorivoimaloissa voidaan käyttää myös kiinteistä polttoaineista valmistettua kaasutuskasua tai pyrolyysiöljyä. Tekniikan kaupallistumisen esteenä pienvoimalasovelluksissa ovat olleet tekniset ongelmat, erityisesti kaasun puhdistukseen ja öljyn laatuun liittyvät kysymykset.</p> <p>Kaasutustekniikalla tuotettua synteetikaasua voidaan käyttää erilaisten kaasumaisten tai nestemäisten polttoaineiden ja kemikaalien valmistamiseen sekä energiantuotantoon. Hyödyntämällä lähtöaineiden ja tuotteiden joustavan käytön yhteistuotanto tarjoaa huomattavasti taloudellisemman vaihtoehdon nykyisiin, pelkkää energiaa tuottaviin laitoksiin verrattuna. Yhdysvaltojen yhteistuotantoon tähtäävissä projekteissa on useita hankkeita, joiden tarkoituksena on muuntaa eri raaka-aineista peräisin oleva synteetikaasu polttoaineiksi ja kemikaaleiksi. Fischer-Tropsch-tekniikalla on tarkoitus tuottaa polttonesteitä korvaamaan bensiiniä ja dieselpolttoaineita. Synteetikaasun metanointiprosesseilla pyritään monikäyttöisen teollisuuskemikaalin, metanolin, tuotantoon. Jos jo käynnistyneissä hankkeissa todetaan, että tutkitut prosessivaihtoehdot ovat sekä teknisesti että taloudellisesti toteutuskelpoisia, uusien yhteistuotantolaitosten rakentaminen ja käyttöönotto aloitettaneen. Yhteistuotantolaitosten rakentamisen seurauksena on mahdollista vähentää tehokkaasti myös kasvihuonekaasujen päästöjä, erityisesti hiilidioksidipäästöjä. Suomessa energian, polttonesteiden ja kemikaalien yhteistuotantolaitokset voisivat perustua maamme biomassavarantoihin. Happikaasutukseen perustuvasta biojalosteiden tuotannosta on kuitenkin suuressa kokoluokassa vähän kokemuksia. Puunjalostusteollisuuden ohella myös muu prosessiteollisuus voisi olla sopiva sijoituspaikka yhteistuotantolle.</p> <p>Korkealämpötilapolttokennot ja polttokennohybridit ovat 0,2–10 MW:n kokoluokan sähköntuotannossa ja yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa käyttökelpoisia teknologioita jo kymmenen vuoden kuluessa. Suurten polttokennovoimaloiden toteuttamisen aika on kauempana tulevaisuudessa. Kaikki merkittävimmät polttokennokehittäjät pyrkivät markkinoille aluksi maakaasukäyttöisillä tuotteilla. Tekniikoilla voidaan saavuttaa korkeampia sähköntuotannon hyötysuhteita pienemmin päästöin kuin nykyisillä tai kehitteillä olevilla kilpailevilla tekniikoilla, ts. polttomoottoreilla ja turbiineilla. Lyhyellä aikavälillä polttokennovalmistajien tavoitteena ovat lähinnä täsmämarkkinat. Korkealämpötilakennon ja polttokennohybridien tutkimus ja kehitys kohdistuvat polttokennomoduulien ja järjestelmän hinnan alentamiseen ja kennojen tehokkuuden nostoon. Suomessa korkealämpötilapolttokennoihin kohdistuva tutkimus ja kehitys on kotimaisen teollisuuden, Tekesin ja VTT:n kiinnostuksen seurauksena lisääntymässä. Suomen kannalta erityisen kiinnostava, hieman pitemmän aikavälin vaihtoehto on biomassan ja erilaisten jätteiden kaasutuskasun käyttäminen korkealämpötilakannoissa ja polttokennohybrideissä. Ensimmäiset kaasutuskasusovellukset toteutettaneen sulakarbonaattikannoilla. Näillä on jo saatu kokemuksia kaasutuskasun käytöstä. Kennojen toimintalämpötila on myös sopivampi nykyisiin kiintoaksidikenttiin verrattuna.</p>			
Avainsanat energy production, pressurized combustion, gasification, coal, black liquor, IGCC, coproduction, fuel cells, synthesis gas, catalytic combustors			
Toimintayksikkö VTT Prosessit, Biologinkuja 3–5, PL 1601, 02044 VTT			
ISBN 951–38–6069–8 (nid.) 951–38–6070–1 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinumero N1SU00270	
Julkaisu-aika Syyskuu 2002	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 65 s.	Hinta B
Projektin nimi Climtech		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (Tekes)	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235–0605 (nid.) 1455–0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
 Phone internat. +358 9 4561
 Fax +358 9 456 4374

Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2155
 VTT-TIED-2155

Author(s) Hepola, Jouko & Kurkela, Esa			
Title Advanced energy production based on fossil and renewable fuels			
Abstract <p>The objects of this survey were gasification and combustion techniques, coproduction alternatives of energy, fuels and chemicals, as well as high-temperature fuel cells and hybrid fuel cell systems.</p> <p>The potential and market outlook of pressurised fluidised-bed combustion have been declined, i.a., due to the good competitiveness of natural gas combined-cycle technology, tightening emission standards, and the development outlook for gasification combined-cycle technology. Development of a combined-cycle power plant process based on pressurised pulverised combustion of coal is still at an initial stage. The oxygen based IGCC plants in the world have so far been demonstration plants. The IGCC technology is expected to commercialise first in residual oil gasification applications integrated to oil refineries and then in coal powered condensed power plants. In addition, one biomass-based IGCC plant has been constructed. This process is so called simplified IGCC, utilising pressurised air blown gasification and hot gas cleaning. The test trials of this plant were completed in 1999. The process is technically feasible also for large-scale demonstration. Gasification technology has also been developed for black liquor. The ChemRec black liquor gasification process is technically the most advanced process at the moment. The atmospheric process has been demonstrated and the pressurised process demonstration is about to start in Sweden and in USA. In utilising biomass fuels or black liquor, the IGCC process offers the possibility to significantly increase the ratio of electrical power to thermal power with combined cycle.</p> <p>Synthesis gas produced by gasification technology can be used for producing different gaseous or liquid fuels and chemicals and for energy production. In a flexible use of feedstocks and products this coproduction method offers a significantly more feasible alternative to present energy production plants. There are several projects underway in the United States, with a target to convert synthesis gas produced from different raw materials to fuels and chemicals. The aim of Fischer-Tropsch technology is to produce liquid fuels for replacing gasoline and diesel fuels. In methanation processes of synthesis gas, the aim is to produce a versatile industrial chemical, methanol. If the projects underway confirm that the process alternatives are both technically and economically feasible, the construction and commissioning of these combined production plants will be started. These plants would also facilitate to reduce efficiently greenhouse gas emissions, especially carbon dioxide. In Finland, the coproduction of energy, fuels and chemicals could be based on biomass resources. However, there is rather little experience available from large-scale production of biomass products, based on oxygen gasification. Wood-processing industries and also other process industries could be suitable sites for coproduction.</p> <p>High-temperature fuel cells and hybrid fuel cell systems will be available technologies in power and CHP production of 0.2–10 MW size range within the next ten years, while large scale fuel cell power plants will not be constructed until in the more remote future. All significant fuel-cell developers will first launch natural gas based products to the market. These technologies enable to reach a higher efficiency of power production at lower emissions than the present technologies or those under development, i.e., internal-combustion engines and turbines. In the short term, the fuel cell manufacturers aim at specified marketing. Research and development of high-temperature cells and hybrid fuel cells focus on reducing the price of fuel cell modules and systems and on increasing the power density of the cells. In Finland, research and development of high-temperature fuel cells is increasing due to the interest of domestic industries, the National Technology Agency of Finland, and VTT. An alternative of special interest to Finland, on a longer term, is the use of gasification gas of biomass and different wastes in high-temperature cells and hybrid fuel cells. The first gasification applications will probably employ molten carbonate fuel cells. These cells have been tested already with gasification gas. The operation temperature of these cells is also more suitable than that of the solid oxide cells.</p>			
Keywords energy production, pressurized combustion, gasification, coal, black liquor, IGCC, coproduction, fuel cells, synthesis gas, catalytic combustors			
Activity unit VTT Processes, Biologinkuja 3–5, P.O.Box 1601, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6069-8 (soft back ed.) 951-38-6070-1 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number N1SU00270	
Date September 2002	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 65 p.	Price B
Name of project Climtech		Commissioned by The National Technology Agency (Tekes)	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	

VTT TIEDOTTEITA – RESEARCH NOTES

VTT PROSESSIT – VTT PROSESSER –VTT PROCESSES

- 2127 Vuori, Seppo, Lautkaski, Risto, Lehtilä, Antti & Suolanen, Vesa. Katsaus eri energiantuotantomuotojen ympäristövaikutuksiin. 2002. 87 s.
- 2131 Lehikoinen, Jarmo & Olin, Markus. Modelling the transport in the porous layer of oxide films formed on material surfaces in nuclear power plants. Model extension to more general conditions. 2002. 23 p. + app. 1 p.
- 2132 Carlsson, Torbjörn. Survey of methods for the study of the bentonite microstructure and its relevance to hydration. 2002. 29 p.
- 2133 Vuorinen, Ulla & Carlsson, Torbjörn. XAS methods in understanding chemical processes relevant to nuclear waste disposal. A literature review. 2002. 19 p.
- 2135 Ristolainen, Ilari. Voimalaitos- ja teollisuusrengasverkon maasulun paikannus. 2002. 19 s.
- 2137 Kumpulainen, Heikki, Peltonen, Terttu, Koponen, Ulla, Bergelin, Mikael, Valkiainen, Matti & Wasberg, Mikael. In situ voltammetric characterization of PEM fuel cell catalyst layers. 2002. 28 p. + app. 4 p.
- 2138 Ranta, Jussi & Wahlström, Margareta. Tuhkien laatu REF-seospoltossa. 2002. 53 s. + liitt. 13 s.
- 2139 Lohiniva, Elina, Sipilä, Kai, Mäkinen, Tuula & Hietanen, Lassi. Jätteiden energiakäytön vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin. 2002. 119 s.
- 2141 Laine-Ylijoki, Jutta, Wahlström, Margareta, Peltola, Kari, Pihlajaniemi, Miina & Mäkelä, Esa. Seospolton tuhkien koostumus ja ympäristölaadunvarmistusjärjestelmä. 2002. 51 s. + liitt. 59 s.
- 2142 Tuhkanen, Sami. Jätehuollon merkitys Suomen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Kaatopaikkojen metaanipäästöt ja niiden talteenotto. 2002. 46 s.
- 2143 Meinander, Harriet & Varheenmaa, Minna. Clothing and textiles for disabled and elderly people. 2002. 58 p. + app. 4 p.
- 2145 Helynen, Satu, Flyktman, Martti, Mäkinen, Tuula, Sipilä, Kai & Vesterinen, Pirkko. Bioenergian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. 2002. 110 s. + liitt. 2 s.
- 2153 Hänninen, Seppo & Lehtonen, Matti. Earth fault distance computation with fundamental frequency signals based on measurements in substation supply bay. 2002. 40 p.
- 2155 Hepola, Jouko & Kurkela, Esa. Energiantuotannon tehostaminen fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa. 2002. 65 s.

Tätä julkaisua myy
VTT TIETOPALVELU
PL 2000
02044 VTT
Puh. (09) 456 4404
Faksi (09) 456 4374

Denna publikation säljs av
VTT INFORMATIONSTJÄNST
PB 2000
02044 VTT
Tel. (09) 456 4404
Fax (09) 456 4374

This publication is available from
VTT INFORMATION SERVICE
P.O.Box 2000
FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. + 358 9 456 4404
Fax + 358 9 456 4374