



Tulevaisuuden kaupunkivoimala

Ulla-Maija Mroueh & Torsti Loikkanen
VTT Kemiantekniikka



VALTION TEKNILLINEN TUTKIMUSKESKUS
ESPOO 1998

ISBN 951-38-5303-9 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5304-7 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1998

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, telekopio 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, telefax 456 4374

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

VTT Kemiantekniikka, Ympäristötekniikka, Betonimiehenkuja 5, PL 1403, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7022

VTT Kemiteknik, Miljöteknik, Betongblandargränden 5, PB 1403, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7022

VTT Chemical Technology, Environmental Technology,
Betonimiehenkuja 5, P.O.Box 1403, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7022

Tekninen toimitus Leena Ukoski

Libella Painopalvelu Oy, ESPOO 1998

Mroueh, Ulla-Maija, Loikkanen, Torsti. Tulevaisuuden kaupunkivoimala [City power plant of tomorrow]. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1907. 98 s.

Avainsanat electric power plants, urban areas, environmental effects, environmental protection

TIIVISTELMÄ

Tavoitteena oli selvittää jatkotutkimuksia varten, miten lähitulevaisuuden kaupunkivoimalan ympäristövaikutuksia voidaan tarkastella systemaattisesti osana laitoksen suunnittelua ja toiminnan ohjausta. Tätä varten selvitettiin kaupunkivoimaloille asetettuja ympäristö- ja toimintaympäristövaatimuksia ja niiden kehitystä lähitulevaisuudessa, käytävissä olevia kiinteiden polttoaineiden tai maakaasun käyttöön perustuvia teknisiä ratkaisuja sekä ympäristöhaittojen vähentämiseen ja ympäristönhallinnan menettelyjen soveltamiseen liittyviä kehitystarpeita. Lisäksi verrailtiin alustavasti sähkön ja lämmön yhteistuotantoon soveltuvia, kaupunkialueelle sijoitettavissa olevia laitostyyppisiä, joiden edellytettiin olevan kehitystasoltaan lähitulevaisuudessa käyttöön otettavia.

Tutkimus perustuu koti- ja ulkomaiseen kirjallisuuteen, tutkimusraportteihin ja keskusteluihin tutkimuksen johtoryhmään kuuluneiden yritysten edustajien sekä muiden asiantuntijoiden kanssa. Energiantuotannon ympäristötutkimuksen nykytilannetta ja tulevia tutkimustarpeita arvioitiin erityisesti päättymässä olevan Energia- ja ympäristöteknologian tutkimusohjelman SIHTI 2 tulosten perusteella.

Käytävissä olevat tuotanto- ja ympäristönsuojelutekniset vaihtoehdot ovat kaupunkivoimaloissa suurelta osin samoja kuin energiantuotannossa yleensäkin. Myös ympäristövaikutusten arvioinnin ja hallinnan menettelytavat ovat periaatteeltaan samoja. Sijointi asutuksen keskelle asettaa kuitenkin erityisvaatimuksia haitattomuudelle, riskittömyydelle ja yleiselle hyväksyttävyydelle. Nämä seikat ja kaupunkirakenteen sijoituspaikkavalinnalle asettamat rajoitukset vähentävät käytävissä olevien polttoaine- ja tuotantoteknisten vaihtoehtojen määrää ja edellyttävät ympäristötekniisesti edistyneitä, mutta mahdollisimman riskittömiä vaihtoehtoja. Myös laitosten ympäristön hallinnan tason on oltava korkea, minkä vuoksi laitosten olisi aktiivisesti osallistuttava hallintamenettelyjen kehittämiseen.

Tuleville kaupunkivoimalaratkaisuille ei voida luoda yleistä mallia, koska lähtökohdat ovat aina paikallisia. Erityisen tärkeää onkin kehittää menettelyjä, joissa pystytään yhdistämään ympäristötavoitteet laitokselle asetettaviin teknisiin, taloudellisiin ja toiminnallisiin tavoitteisiin. Näiden lisäksi olisi pystyttävä ottamaan huomioon myös yhteiskunnallinen hyväksyttävyys ja tulevan kehityksen vaatimukset. Toisaalta olisi myös kehitettävä päästöjen käsittelyä siten, että lopputuloksena saadaan hyödyntämiskelpoisia tuotteita ja mahdollisimman vähän loppusijoitettavaa jätettä. Kehitysalueita ovat myös mm. pienhiukkas-, typpioksiduuli- ja elohopeapäästöjen vähentäminen sekä integroidut päästöjen vähentämismenettelyt.

Mroueh, Ulla-Maija, Loikkanen, Torsti. Tulevaisuuden kaupunkivoimala [City power plant of tomorrow]. Espoo 1998, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1907. 98 p.

Keywords electric power plants, urban areas, environmental effects, environmental protection

ABSTRACT

The aim of this preliminary study is to create a basis for further studies on environmental, technical, economic and social demands and factors connected with the planning and operational management of city power plants, and for a systematic examination of environmental impacts of various energy production technologies. Environmental and operational-environmental demands, development trends of these demands in near future, technological solutions available for the generation of energy from solid fuels or natural gas, and the need to develop emission reduction technologies and environmental management systems are discussed in the report. In addition, production technologies suitable for the co-production of heat and electricity in big cities of the near future were compared on the basis of the most significant operational and environmental qualities.

The study is based on domestic and foreign literature, research reports and discussions with both representatives of the companies that took part in the steering group of the project and other experts. The present state of research on energy and the environment, as well as future research needs are assessed especially on the basis of the results of SIHTI 2 energy and environment research program.

The alternative production and environmental technologies available are not different from energy production technologies, in general. Also the procedures of environmental impact assessment and environmental management are fundamentally the same. The location of the plant amidst residential areas means, however, that the requirements for minimisation of environmental hazards and risks, and the requirements for common acceptability will be strict. The number of potential fuels and production technology alternatives will be reduced by these circumstances, and by the fact that the selection of the plant site is tightly constrained by the zoning system. Because of these facts, environmentally advanced but, at the same time, low-risk alternatives will be required. Also a high quality environmental management system will be essential, and therefore the companies should be active in the development of environmental management methods.

The development of a model power plant that is suitable for all the cities of tomorrow is not possible, because the needs and targets are always dependent on local conditions. Therefore it is extremely important to develop methods and procedures that combine the environmental targets with the technical, economical and operational targets of the production plant. In addition, the social acceptability and requirements of future development must be considered. On the other hand, emission treatment technologies should be further developed towards the production of useful by-products instead of landfill waste. Also methods for the reduction of aerosol, nitrous oxide and mercury emissions, as well as the development of technologies for integrated emission treatment are included in the priority areas.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on osa Teknologian kehittämiskeskus TEKESin rahoittamaa energia- ja ympäristötekniikan tutkimusohjelmaa SIHTI 2. Tutkimuksen rahoittajina olivat myös Helsingin Energia, Espoon Sähkö Oy, Foster Wheeler Energia Oy ja Vantaan Energia Oy. Tavoitteena oli selvittää lähitulevaisuuden kaupunkivoimaloille asetettavia ympäristö- ja toimintaympäristövaatimuksia, käytettävissä olevia teknisiä ratkaisuja ja ympäristöhaittojen vähentämismahdollisuuksia. Tutkimus on esiselvitys, jossa arvioitiin myös ympäristötekniikkaan, laitosratkaisujen optimointiin ja integroidun ympäristöhallinnan menettelyjen kehittämiseen liittyviä tutkimustarpeita.

Tutkimus on tehty VTT Kemiantekniikassa. Raportin on pääosin kirjoittanut erikoistutkija Ulla-Maija Mroueh. Erikoistutkija Torsti Loikkanen on kirjoittanut kohdat 3.1.2, 9.1, 9.4 ja 9.5. Kohdan 9.5 kirjoittamiseen on osallistunut myös tutkija Helena Mälkki.

Tutkimuksen johtoryhmään ovat osallistuneet puheenjohtajana toimistopäällikkö Matti Seppä Helsingin Energiasta sekä dipl.ins. Timo Ahonen Espoon Sähkö Oy:stä, toimistopäällikkö Jouko Helenius Vantaan Energiasta, tutkimuspäällikkö Matti Hiltunen Foster Wheeler Energia Oy:stä, vanhempi tutkija Juhani Isaksson Foster Wheeler Energia Oy:stä, tutkimuspäällikkö Kari Larjava VTT Kemiantekniikasta ja toimistopäällikkö Tapio Öhman Helsingin Energiasta. Tekijät kiittävät johtoryhmää tutkimuksen aktiivisesta ohjauksesta ja avunannosta tutkimuksen toteuttamisessa. Kiitokset myös kaikille tutkimukseen osallistuneiden laitosten edustajille ja muille asiantuntijoille, jotka ovat keskusteluin ja kommentein myötävaikuttaneet raportin valmisteluun.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
ALKUSANAT	6
SISÄLLYSLUETTELO	7
LYHENTEITÄ JA TERMEJÄ	10
1 JOHDANTO	12
1.1 Tausta ja tavoitteet.....	12
1.2 Rajaukset	13
2 KAUPUNKIVOIMALARATKAISUILLE ASETETTAVAT VAATIMUKSET.....	14
2.1 Yleiset lähtökohdat voimalasuunnittelussa	14
2.2 Yhdistetyn sähkön- ja kaukolämmöntuotannon asettamat vaatimukset ..	14
2.3 Sijoituspaiakan asettamat vaatimukset	14
3 KEHITYSSUUNNAT JA -ENNUSTEET.....	16
3.1 Ympäristövaatimukset.....	16
3.1.1 Hallinnollinen ohjaus.....	16
3.1.2 Ympäristökustannukset ja taloudellinen ohjaus	20
3.1.3 Informaatio-ohjaus.....	23
3.2 Toimintaympäristön kehitys.....	24
3.2.1 Kulutuksen kehitys.....	24
3.2.2 Energiapolitiikan kehitys	24
3.2.3 Polttoaineiden saatavuus ja polttoainekustannukset	25
3.2.4 Toimintaympäristön muutokset	27
3.2.5 Arvojen ja asenteiden muutokset.....	28
4 TUOTANTOVAIHTOEHDOT.....	30
4.1 Hiilen pölypoltto.....	30
4.1.1 Tekniikan kehitystaso.....	30
4.1.2 Päästöt ja päästöjen käsittelyn sivutuotteet	31
4.1.3 Ympäristö- ja turvallisuusriskit.....	32
4.1.4 Kehitystarpeet ja käynnissä olevat tutkimukset	32
4.2 Ilmanpaineinen kiertoleijupoltto	33
4.2.1 Tekniset ominaisuudet ja kehitystaso	33
4.2.2 Päästöjen käsittelymenetelmät ja saavutettavat päästötasot.....	33
4.2.3 Jätteet ja niiden sijoitettavuus	34
4.2.4 Kehitystarpeet	35
4.3 Hiilen paineistettu leijupoltto.....	35
4.3.1 Tekniset ominaisuudet ja kehitystaso	35

4.3.2	Päästöt ja jätteet	36
4.3.3	Kehitystarpeet ja suunnat.....	37
4.4	Hiilen ja biopolttoaineiden kaasutus	38
4.4.1	Päästöjen käsittely.....	40
4.5	Maakaasukombilaitos.....	41
4.5.1	Tekniset ominaisuudet ja kehitystaso	41
4.5.2	Päästöt ja niiden käsittely.....	42
4.5.3	Kustannukset.....	42
4.5.4	Kehitystarpeet	42
4.6	Sekapoltto.....	42
4.6.1	Jätteiden ja hiilen yhdistetty poltto	42
4.6.2	Puun ja hiilen yhdistetty poltto	45
4.7	Olemassa olevien laitosten kehittäminen.....	45
4.8	Ostosähkö ja erillinen lämmöntuotanto	46
5	POLTTOAINEIDEN VASTAANOTTO JA VARASTOINTI	46
6	PÄÄSTÖT JA NIIDEN KÄSITTELY	48
6.1	Päästöt ympäristöön	48
6.1.1	Hiukkaset	48
6.1.2	Rikki ja typpi	49
6.1.3	Kasvihuonekaasut	50
6.1.4	Kaasumaiset metallit ja orgaaniset epäpuhtaudet	51
6.2	Päästöjen käsittely- ja vähennystekniikat.....	52
6.2.1	Hiukkasmaiset päästöt	52
6.2.2	Rikki ja typpi	52
6.2.3	Kasvihuonekaasut	54
6.2.4	Elohopea ja muut kaasumaiset raskasmetallit	54
6.3	Jätteet ja niiden käsittely	55
6.4	Kehitystarpeet	56
6.5	Ympäristö- ja turvallisuusriskit.....	56
7	ESIMERKKEJÄ NYKYISISTÄ KAUPUNKIVOIMALARATKAISUISTA.....	57
7.1	Helsinki	57
7.1.1	Toimintaympäristö ja tuotantolaitokset	57
7.1.2	Päästöt ja jätteet	58
7.2	Tukholma	58
7.2.1	Ruotsin energiapolitiikan tavoitteet.....	58
7.2.2	Toimintaympäristö ja tuotantolaitokset	58
7.2.3	Värtanin PFBC-laitos.....	60
7.2.4	Tulevat tavoitteet ja toteutettavat toimet	61
7.3	Kööpenhamina	62
7.3.1	Kehityssuunnat Tanskassa	62
7.3.2	Toimintaympäristö ja tuotantolaitokset	62
7.3.3	Esimerkki – Avedore	63
7.4	Kalundborg.....	64
7.5	Esimerkkejä Hollannista	66

7.5.1	Kehityssuunnat Hollannissa.....	66
7.5.2	Hemweg 08, Amsterdam	67
7.5.3	Utrecht, Lage Weide 6	67
7.6	Wien.....	68
7.6.1	Kehityssuunnat Itävallassa.....	68
7.6.2	Toimintaympäristö ja tuotantolaitokset	68
7.7	Yhteenveto	69
8	TUOTANTOVAIHTOEHTOJEN VERTAILU	71
8.1	Tekniset ominaisuudet	71
8.2	Pääoma- ja käyttökustannukset	71
9	INTEGROITU YMPÄRISTÖNHALLINTA JA PÄÄTÖKSENTEKO	75
9.1	Johdanto	75
9.2	Nykyinen tilanne kaupunkien energiantuotantolaitoksissa	77
9.3	Ympäristövaikutusten arviointi.....	78
9.3.1	Nykytilanne.....	78
9.3.2	Esimerkkejä muualta.....	80
9.3.3	YVA-prosessin soveltaminen kaupunkivoimalakohteeseen.....	82
9.4	Ympäristönsuojelun yhdyttyä ohjaus	83
9.4.1	IPPC-direktiivi	83
9.4.2	Ympäristötalous ja taloudellinen ohjaus.....	84
9.5	Yritysten vapaaehtoiset toimet ja päätöksentekoa tukevat menetelmät ..	86
9.5.1	Ympäristöhallintajärjestelmät.....	87
9.5.2	Ympäristömerkit	87
9.5.3	Ympäristötilinpito, laskentatoimi ja investointianalyysit	87
9.5.4	Energiakysymysten elinkaariarviointi.....	88
9.5.5	Muut päätöksentekoa tukevat menetelmät.....	88
10	KESTÄVÄLLE KAUPUNKIVOIMALALLE ASETETTAVAT VAATIMUKSET	90
10.1	Tekninen ja taloudellinen toimivuus.....	90
10.2	Yhteiskunnan ohjauksen asettamat vaatimukset.....	90
10.3	Sijaintiympäristön asettamat vaatimukset ja niiden arviointi	91
10.4	Vaatimusten arviointiin liittyvät epävarmuudet.....	92
10.5	Vaihtoehtojen vaatimusten mukaisuuden arviointi.....	92
11	ARVIO TUTKIMUSTARPEISTA	93
11.1	Tuotantotekniikat	93
11.2	Päästöjen ja jätteiden käsittely	93
11.3	Integroitu ympäristönhallinta ja päätöksenteko	94
	KIRJALLISUUS	96

LYHENTEITÄ JA TERMEJÄ

ECE	Euroopan talouskomissio (Economic Commission of Europe)
VOC	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (Volatile Organic Compounds)
PAH	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)
POP	Pysyvät orgaaniset yhdisteet (Persistent Organic Compounds)
PCDD/PCDF-yhdisteet	Polyklooratut dioksiinit ja furaanit (Polychlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans)
TE	Toksisuusekvivalentti (Toxic Equivalent), ekvivalenttimuunnoksia käytetään laskettaessa dioksiiniyhdisteiden kokonaismyrkkyyvaikutusta, muita dioksiineja ja furaaneja verrataan 2,3,7,8-tetraklooridibentsodioksiiniin
TE Nordic	Pohjoismaiset toksisuusekvivalenttikertoimet
I-TEF	Kansainväliset toksisuusekvivalenttikertoimet
SCR	Selektiivinen katalyyttinen typenpoisto (Selective Catalytic Reduction)
SNCR	Selektiivinen ei-katalyyttinen typenpoisto (Selective Non-Catalytic Reduction)
BAT	Paras käytettävissä oleva tekniikka (Best Available Technology)
BREF	Parhaan tekniikan asiakirja (BAT Reference Document)
IPPC	Yhdennetty ympäristönsuojelu (Integrated Pollution Prevention and Control)
LCCA	Elinkaarikustannuslaskenta (Life Cycle Cost Accounting)
ABCA	Toimintolaskenta (Activity Based Cost Accounting)
FLCCA	Ympäristövaikutukset sisältävä kustannuslaskenta (Full Life Cycle Cost Assessment)
TCA	Kokonaiskustannusten arviointi investointilaskennassa (Total Cost Assessment)
ECBA	Laajennettu kustannus-hyötyanalyysi (Extended Cost-benefit Analysis)
NEMO	TEKESin Uudet energiamuodot ja -teknologiat -tutkimusohjelma (1993 - 1998)
LIEKKI	TEKESin Poltto- ja kaasutustekniikan tutkimusohjelma (1993 - 1998)

SIHTI	Energia- ja ympäristötekniikan tutkimusohjelma (1993 - 1998)
IGCC	Integroitu kaasutus- ja kombilaitos (Integrated Gasification Combined Cycle)
PFBC	Paineistettu (kerros)leijupoltto (Pressurized Fluidized Bed Combustion)
PCFBC	Paineistettu kierto-leijupoltto (Pressurized Circulating Fluidized Bed Combustion)
LHV	Alempi lämpöarvo (Lower heating value)
HHV	Ylempi lämpöarvo (Higher heating value)

1 JOHDANTO

1.1 TAUSTA JA TAVOITTEET

Energian tuotantarve ja samalla energian tuotantoon käytettävien fossiilisten polttoaineiden osuus on Suomessa ennusteiden mukaan edelleen kasvussa. Väestön ja taloudellisten toimintojen keskittyessä suurkaupunkialueille energian tarve näillä alueilla kasvaa edelleen. Koska lisäksi yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto kuuluu Suomessa energian tuotannon ympäristöhyväksyttävyyden ja kilpailukyvyn perusedellytyksiin, kaupunkialueelle sijoitetut voimalat ovat olennainen osa voimalarakentamista myös tulevaisuudessa.

Sijoitus kaupunkialueelle edellyttää, että päästään ratkaisuihin, jotka ovat mahdollisimman pitkälle ympäröivän yhteisön hyväksyttävissä. Näiden perustana ovat mm. ympäristöhaittojen minimointi sekä yhteiskunnan ja yhteiskunnallisen kehityksen asettamien vaatimusten huomioonottaminen. Suunnittelussa ei kuitenkaan voida unohtaa taloudellisia ja teknisiä näkökohtia, vaan ympäristönäkökohdat on entistä enemmän pyrittävä liittämään osaksi muuta suunnittelua.

Ympäristövaatimusten, teknologian, taloudellisen optimoinnin ja yhteiskunnallisen hyväksyttävyyden vuorovaikutusten ymmärtäminen asettaa energiantuotannon ympäristötutkimukselle uusia vaatimuksia. Toisaalta on edelleen pyrittävä kehittämään tekniikkaa siten, että ympäristöhaittoja pystytään vähentämään ja syntyvät energia- ja ainevirrat hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti. Toisaalta tarvitaan arviointimenetelmiä, joilla saavutettavat tulokset ovat täysipainoisesti käyttäjien hyödynnettävissä. Näiden tarpeiden ja tulevaisuuden vaatimusten selvittäminen on tärkeää, jotta kaupunkivoimarakentamiseen liittyvä ympäristötutkimus voitaisiin suunnata oikeille alueille.

Tutkimuksessa selvitettiin, mitä lähitulevaisuuden ympäröivään yhteisöön integroitujen kaupunkivoimalaratkaisujen kehittäminen, niiden ympäristötavoitteiden arviointi ja ympäristötavoitteiden liittäminen muuhun suunnitteluun ja laitosten toiminnan ohjaukseen vaatii ympäristötutkimukselta. Tutkimus perustuu kotimaiseen ja ulkomaiseen kirjallisuuteen, tutkimusraportteihin sekä keskusteluihin tutkimuksen johtoryhmässä olevien yritysten edustajien ja muiden asiantuntijoiden, kuten eri hallinnonalojen, energiantuottajien, laitevalmistajien, tutkimuslaitosten ja ympäristöjärjestöjen edustajien, kanssa. Tavoitteena on ollut selvittää näkemykset energiantuotannon ja siihen liittyvän tutkimuksen nykytilanteesta, tulevista kehityssuunnista, tutkimustarpeista ja tulevaisuuden kaupunkivoimalaratkaisuille asetettavista ympäristötavoitteista.

1.2 RAJAUKSET

Tutkimuksessa keskityttiin suurten kaupunkien alueelle sijoitettavissa oleviin, sähkön ja lämmön yhteistuotantoon soveltuviin, alueen energiantuotantojärjestelmää täydentäviin laitostyyppisiin. Laitoskoko rajattiin sähkötehoalueelle 100 - 400 MW. Koska kokoluokan 200 - 400 MW laitosten välillä ei ole suuria teknisiä eroavuuksia, valittiin selvityksen pääasiallisiksi kohteiksi noin 100 MW:n ja 200 MW:n laitoskokoluokat. Lisäksi edellytettiin, että vaihtoehdot ovat realistisesti käyttöön otettavissa jo lähitulevaisuudessa (v. 2010 - 2015). Tarkastelukauden ja laitoskokoluokan valinnan vuoksi vielä kehitteillä olevat vaihtoehtoiset energiamuodot ja -järjestelmät ja hajautetut pienvoimalaratkaisut jäivät tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Polttoainevaihtoehtoina tarkastellaan hiilen ja maakaasun käyttöä sekä jätteiden tai puupohjaisen biopolttoaineen polttoa yhdessä hiilen tai maakaasun kanssa. Maakaasun käyttö on tuotantoteknisesti suhteellisen selkeätä eikä näin vaadi erilaisten vaihtoehtojen arviointia. Biopolttoaineet ovat pienemmissä taajamissa varteenotettava polttoainevaihtoehto. Suurimmissa kaupungeissa ne toistaiseksi voivat saatavuuden ja kuljetusjärjestelyjen vuoksi olla lähinnä hiilen tai maakaasun käyttöä täydentäviä vaihtoehtoja. Laitosvaihtoehtojen lisäksi tarkastellaan pääpiirteissään mahdollisuutta hankkia puuttuva lisäenergia ostamalla sähköä ulkopuolelta.

2 KAUPUNKIVOIMALARATKAISUILLE ASETETTAVAT VAATIMUKSET

2.1 YLEISET LÄHTÖKOHDAT VOIMALASUUNNITTELUSSA

Uuden voimalan suunnittelussa huomioonotettavia perustekijöitä, joita käsitellään tarkemmin luvuissa 3 – 5, ovat mm. seuraavat:

- vaadittava tuotantoteho, johon vaikuttavat mm. sähkön ja lämmön tarpeen kehitys sekä mahdollisuudet täydentää energiajärjestelmää uutta voimalaa rakentamalla
- käyttötapa, mm. tarve käynnistykseen ja pysäytykseen on erilainen lauhde- ja vastapainetuotannossa
- käytettävissä oleva polttoaine tai polttoaineet, niiden lämpöarvo ja muut ominaisuudet, mahdollinen tarve vaihtaa polttoainetta myöhemmin.
- polttoaineiden hintakehitys
- päästöt ja päästöraajat, niiden tuleva kehitys sekä syntyvien jätteiden sijoituskelpoisuus ja sijoitusmahdollisuudet
- tekninen kehitys, uusien tuotantotekniikoiden ja päästöjen käsittelymenetelmien kehitysvaihe, materiaalien kehitys
- pääoma- ja käyttökustannukset, myös verotuksen tai muiden taloudellisten ohjauskeinojen kehitys ja sen vaikutukset kustannuksiin
- sijoituspaikka tai sijoituspaikkavaihtoehdot ja niiden asettamat rajoitukset
- yhteiskunnallinen kehitys, arvojen ja asenteiden muutokset.

2.2 YHDISTETYN SÄHKÖN- JA KAUKOLÄMMÖNTUOTAN- NON ASETTAMAT VAATIMUKSET

- Laitosratkaisun on oltava erilainen kuin pelkästään sähköä tuottavassa voimalassa.
- Sijoituspaikan oltava lähellä asutusta, jotta putkistokustannukset, lämpöhäviöt ym. voidaan minimoida.
- Yksikkökoko määräytyy lämmöntarpeen mukaan ja on yleensä pienempi kuin pelkässä sähköntuotannossa. Sähkön ja lämmön tuotantotehon suhde on tärkeä.

2.3 SIJOITUSPAIKAN ASETTAMAT VAATIMUKSET

- Kaavoitus määrää mahdolliset sijoitusalueet ja rajoittaa huomattavasti sijoituspaikkavaihtoehtoja. Kaavassa esitetään myös vaatimuksia laitoksen sopeutumiselle ympäristöön ja olemassa olevaan kaupunkirakenteeseen.
- Sijoitus jo olemassa olevalle voimala-alueelle on kustannuksiltaan yleensä uutta sijoituskohdetta edullisempi vaihtoehto, koska tällöin voidaan käyttää olemassa olevia sähkö- ja kaukolämpöyhteyksiä sekä tilanteen mukaan myös esimerkiksi satamaa, hiilivarastoja ym.

- Sijoitusalueella on yleensä vähän tilaa, minkä vuoksi laitoksen sekä oheistointojen, kuten polttoaineiden varastoinnin, tilantarpeen olisi oltava mahdollisimman pieni.
- Laitoksen sopeutuminen sijoitusympäristöön on tärkeää ja arkkitehtonisen suunnittelun merkitys on yleensä erittäin suuri.
- Laitossijoituksen aiheuttama haitta olemassa oleville toiminnoille ja asutukselle olisi minimoitava. Tämä merkitsee mm. tarvetta rajoittaa haju-, pöly- ja meluhaitat sekä kuljetusten aiheuttamat haitat mahdollisimman vähäisiksi ja tarvetta sijoittaa esteettisesti epämiellyttäviksi koettavat rakennelmat ja toiminnot pois näkyvistä.
- Kuljetusjärjestelyt rajoittavat erityisesti lähelle keskusta-alueita sijoitettavien voimaloiden polttoainevalintaa.
- Asukkaiden tyytyväisyys ja mielipiteet on otettava huomioon laitossuunnittelussa. Tämä vaatii paitsi haittojen minimointia myös tiedotusta ja keskusteluyhteyksien luomista mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Yhteiskunnallisen hyväksyttävyyden kriteereihin vaikuttavat sekä yleiset kehityssuunnat että sijoituspaikkakohtaiset tekijät, joiden huomioonottamiseksi olisi entistä enemmän pyrittävä vuorovaikutteiseen suunnitteluprosessiin.

3 KEHITYSSUUNNAT JA -ENNUSTEET

3.1 YMPÄRISTÖVAATIMUKSET

3.1.1 Hallinnollinen ohjaus

Kansainväliset sopimukset

Rio de Janeiron ilmastomuutosta koskevaan YK:n yleissopimukseen liittyvistä kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteista sovittiin joulukuussa 1997 pidetyssä Kioton ilmastokokouksessa. Kokouksen päätösten mukaan tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä keskimäärin 5,2 % vuoden 1990 tasosta seuraavien 15 vuoden kuluessa. Euroopan yhteisön päästövähennystavoite on 8 %, Yhdysvaltojen 7 % ja Japanin 6 %. Sopimus ei koske kehitysmaita, mutta runsaasti päästöjä tuottavien maiden toivotaan asettavan itselleen vapaaehtoisia vähennystavoitteita. Ensimmäistä kertaa sopimuksessa ovat mukana hiilidioksidin lisäksi myös metaanin, typpioksiduulin ja fluorihiihivetyjen päästöt. Lisäksi annetaan mahdollisuus korvata vähennyksiä päästökaupalla sellaisten maiden kanssa, jotka pystyvät ylittämään tavoitteensa. Sopimus tulee voimaan, kun sen on ratifioinut vähintään 55 maata, joiden hiilidioksidipäästöt olivat vähintään 55 % maailman hiilidioksidipäästöistä vuonna 1990.

Euroopan yhteisön vähennystavoitteiden jakautumisesta maiden kesken ei vuoden 1997 loppuun mennessä ollut vielä sovittu, koska Kioton kokouksessa vähennystavoite pieneni EU:n alun perin asettamasta. Suomelle ennen kokousta määritelty tavoite oli vuoden 1990 taso, mikä käytännössä merkitsisi 6 - 7 %:n vähennystä nykyiseen.

Jatkossa vähennystavoitteita on tiukennettava huomattavasti, jos halutaan saavuttaa hiilidioksidipitoisuuden kasvun perusteella tavoitteeksi asetettu päästöjen nousun tasaaminen ensimmäisten sadan vuoden aikana ja päästöjen laskeminen puoleen 200 vuoden kuluessa. Vaikka teollisuusmaat pystyisivätkin vähentämään päästöjään, kasvaa energian tuotantarve kehitysmaissa samanaikaisesti voimakkaasti.

YK:n Euroopan talouskomission (ECE) rikkipöytäkirja, joka velvoitti jäsenmaita vähentämään rikkipäästöjä 30 % vuoteen 1993 mennessä, allekirjoitettiin vuonna 1985. Vuonna 1994 allekirjoitetun jatkopöytäkirjan pitkän aikavälin tavoitteena on, etteivät rikkilaskeumat ylitä kunkin alueen kriittistä kuormitusta. Suomi sitoutui pöytäkirjan allekirjoittaessaan vähentämään vuoteen 2000 mennessä rikkipäästöjään 80 % vuoden 1980 määrästä. Tähän asti Suomi on pystynyt täyttämään ja ylittämäänkin asetetut tavoitteet. Vuoden 2000 tavoitetaso, joka on 100 000 t/a, saavutettiin jo vuonna 1995, jolloin päästöt olivat 96 000 t.

Vastaava typpipäästöjä koskeva pöytäkirja allekirjoitettiin Sofiassa vuonna 1988. Sen mukaan typen oksidien päästöjä olisi vuoteen 1998 mennessä vähennettävä 30 % vuoden 1980 tasosta. Tässä ei ole onnistuttu yhtä hyvin kuin rikkipäästöjen vähentämisessä. Vuonna 1995 typpipäästöt olivat vain muutamia prosentteja pienemmät kuin vuonna 1980. Energiantuotannon typpipäästöt olivat kuitenkin vastaavana aikana vähentyneet noin 25 %. Neuvottelut II typpipöytäkirjasta ovat alkamassa. Tavoitteena on ottaa samanaikaisesti huomioon happamoitumiseen (SO₂, NO_x, NH₃), rehevöitymiseen (NO_x, NH₃) ja alailmakehän otsonin muodostukseen (NO_x, VOC) vaikuttavat yhdisteet. Päästövähennysten vaikutuksia ja merkitystä on pyritty arvioimaan mallilaskelmin, joilla etsitään mahdollisimman optimaalista ratkaisua kriittisten kuormitusten ja kriittisten annosten ylityksen kannalta. Laskelmiin on tarkoitus liittää myös vähennysten kustannukset. Pöytäkirja valmistunee aikaisintaan vuoden 1998 lopulla.

Myös haihtuville orgaanisille yhdisteille (VOC) on laadittu vähentämisspöytäkirja, joka ei merkittävästi vaikuta suuriin energiantuotantolaitoksiin, koska niiden VOC-päästöt ovat suhteellisen pienet.

Lisäksi ECE:n alaisuudessa neuvotellaan parhaillaan raskasmetallien ja POP-yhdisteiden eli pysyvien orgaanisten ympäristömyrkkujen (POP - Persistent Organic Compounds) päästöjen rajoittamissopimuksista. Tavoitteena on, että sopimukset valmistuisivat vuoden 1998 loppuun mennessä (Juntto 1997). POP-yhdisteisiin lasketaan pysyvien torjunta-aineiden ja muiden kemikaalien lisäksi polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH) sekä dioksiinit ja furaanit.

Raskasmetallipöytäkirjassa rajoitetaan ensimmäisessä vaiheessa elohopean, lyijyn ja kadmiumin päästöjen vähentämiseen. Pöytäkirjassa tullaan esittämään maakoh- taisia määrällisiä päästövähennyksiä sekä parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) käyttöönottoa liitteessä määritellyille laitoksille, joille todennäköisesti tul- laan määrittelemään myös päästöraja-arvoja. Laitosluettelossa on mainittu mm. yli 50 MW:n polttolaitokset. Ensimmäisessä ehdotuksessa, joka saattaa vielä muut- tua, esitetään seuraavia raskasmetallipäästöjen raja-arvoja: Cd - 0,2 mg/m³, Hg - 0,2 mg/m³ ja Pb - 5 mg/m³ sekä polttolaitosten hiukkaspäästöräjäksi 50 mg/m³. Ehdotetut raja-arvot saavutetaan jo nykyisissä sähkö- tai kuitusuodattimella varus- tetuissa voimaloissa.

Suomea koskevia ovat myös HELCOM-suositukset, joita on annettu vuodesta 1980 lähtien, ja Itämeren ympäristöohjelma vuodelta 1992. Nämä koskevat me- reen kohdistuvien ravinne-, raskasmetalli- ja orgaanisten yhdisteiden kuormituk- sen vähentämistä.

EU-lainsäädäntö ja kehitystavoitteet

EU-lainsäädäntö ohjaa Suomen lainsäädäntöä ja viranomaismääräyksiä, koska useimmat määräykset edellyttävät jäsenmaiden sisällyttävän vastaavantasoiset

määräykset omaan lainsäädäntöönsä. Strategisella tasolla tärkeinä pidetään mm. energiasektorin hiilidioksidipäästöjen vähentämistä, taloudellisten ohjauskeinojen käyttöä, Keski- ja Itä-Euroopan maiden päästöjen rajoittamista ja happamoitumisen torjuntaa. Pyrkimys yhdenmukaistettiin ympäristönsuojeluun, jota koskeva direktiivi (IPPC, Council Directive 96/61/EC of 24 September concerning integrated pollution prevention and control) on jo voimassa, muuttanee jatkossa maa- ja haitta-ainekohtaisia painotuksia jonkin verran. Samalla arviointimenetelmien ja strategisten selvitysten merkitys kasvaa entisestään.

Parhaillaan käsiteltävänä olevassa yhteisön happamoitumisstrategiaehdotuksessa asetetaan tavoitteeksi, ettei happamoitumisen kannalta kriittistä kuormitusta ylitettäisi EU:n alueella. Happamoitumisstrategian käsittely on vielä melko alkuvaiheessa. Välitavoitteena on vähentää niiden alueiden pinta-ala, joilla kuormitus ylittyy, puoleen nykyisestä vuoteen 2010 mennessä (Sarkkinen 1997). Kunkin maan rikki-, typpi- ja hiilivetyypäästöjen enimmäismäärät määritetään kriittisten kuormitusten pohjalta. Tällöin otetaan huomioon myös yhteydet valmisteilla olevaan EU:n otsonistrategiaan. Direktiiviehdotus päästöjen enimmäismääristä annetaan vuonna 1998. Suomen osalta jo tehdyt rikkipäästöjen vähentämissuunnitelmat riittävät tavoitteiden saavuttamiseksi. Typpipäästöjen osalta tilanne oli raporttia kirjoitettaessa epäselvä.

Happamoitumisstrategian yhteydessä on annettu direktiiviehdotus polttoöljyjen rikkipitoisuudesta. Siinä ehdotetaan raskaan polttoöljyn rikkipitoisuuden enimmäismääräksi 1 p-% vuoden 2000 alusta lukien ja yli 0,2 p-% rikkiä sisältävän kevyen polttoöljyn käytön rajoittamista vuoden 1999 alusta lukien.

Energiantuotantoa koskevista direktiiveistä tärkeimpiä ovat suuria polttolaitoksia ja ympäristövaikutusten arviointia (YVA) koskevat direktiivit. Suomessa on voimassa YVA-direktiivin vaatimukset täyttävä lainsäädäntö. Direktiiviä on kuitenkin muutettu marraskuussa 97 annetulla direktiivillä, ja sen edellyttämät muutokset on saatettava Suomen lainsäädännössä voimaan 14.3.1999 mennessä. Suurimmat muutokset nykyiseen lainsäädäntöön verrattuna tulevat YVA-asetuksen hankeluutteluun. YVA-lakiin sisällytetään mm. arviointimenettelyn soveltamisen harjakkriteerit.

Myös polttolaitosdirektiiviä, jossa asetetaan olemassa oleville laitoksille maakohdittaiset SO₂- ja NO_x-päästöjen vähentämistavoitteet sekä uusille yli 50 MW:n laitoksille SO₂-, NO_x- ja hiukkaspäästörajat, ollaan parhaillaan uusimassa. Direktiivin muutosehdotuksen käsittely kestää vielä 1 - 2 vuotta. Päästörajoista vallitsee kohtuullisen suuri yksimielisyys, mutta maakohtaisista katoista useimmat maat ovat esittäneet eriäviä mielipiteitä eikä niiden tasosta tai mukanaolosta lopullisessa direktiivissä ole vielä varmuutta¹.

¹ Markku Hietamäki, ympäristöministeriö, suullinen tiedonanto

Suomen lainsäädäntö

Ehdotus uudeksi ympäristönsuojelulainiksi on lausuntokierroksen jälkeisessä jatkovalmisteluvaiheessa. Tavoitteena on yhtenäistää ympäristölainsäädäntö ja uudistaa päätöksentekojärjestelmää EU:n IPPC-direktiivin vaatimusten mukaisesti. IPPC-direktiivin lähtökohtana on tarkastella laitoksista aiheutuvia päästöjä ja ympäristövaikutuksia samanaikaisesti yhtenä kokonaisuutena. Parhaan käytettävissä olevan tekniikan soveltaminen ja energiankäytön tehokkuus ovat toiminnanharjoittajan perusvelvollisuuksia. Yhtenäislupamenettelyyn kuuluvat myös toiminnan ympäristöriskien hallinta ja vähentäminen sekä toiminnan lopettamisen jälkeisten ympäristövaikutusten hallinta. Ympäristönsuojelulakiehdotuksessa nämä kaikki seikat edellytetään otettaviksi huomioon ympäristölupaa myönnettäessä (ympäristöministeriö 1997). Laki korvasi mm. ilmansuojelulain, ympäristölupamenettelylain ja meluntorjuntalain. Hallituksen esitys ympäristönsuojelulainiksi on tarkoitus antaa kevään 1998 aikana. Tällöin laki saatettaisiin voimaan viimeistään loppuvuodesta 1999.

IPPC-direktiivi edellyttää, että komissio organisoii tietojen vaihtoa parhaista käytettävissä olevista tekniikoista, niihin liittyvästä tarkkailusta ja tekniikoiden kehityksestä. Käytännössä tämä toteutetaan perustamalla tekniset työryhmät valmistelemaan toimialoittaisia parhaan tekniikan asiakirjoja (IPPC Bat Reference Documents, BREF). Alustavan aikataulun mukaan suuria polttolaitoksia koskevan ensimmäinen BREFin valmistelutyö aloitetaan vuoden 2000 aikana ja asiakirja valmistuisi vuonna 2001 (Ympäristöministeriö 1997).

Vuonna 1996 asetettiin happamoitumistoimikunta, jonka tehtävänä oli vuoden 1997 loppuun mennessä laatia suunnitelma typen oksidien päästöjen sekä muiden happamoitumista ja otsoninmuodostusta aiheuttavien päästöjen vähentämiseksi edelleen kustannustehokkaalla tavalla. Toimikunnan työ kytkeytyy EU:n happamoitumisstrategian, siihen liittyvien direktiivien ja typpipöytäkirja II:n valmisteluun eikä todennäköisesti valmistune määräjassa. EU:n YVA-direktiivin muutos pannaan Suomessa toimeen lailla ja asetuksella ympäristövaikutusten arvioinnista annetun lain ja asetuksen muuttamisesta.

3.1.2 Ympäristökustannukset ja taloudellinen ohjaus

Ympäristönsuojeluun liittyvien kustannusten monipuolinen arvioiminen on tärkeää tulevien kaupunkivoimaloiden suunnittelussa. Ympäristöasiat sisältävät kokonaiskustannukset ovat keskeisiä verrattaessa voimalainvestoinnin ja sen käytön kustannuksia odotettavissa oleviin taloudellisiin ja ympäristöhyötyihin. Voimalan suunnittelussa on otettava huomioon myös maailmanlaajuiset, EU:n ja kansalliset taloudelliseen ohjaukseen liittyvät suunnitelmat ja tulevaisuudennäköykymät.

Yrityksen ympäristökustannukset ja aiheuttamisperiaate

Yrityksen ympäristökustannuksilla tarkoitetaan kaikkia niitä kustannuksia, joihin ympäristöön liittyvät tekijät vaikuttavat (Niskala ja Mätäsaho 1997). Kustannukset jaetaan yksityisiin ja yhteiskunnallisiin. Yksityiset ympäristönsuojelukustannukset koostuvat Yhdysvaltojen ympäristöviraston (EPAn) luokittelun mukaan tavanomaisista kustannuksista (laitehankinnoista, työvoimasta jne.), piilokustannuksista (lainsäädännön edellyttämistä valvonnasta, luvista ja tarkastuksista), vastuukustannuksista (tulevista vastuista, sakoista tms.) sekä imagokustannuksista (mm. ympäristöraportoinnista, yhteiskuntasuhteiden hoidosta). Yhteiskunnalliset ympäristökustannukset ovat yrityksen laskentatoimen ulkopuolella. Koska esimerkiksi ilma ja sen saastuminen eivät ole hintajärjestelmän piirissä, haittakustannuksia nimitetään ulkoisiksi kustannuksiksi. Kuluttajien preferenssit ja yhteiskunnan paineet vaikuttavat siten, että ulkoisia kustannuksia tulisi sisällyttää yritysten yksityisiin kustannuksiin (Niskala ja Mätäsaho 1997).

Yhteiskunnalliset kustannukset ovat vahvasti esillä Euroopan Unionin 5. ympäristöohjelmassa. Siinä korostetaan tarvetta siirtyä tulevaisuudessa 'oikeisiin hintoihin' sisäistämällä ulkoiset ympäristökustannukset hintoihin (Resolution of Council, No C 138/16). Ellei ympäristökustannuksia oteta huomioon, on vaarana harhainen käsitys yhteiskunnan varallisuudesta, tuloista ja kestävän kehityksen potentiaalista (Resolution of Council, No C 138/96). EU:n 5. ympäristöohjelman 15. luvussa myönnetään vaikeudet ulkoisten kustannusten arvioimisessa: Tiedot ympäristön fyysisestä tilasta ovat puutteelliset; ympäristön haittakustannusten tai parantamistoimien taloudellisten hyötyjen arvioimistekniikka on puutteellista; taloudellisten arviointiongelmiensa takia on vaikeata priorisoida yhtä ympäristöongelmaa suhteessa toiseen jne. Siten päätöksenteon kannalta ulkoisten kustannusten laskenta on vielä epävarmaa ja tulee vaatimaan jatkossa runsaasti sekä menetelmäkehitystä että tutkimusta. Huolimatta näistä ongelmista EU:n on tarkoitus tulevaisuudessa edistää tavoitettaan ympäristökustannukset kattaviin hintoihin mm. laajentamalla taloudellisten ohjausinstrumenttien soveltamista.

Yritysten sidosryhmät edellyttävät yhä useammin tuotteilta ja palveluilta niiden koko elinkaaren kattavia ympäristötarkasteluja. Tämän koskee myös ympäristökustannusten erittelyjä. Esimerkiksi energiavaihtoehtojen tarkastelussa tulee arvioida kustannusten jakautumista eri polttoaineiden ja tuotantoteknisten vaihtoehtojen koko elinkaaren kattavasti. Vaikka kustannuskysymykset ovat toistaiseksi olleet vähemmällä painolla muutenkin työläissä elinkaaritarkasteluissa, jatkossa niiden mukaan tuominen (life cycle cost accounting, LCCA) on analyysin yksi tärkeä kehittämiskohde.

Energiasektoriin liittyviä tutkimushankkeita ulkoisten kustannusten arvioimisesta ja sisällyttämisestä energiahintoihin on toteutettu sekä Suomessa että ulkomailla. Kotimaassa näitä on tehty lähinnä SIHTI 2 -tutkimusohjelmassa. ExternE-hankkeessa on pyritty luomaan EU:n jäsenmaille yhteinen malli ja ohjelma ulkoisten kustannusten selvittämiseksi. Yksittäisten energiayhtiöiden ulkoisten kustannusten

arvioimishankkeista ehkä tunnetuin on Ontario Hydro -yhtiön kustannushanke. Näitä käsitellään laajemmin luvussa 9.

Ympäristökustannusten kattamisen lähtökohtana OECD:n ja EU:n jäsenmaissa on ”aiheuttaja maksaa” -periaate (Polluter Pays Principle) (Resolution of Council 1992). Sen mukaan kuormittaja vastaa viranomaisen edellyttämien suojelutoimien kustannuksista, jolloin nämä kustannukset siirtyvät edelleen tavaroiden ja palvelujen hintoihin. Periaatteen avulla pyritään siihen, että tuotanto ja kulutus toimisivat mahdollisimman pitkälle ympäristöressurssien niukkuutta vastaavasti. Energialaitosten kohdalla ympäristönsuojelutoimet Suomessa perustuvat hallinnolliseen ohjaukseen. Laitoksen aloittaessa tai merkittävien muutosten yhteydessä viranomainen määrää kuitenkin yrityksen kanssa käytäviin neuvotteluihin perustuen laitostenkohtaisista ympäristönsuojeluvuoroista. Näin myös yrityksen on mahdollista hallinnollisten määräysten asettamisessa rajoissa vaikuttaa ympäristönsuojeluvuorojen tasoon ja menetelmiin, joilla niihin päästään. Näihin kysymyksiin palataan tarkemmin luvussa 9.

Ympäristönsuojelun taloudellinen ohjaus

Aiheuttamisperiaatteen toteutumista pyritään edistämään myös taloudellisen ohjauksen avulla. Euroopan Unionin 5. ympäristöohjelman mukaan taloudellista ohjausta on tarkoitus kehittää tulevaisuudessa markkinavetoisten instrumenttien suuntaan. EU:ta kiinnostaa erityisesti Yhdysvalloissa sovellettavan kuormitusoikeuksien markkinoinnin soveltaminen. Perusteluna on tarve luopua yhteiskunnan ylhäältä alas -ohjauksesta ja korvata se taloudelliseen tehokkuuteen perustuvalla säätelymekanismilla. Toimintaa jäykistävästä suorasta viranomaissäätelystä pyritään sekä joustavuuden että kustannustehokkuuden takia siirtymään yritysten vapaaehtoiseen itsensäätelyyn. Lähtökohtana on, että yritykset tuntevat tehokkaat tavat kuormituksen vähentämiseksi. Osittain epäselvää on, miten IPPC-direktiivin mukaiset parhaan käytettävissä olevan tekniikan määrittelyt vaikuttavat tähän käytäntöön.

EU:n 5. ympäristöohjelman mukaan taloudellisilla ohjausvälineillä on kasvava merkitys ”oikeisiin hintoihin” pääsemiseksi ja markkinaperusteisten kannustimien luomiseksi. Tarkoituksena on sisäistää tuotteiden elinkaaren aikana syntyneet ulkoiset kustannukset raaka-ainehankinnasta tuotantoon, jakeluun, käyttöön ja lopusjoihtukseen asti siten, että ympäristöystävälliset tuotteet eivät jäisi kuormitusta aiheuttaviksi tuotteiksi huonompaan asemaan (Resolution of Council, No C 138/71). Energiasektorilla on tavoitteiden saavuttamiseksi tarkoitus yhtenä keinona ottaa käyttöön taloudellisia ohjausinstrumentteja, joiden avulla energiankulutuksen ympäristövaikutukset kattavat reaalkustannukset siirretään kuluttajahintoihin (esimerkiksi CO₂/energiavero) (Resolution of Council... No C 138/33).

Kuormitusoikeuksien markkinoinnin käyttöönottomahdollisuuksia voimalaitosten ympäristökuormituksen rajoittamisessa ollaan EU:ssa selvittämässä. Yhdysval-

loissa yritysten välistä kuormituslupien kaupankäyntiä (emission trading) on sovellettu voimalaitosten rikkidioksidipäästöjen vähentämiseen. Järjestelmän avulla pyritään käytettävissä olevien taloudellisten voimavarojen puitteissa optimaalisiin ratkaisuihin. Samaa järjestelmää yhdessä yhteistoimeenpanon kanssa ehdotetaan käytettäväksi valtioiden ja niiden yksityissektorin välillä myös kansainvälisen ilmastopimuksen toteuttamisessa. Päästökaupan säännöistä ja linjauksista neuvotellaan vuoden 1998 lopussa Argentiinassa pidettävässä ilmastokokouksessa. Menettelyllä on toteutuessaan myös Suomen energiatuotantosektorille vaikutuksia, joita tulisi alkaa selvittää pikaisesti.

Suomessa taloudellisten ohjausinstrumenttien käyttö energiakysymyksissä on vähäistä. Lähinnä energiavalintoihin on ympäristöperusteisesti pyritty vaikuttamaan polttoaineverotuksen kautta, jossa on mukana polttoaineen hiilidioksidipitoisuuden mukainen lisävero. Suomi alkoi soveltaa EU:n suosittamaa verotusta ensimmäisten joukossa 1991. Viime vuoteen asti verotuksella on pyritty vaikuttamaan tuotantoon, mutta viimeaikaisilla ratkaisuilla tavoitteena on ohjata kulutusta. Lämmön osalta verotetaan kuitenkin edelleen tuotantoa. Yksiselitteisiä tuloksia verotuksen vaikutuksesta ei ole saatavilla. Energiaverojen potentiaalista vaikutusta polttoaineveroihin ja päästöihin tulevaisuudessa on kuitenkin selvitetty SIHTI 2 -projekteissa.

3.1.3 Informaatio-ohjaus

Informaatio-ohjauksella tarkoitetaan ohjausta ja kannustamista vapaaehtoiseen ympäristöä parantavaan toimintaan tiedotuksen avulla. Ohjaus voi kohdistua sekä suoraan yritykseen että kuluttajiin tai muihin asiakkaisiin. Keinoja ovat esimerkiksi ympäristömerkit, tuotteiden ympäristöselosteet, viranomaisten ja yritysten väliset vapaaehtoiset sopimukset, ympäristöasioiden hallintajärjestelmät sekä ympäristökasvatus ja -tiedotus (Kosola ym. 1996). Ympäristötietoisuuden kasvu on helpottanut ja edistänyt erilaisten vapaaehtoisten järjestelmien käyttöönottoa, koska niitä voidaan yhä enemmän hyödyntää yritysten markkinoinnissa.

Ympäristöasioiden hallintajärjestelmien käyttöönotto on Suomessa erityisesti suurimmissa yrityksissä jo yleistä. Myös monet kaupunkien energiantuotantolaitokset ja -yhtiöt ovat parhaillaan luomassa omia hallintajärjestelmiään. Pohjoismainen ympäristömerkki on saavuttanut hyvin jalansijaa erityisesti kulutustuotteiden markkinoinnissa. Keskustelua ollaan myös käymässä vastaavista energialle tai energiantuotannolle soveltuvista kriteereistä, jollaiset Ruotsissa on luotu "Bra miljöval"-merkkiä varten. Koska käsitykset siitä, voidaanko sähkö tuotantotavan perusteella määrittellä vihreäksi, ovat varsin erilaisia, pyritään tutkimuksin myös etsimään laajempaa tarkastelupohjaa sähköntuotannon ekologisuuden kriteerien määrittelylle.

Viranomaisten ja yritysten välisiä vapaaehtoisia sopimuksia on Euroopassa käytetty mm. Hollannissa, jossa esimerkiksi haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) vähentämisstrategia perustui sopimukseen. Suomessa tämän tyyppisistä laajoista tiettyä toimialaa koskevista sopimuksista ei ole toistaiseksi kokemusta.

3.2 TOIMINTAYMPÄRISTÖN KEHITYS

Energian tuotannon ja käytön kehitykseen vaikuttavia perustekijöitä ovat ympäristö, polttoaineiden saatavuus, energianhintojen kehitys, energiankulutuksen kasvu, valtakunnan energiapolitiikka ja siihen vaikuttavat kansainväliset energiapolitiikan suuntalinjat, sosiaalinen ja poliittinen hyväksyttävyys sekä elämäntapojen muutokset.

3.2.1 Kulutuksen kehitys

Suomessa kaukolämpöverkko on kaupungeissa jo pitkälle rakennettu. Siksi lämmön kulutuksen kasvun arvioidaan suurimmissa kaupungeissa olevan suhteellisen hidasta. Sähkön kulutus kasvaa kuitenkin ennusteiden mukaan edelleen. Esimerkiksi pääkaupunkiseudun kunnissa kulutuksen arvioidaan kasvavan 15 - 20 % vuoteen 2005 mennessä. Helsingissä kasvuennuste on noin 1,9 % vuodessa vuoteen 2000 asti ja noin 1,4 % vuodessa vuosina 2000 – 2010, jos viimeksi tehty rakentamisennuste toteutuu. Jos toimitilarakentaminen jää merkittävästi ennustetta pienemmäksi, kasvu jää vuosina 2000 - 2010 keskimäärin 0,8 %:iin vuodessa.

Lämmitysenergian tarpeen arvioidaan vuoteen 2010 mennessä laskevan 4 - 5 % 1990-luvun alkupuolen tasosta rakennuskannan ominaiskulutuksen laskiessa (Havukainen 1996). Mikäli rakentaminen selvästi kiihtyy 1990-luvun puolivälin tasosta, tulee kulutuksen lasku kuitenkin olemaan pienempi. Helsingissä lämmitysenergian ja sähköenergian tarpeen suhde on korkeampi kuin muualla Suomessa, koska teollisuuden osuus rakennuskannasta on pieni. Nykyisellään sähköä tuotetaan huomattavasti yli kaupungin oman tarpeen.

3.2.2 Energiapolitiikan kehitys

Valtioneuvoston kesäkuussa 1997 eduskunnalle luovuttamassa energiapoliittisessa selonteossa painotetaan mm. seuraavia tavoitteita (KTM 1997c):

- tuotantorakenteen edistäminen kohti vähemmän hiilipitoista energiatasetta
- energiamarkkinoiden edistäminen
- energian tehokkaan käytön ja energiansäästön edistäminen
- bioenergian ja muun kotimaisen energian käytön edistäminen
- energiateknologian korkean tason ylläpitäminen
- sähkönhankinnan monipuolisuuden, omavaraisuuden ja edullisuuden varmistaminen
- energiasektorin huoltovarmuuden ylläpitäminen
- verotuksen käyttö keskeisenä energiapoliittisena elementtinä.

Kansallisina toimenpiteinä edellä mainittujen tavoitteiden saavuttamiseksi esitetään mm.

- yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon mahdollisuuksien täysimittainen hyödyntäminen siten, että tällaisen kapasiteetin polttoaineeksi valitaan maakaasu tai kotimainen polttoaine

- aktiivinen vaikuttaminen Suomen liittämiseksi eurooppalaiseen kaasuverkkoon, jota varten investointipäätökset olisi tehtävä vuoteen 1999 mennessä
- sähkön hankintamahdollisuuksien kehittäminen jatkossakin monipuoliseen suuntaan sekä polttoainevalintojen että tuotantoteknologioiden osalta
- energian käytön tehostaminen edelleen tavoitteena pysäyttää energian kulutuksen kasvu 10 – 15 vuoden kuluessa
- bioenergian ja muun uusiutuvan energian kilpailukyvyyn parantaminen panostamalla pitkäjänteiseen tutkimustoimintaan
- korkeatasoisen energiateknologian kehittämisen tukeminen.

Valtakunnallisen energiapolitiikan kehityksen heikko ennustettavuus on koettu voimalasuunnittelua vaikeuttavaksi tekijäksi, koska toimintaympäristö ja esimerkiksi verotuspolitiikka voivat muuttua huomattavasti lyhyen ajan kuluessa. Vaadittavan noin kymmenen vuoden suunnittelujakson ja 20 - 40 vuoden käyttöiän aikana tuotantoratkaisujen ja polttoaineiden edullisuusjärjestys saattaa vaihtua toiseksi. Pitkäjänteisyyden puute ja kehityksen heikko ennustettavuus ovat ominaisia myös kansainväliselle energiapolitiikalle.

3.2.3 Polttoaineiden saatavuus ja polttoainekustannukset

Polttoainevalinnassa yhtenä tärkeänä kriteerinä on energiahuollon toimivuuden varmistaminen. Paras vaihtoehto on tällöin tasapainoinen kahteen tai useampaan pääpolttoaineeseen perustuva ratkaisu. Yhden pääpolttoaineen varassa toimiva energiahuolto on riskialtis erityisesti, jos toimittajia on vain yksi. Tämä vaikuttaa Suomessa erityisesti maakaasun käyttöä rajaavasti.

Maakaasun toimitusjärjestelmä sinänsä on toiminut hyvin ja koko toimitusaikana on ollut vain yksi teknisistä ongelmista aiheutuva katkos sekä joitakin toimitusvaijauksia. Kaasua on nykyisten sopimusten perusteella saatavissa, vaikka käyttö kasvaisi paljonkin. Toimitussopimuksissa on optio kahdeksaan miljardiin kuutiometriin asti, kun käytetty määrä on noin 3,4 miljardia kuutiometriä vuodessa (Sallinen 1996). Merkittävin epävarmuustekijä on Venäjän epävakaa tilanne. Norjasta rakennettava kaasuputki toisi kilpailua kaasun myyntiin ja parantaisi kaasuhuollon riskittömyyttä. Kaasuputken rakentaminen edellyttää kuitenkin yhteispohjoismaista sopimusta, ja on näin ollen sidoksissa myös Ruotsin energiapoliittisiin päätöksiin. Kaasuputken rakentamispäätöstä ei voida toistaiseksi ennakoida. Myös yhteyden rakentaminen Euroopan kaasuverkkoon parantaisi kaasuhuollon varmuutta, vaikka kaasu tulisi edelleen Venäjältä. Tätä koskeva toteuttamisselvitys (Nordic gas grid-projekti) on käynnistynyt, mutta hanke voinee toteutua aikaisintaan vuoden 2010 jälkeen.

Kaasun kulutuksen voimakas kasvu sekä EU-maissa että kehittyvissä Aasian maissa saattaa tulevaisuudessa vaikuttaa kaasun saatavuuteen ja hintaan. Venäjän maakaasuvarojen on arvioitu olevan $56 \times 10^{12} \text{ m}^3$, mikä on noin 40 % maapallon kaasureserveistä (Anon. 1996b). Nykykulutuksella tämä määrä riittäisi noin 80

vuotta. Jos kaasun kulutus EU-maissa kasvaa huomattavasti, Keski-Euroopassa on siirryttävä yhä enemmän käyttämään Venäjän kaasua, mikä saattaa johtaa myös kaasun hinnan nousuun nykyisestä. Nesteytetyn kaasun käyttöedellytykset paranevat todennäköisesti lähivuosina, mikä lisää entisestään kaasureservien kulutusta. Kulutus lisääntynee tällöin erityisesti Aasian maissa.

Voimakas siirtyminen maakaasuun kehittyneissä maissa saattaa maailmanlaajuisesti olla kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä hidastava tekijä. Jos vähennystavoitteiden saavuttaminen maakaasun avulla hidastaa uusien energiamuotojen ja hiilidioksidipäästöjä vähentävien tekniikoiden kehitystä, kehittyville maille jää ainoksi vaihtoehdoksi hiilen ja olemassa olevan tekniikan käyttö. Siksi myös hiileen perustuvien energiantuotantomenetelmien tutkimusta ja kehittämistä olisi jatkettava. Öljy jäänee lähinnä liikenteen, huippu- ja varavoimalaitosten, lämpökustusten ja pienten dieselvoimaloiden polttoaineeksi.

Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistarve rajoittaa hiilen käyttöä saatavuutta huomattavasti enemmän. Nykytuotannolla taloudellisesti käytettävissä oleviksi arvioidut hiilireservit riittävät noin 200 vuodeksi (KTM 1997b). Kokonaishiilivarat ovat tätä jopa kymmenen kertaa suuremmat. Fossiilisten polttoaineiden hinta saattaa kuitenkin nousta kustannustason noustessa tuottajamaissa ja helpoimmin hyödynnettävien reservien ehtyessä. Hiilen tuotantokustannuksiin vaikuttavat myös monet muut seikat, kuten tuotantotekniikan kehittyminen, tuotannon turvallisuus- ja ympäristövaatimusten kiristyminen ja epäpuhtauksien poiston siirtyminen tuotantovaiheeseen.

KTM on uusimmissa energiaskenaarioissaan olettanut, että hintakehityksessä ei ilmene kovin suuria polttoaineiden välisiä eroja, koska polttoaineet kilpailevat keskenään samoissa käyttökohteissa (KTM 1997a). Polttoaineiden maailmanmarkkinahintojen arvioidaan nousevan tasaisesti siten, että ne ovat vuonna 2025 puolitoista - kaksinkertaiset vuoteen 1997 verrattuna.

Biomassan saatavuus järkevien kuljetusetäisyyksien päästä ja tarvittavien kuljetusten suuri määrä ovat suurkaupunkialueilla tärkeimmät käyttöä rajoittavat seikat. Saatavissa on lähinnä hakkuujätettä sekä erilaisia jättemateriaaleja. Metsäbiomassan saantimahdollisuudet parantunevat lähivuosina, koska puubiomassan korjuutekniikkaa on viime vuosina kehitetty voimakkaasti. Peltobiomassan kasvatusta ja käyttöä tutkitaan, mutta sen osuus ei ainakaan lähimpinä vuosikymmeninä tule olemaan merkittävä.

Biomassa soveltuu parhaiten pienehköjen alle 100 MW:n laitosten polttoaineeksi, seospoltoon tai lisäpolttoaineeksi esimerkiksi kaasutettuna. Pääkaupunkiseudulla lisäpolttoainekäyttö saattaa olla mahdollinen vaihtoehto erityisesti keskustan ulkopuolelle sijoitettavissa laitoksissa tai laitoksissa, joihin polttoaine voidaan tuoda meritse.

Tuulivoiman käyttö on tuulialueilla laajentunut nopeasti. Teknologian kehittyminen on johtanut tuotantokustannusten laskuun ja tuulivoima on tietyillä alueilla varteenotettava energiamuoto. Alueellisia selvityksiä tuulivoiman käyttömahdollisuuksista on tehty TEKESin NEMO-ohjelman yhteydessä. Myös jotkut yksittäiset rannikkokaupungit ovat suunnitelleet omien paikallisten selvitysten käynnistämistä. Tuulivoiman ongelmia ovat epäsäännöllisyys ja säätövoiman tarpeen nousu. Myös lisääntynyt kansalaisten vastustus (mm. meluhaittojen takia) on hidastanut lisärakentamista.

Aurinkoenergian tuotantotekniikka tulee vähitellen kehittymään ja aurinkokennojen hyötysuhde nousemaan. Käyttö tulee kuitenkin ainakin toistaiseksi keskittymään pienimittakaavaiseen, rakennuksiin integroituun tuotantoon sähköverkon ulkopuolella tai maissa, joissa ilmasto-olosuhteet ovat suotuisat. Vesivoiman tuotannon lisäämiseen Suomessa ei ole enää suuria mahdollisuuksia, ja myös ympäristönäkökohdat rajoittavat uusien pienten laitosten rakentamista. Sama pätee monissa muissa teollistuneissa maissa. Sen sijaan tuotannon laajentamiseen on mahdollisuuksia kehittyvissä maissa.

3.2.4 Toimintaympäristön muutokset

Sähkömarkkinoiden vapautumista seurannut kilpailu luo paineita toiminnan tehostamiseen, minkä seurauksena on muun muassa energiatuotantolaitosten muuttuminen kaupungin laitoksista itsenäisiksi yhtiöiksi. Vapautuminen helpottaa myös osaltaan kuntien välistä yhteistyötä, koska sähkönsiirto kolmannen osapuolen omistaman verkon kautta on vapautunut. Jos kuntien välillä on valmiit kaukolämpöyhteydet, sähkönsiirto ja lämmön käytön optimointiin on entistä paremmat mahdollisuudet. Tuotannollista yhteistyötä voidaan tehdä entistä enemmän markkinapohjalta ilman monimutkaisia yhteistyöjärjestelmiä.

Yhtiöittämisen ja kilpailun seurauksena yritykset todennäköisesti pyrkivät luomaan oman muista erottuvan profiilinsa. Asiakkaille myydään pelkän energian sijasta merkkituotteita, millä saatetaan tarkoittaa esimerkiksi asiakkaan haluamalla tavalla tuotettua energiaa tai laajempia palvelupaketteja. Tämä näkyy myös hinnoittelussa, joka muuttuu tuotepohjaiseksi.

Englannista ja Yhdysvalloista saatavien kokemusten mukaan vapautuminen ja sen seurauksena oleva jatkuva sähkönsiirto hinnan vaihtelu ohjaavat energiantuotannon rakennetta pieniä nopeasti kuolettavia ja nopeasti rakennettavia laitoksia suosivaksi (Sallinen 1996). Toiminnalta odotetaan entistä suurempaa joustavuutta ja sopeutumista nopeisiin muutoksiin. Tämä edellyttää sitä, että saatavilla on vaihtoehtoisia ja joustavasti muunneltavia tuotanto- ja ympäristönsuojeluteknologioita, mikä heijastuu myös tutkimus- ja kehitystyöhön. Toisaalta ympäristönsuojelu liittyy entistä kiinteämpänä osana tekniikoiden kehitykseen.

Todennäköisesti kilpailu muuttaa alan rakennetta siten, että energiantuotanto ja teknologioiden tarjonta keskittyvät entistä suurempiin organisaatioyksiköihin. Sa-

malla liiketoiminta kansainvälistyy. Teknologioiden valmistajilta edellytetään myös mahdollisuutta rahoitukseen, mikä lähentää toimialaa energiantuotantoon. Tuotantorakenne todennäköisesti monipuolistuu ja erikoisaloilla myös pienten yritysten toimintamahdollisuudet ovat hyvät. Sähkön hinnan arvioidaan nousevan ja siten yhä kalliimman kapasiteetin tulevan kannattavaksi, mikä parantaa uusien tuotantotekniikoiden mahdollisuuksia.

Sähkömarkkinoiden vapautuminen saattaa entistä useammin johtaa tilanteeseen, jossa on kannattavampaa ostaa tarvittava lisäsähkö ulkopuolelta ja tuottaa lisälämpö lämpökeskuksissa. Tämän vaihtoehdon kannattavuus paranee erityisesti, jos sähkön tarve kasvaa enemmän kuin lämmön tarve.

Tutkimuksen osalta markkinoiden vapautuminen on Englannissa saatujen kokemusten mukaan johtanut pitkän aikavälin tutkimus- ja kehitystyön vähenemiseen. Erityisesti tämä on vaikuttanut uusien tekniikoiden kehitystyöhön, kun taas jakeiluun ja loppukäyttöön liittyvä tutkimus on säilynyt ennallaan tai jopa lisääntynyt.

Tuotantotekniikan kehittämisen ohella painotetaan mm. kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteiden vuoksi entistä enemmän energiansäästöä. Tämä parantaa sähkön ja lämmön yhteistuotannon mahdollisuuksia ja tähän liittyvän tekniikan vientiedellytyksiä.

3.2.5 Arvojen ja asenteiden muutokset

Pääkaupunkiseudulla energiantuotantolaitosten rakentaminen ja siihen liittyvät hyväksymismenettelyt eivät toistaiseksi ole aiheuttaneet laajaa keskustelua tai vastustusta. Laitoksista tehdyt valitukset ovat koskeneet lähinnä pöly- ja meluhaittoja. Valituksia tehdään huomattavasti vähemmän kuin viihtyvyydelle haitallisiksi koetuista hajuhaittaa aiheuttavista teollisuuslaitoksista. Päästöjen vähentämisen myötä laitosten hyväksyttävyys kaupunkiympäristöön sijoitettaviksi on parantunut. Energiantuotannon päästöt eivät enää ratkaisevasti vaikuta pääkaupunkiseudun ilmanlaatuun. Painopiste on ympäristönsuojelussa siirtynyt ilmansuojelutoimista jätteen sijoitettavuuteen ja ympäristönsuojelutoimien optimointiin.

Ympäristötietoisuuden kasvu saattaa tulevaisuudessa tuoda paineita lisätä uusiutuvien energiamuotojen käyttöä. Esimerkiksi vihreän sähkön tai ekosähkön merkitys saattaa kasvaa. Vielä ei tunneta asiakkaiden todellista halukkuutta maksaa vihreästä sähköstä. Kiinnostusta vihreään sähköön uutena tuotteena on, mutta kokemusten perusteella kysyntä on vielä vähäistä. Havaittavissa on joka tapauksessa selvä tarve määritellä ekologisesti edullisimpien tuotteiden kriteerit.

Myös laitosten tarve tuntea ja hallita ympäristövaikutuksensa kasvaa edelleen. Yksittäisten haittojen rajoittamisesta siirrytään kokonaisuuden tarkasteluun, jossa ympäristön hallinta integroituu entistä tiiviimmin toiminnan suunnitteluun ja hallintaan. Tärkeätä on myös löytää mahdolliset vielä heikosti tunnetut tai tunnistamattomat haitat sekä varautua niiden torjuntaan jo ennen hallinnollisia toimia. Yh-

teiskunnallisten tekijöiden merkitys todennäköisesti kasvaa verrattuna nykyisiin teknis-taloudellisiin painotuksiin.

Laitosten ulkonäkö ja sopeutuminen maisemaan on tullut entistä merkittävämmäksi. Sijoitus kaupunkialueelle edellyttää todennäköisesti jatkossa nykyistäkin enemmän arkkitehtonisten seikkojen huomioonottamista ja mahdollisimman hyvin kaupunkimaiseman ja -rakenteen osana toimivan laitosratkaisun valintaa. Kaupunkikuvaan sopeuttaminen vaatii yksilöllisiä, kunkin sijoituspaikan ehdoilla tehtyjä arkkitehtonisia suunnitelmia eikä siten ole kovinkaan pitkälle yleisesti ohjeistettavissa.

4 TUOTANTOVAIHTOEHDOT

4.1 HIILEN PÖLYPOLTTO

4.1.1 Tekniikan kehitystaso

Hiilen pölypoltto on tunnettua perustekniikkaa, mutta sen kehitys ei ole pysähtynyt. Laitosten hyötysuhdetta parannetaan jatkuvasti käyttämällä entistä korkeampia höyryn lämpötiloja ja paineita. Vuosina 1991 - 1996 käyttöön otetuista 83 hiilivoimalaitoksesta 28:ssa on ylikriittinen prosessi. Vuosina 1997 - 2000 rakennettaviksi suunnitelluista 35 pölypolttolaitoksesta ylikriittinen prosessi on jo 29:ssä (Couch).

Esimerkkejä vuosina 1997 - 1998 valmistuvista yksiköistä ovat Nordjyllandsverketin kahdella välitulistuksella varustettu laitos, jossa tuorehöyryn paine on 290 bar, lämpötilat 580/580/580 °C ja nettohyötysuhde noin 47 %, Haramachi 1 (höyrynpaine 250 bar, lämpötilat 566/593) ja Haramachi 2 Japanissa (höyrynpaine 250 bar, lämpötilat 600/600). Parhailtaan ollaan kehittelemässä ratkaisua, jossa tuorehöyryn paine on 325 bar, lämpötilat 610/630/630 °C ja nettohyötysuhde noin 50 %. Tasa, jolle hyötysuhdetta voidaan nostaa, on vaikea arvioida. Paineiden ja lämpötilojen nosto edellyttää entistä parempia materiaaleja ja nostaa laitoksen hintaa. Toisaalta pienempi polttoaineen kulutus laskee käyttökustannuksia.

Höyrynpaineiden nosto on heikentänyt säädettävyyttä ja lisännyt huolto- ja korjaustarvetta (Salokoski & Äijälä 1996). Huolto- ja korjaustarpeen lisääntymiseen on vaikuttanut osaltaan se, että tekniikka on jatkuvasti kehittymässä, jolloin kaikista uusista ratkaisuista ei vielä käytön alkuvaiheessa ole riittävästi kokemusta. Jo rakennetuista laitoksista saatujen kokemusten perusteella käytettävyys on noin kymmenen käyttövuoden kuluttua lähes samalla tasolla kuin perinteisissä pölypolttolaitoksissa (Couch 1997).

Myös paineistettua pölypolttoa tutkitaan, mutta tekniikan kehitys on melko alkuvaiheessa. Saksassa ollaan suunnittelemassa 10 MW:n pilottilaitosta, joka otettaisiin käyttöön vuonna 1999 (Bergmann et al. 1997). Tekniikassa tuhka poistetaan sulana ja savukaasut kuumapuhdistetaan alkaleista ja johdetaan kaasuturbiiniin. Typen ja rikin oksidien poistamiseksi tarvitaan samantyyppiset puhdistuslaitokset kuin paineistamattomassa pölypoltossa. Tekniikalla uskotaan saavutettavan yli 50 %:n nettohyötysuhde.

4.1.2 Päästöt ja päästöjen käsittelyn sivutuotteet

Kaasujen puhdistuksessa on mahdollista saavuttaa jo nykyiset ilmanlaadun vaatimukset täyttävät päästötasot. Ongelmaksi on entistä enemmän noussut tehokkaas-

sa puhdistuksessa syntyvien sivutuotteiden määrä ja sijoitettavuus sekä kokonaisuuden hallinta. Pölypoltossa syntyvien sivutuotteiden määrään ja laatuun vaikuttavat mm. hiilen laatu, palamisolosuhteet ja kaasujen puhdistamiseksi käytettävät menetelmät. Tavoitteena olisi oltava prosessin optimointi siten, että saadaan mahdollisimman helposti jatkokäytettävissä tai sijoitettavassa muodossa olevia sivutuotteita.

Hiukkaset erotetaan sähkö- tai kuitusuodattimilla ja rikkidioksidi poistetaan kaasuista erillisessä puolikuiva- tai märkämenetelmällä toimivassa laitoksessa. Sähkösuodatin poistaa hiukkasten ohella tehokkaasti myös hiukkasiin sitoutuneet raskasmetallit. Ongelmaksi jäävät kuitenkin kaasumainen elohopea ja pienhiukkaset, joiden poistossa kuitusuodattimilla voidaan päästä jonkin verran parempiin poistotehoihin. Kaasumaisille yhdisteille pelkkä kuitusuodatin ei kuitenkaan ole kovin tehokas. Syntyvien lento- ja pohjatuhkien hyötykäytöstä on jo nykyisin paljon kokemusta, mutta mm. ominaisuusvaihtelut ja selvien tuotekriteerien puuttuminen hankaloittavat edelleen käyttöä.

Typpioksidipäästöjen rajoittamiseen on toistaiseksi käytetty pääasiassa palamisteknisiä keinoja, joilla parhaimmillaan on päästy 70 - 80 %:n päästövähennykseen (Hämälä 1995). Uusimmissa laitoksissa tyypipäästöjen rajoittamiseen käytetään selektiivistä katalyyttistä (SCR) menetelmää, jolla voidaan päästä 80 - 90 %:n pädätysasteeseen. Keskimääräiset päästötasot pölypolttokattiloissa ovat:

Ei rajoitustoimia	300 - 450 mg NO ₂ /MJ
Polttotekniset muutokset	180 - 230 mg NO ₂ /MJ
SCR	70 mg NO ₂ /MJ

Rikinpoiston ongelmana on erityisesti puolikuivamenetelmässä syntyvän ominaisuusiltaan heikosti hyötykäyttöön soveltuvan rikinpoistotuotteen sijoitus. Rikinpoistotuotetta on jonkin verran käytetty maarakennustarkoituksiin lentotuhkaan sekoitettuna. Kloridipitoisuus kuitenkin rajoittaa käyttöä, koska kloridin liukenevista ja leviämistä maaperään ei juurikaan pystytä rajoittamaan. Märkämenetelmän rikinpoistokipsi pystytään toistaiseksi markkinoimaan rakennuslevyteollisuuteen. Myös puolikuivamenetelmän rikinpoiston lopputuotteen hapettaminen kipsiksi on tutkimusten mukaan mahdollista. Rikinpoistokipsin tuotannon suurin uhka on markkinoiden kyllästyminen. Tällöin vaihtoehtoiset rikinpoistomenetelmät, joissa lopputuotteena on esimerkiksi alkuainerikki, saattavat saavuttaa sijaa markkinoilla. Näiden menetelmien käyttöä ovat toistaiseksi rajoittaneet monimutkaisuus kalkkipohjaisiin menetelmiin verrattuna sekä alkuainerikin käyttömahdollisuuksien puute.

4.1.3 Ympäristö- ja turvallisuusriskit

Pölypolttoa pidetään turvallisuuden kannalta suhteellisen riskittömänä tekniikään eikä riskinarviointiin ole kiinnitetty suurta huomiota. Myöskään ympäristöriski-

analyyssejä ei ole edellytetty. Katalyyttiseen typenpoistoon käytettävän ammoniakkin kuljetus ja varastointi voi erityisesti kaupunkiolosuhteissa olla merkittävä riskitekijä.

4.1.4 Kehitystarpeet ja käynnissä olevat tutkimukset

Kehittyneempien materiaalien tarve on yhteistä lähes kaikille energiantuotantotekniikoille ja materiaalitutkimusta tehdäänkin eri puolilla maailmaa. Ylikriittisen höyryvoimalaitostekniikan soveltamisessa edelläkävijämaita ovat olleet erityisesti Tanska ja Japani. Tanskassa käynnissä olevassa kehitysohjelmassa on tavoitteena hiilivoiman hyötysuhteen nostaminen. Siihen liittyvässä eurooppalaisessa yhteisprojektissa on tavoitteena päästä 55 %:n nettohyötysuhteeseen vuoteen 2010 mennessä erityisesti materiaaleja kehittämällä (Kjaer 1996). Mikäli mahdollista, pyritään rakentamaan demonstraatiolaitos, jossa päästään 37,5 Mpa:n paineeseen ja lähelle 700 °C:n höyryn lämpötilaa. Materiaalien kehitystyössä aktiivisimpia ovat olleet Japani ja EU mm. COST-hankkeissa.

TEKES aloitti vuonna 1997 Materiaalit energiateknologian palveluksessa -teknologiaohjelman, jonka aihealueina ovat mm. korkealämpötilan prosessit, uudet energiantuotantoprosessit ja matalalämpötilan prosesseihin liittyen mm. monitorointi, korroosionesto ja komposiittien käyttösovellukset.

Paineistetun pölypolton kehitys on vielä melko alkuvaiheessa. Kehitystyössä ovat tavoitteina mm. sulan tuhkan poiston vaatimia korkeita (1 400 - 1 600 °C) lämpötiloja kestävien materiaalien kehittäminen erityisesti tuhkan ja savukaasujen kanssa kosketuksissa oleville pinnoille, alkalipitoisuuksien laskeminen kaasuturbiinien sallimalle tasolle ja korkeissa lämpötiloissa syntyvän termisen typen pitoisuuksien minimointi, epäpuhtauspitoisuuksien vähentämistoimien välisten vuorovaikutusten selvittäminen ja optimaalisen kaasunkäsittely- ja puhdistusjärjestelmän kehittäminen (Hannes et al. 1997).

Päästöjen käsittelyä kehitettäessä on tärkeää optimoida epäpuhtauksien poisto siten, että päästään kokonaisvaikutuksiltaan mahdollisimman haitattomaan menetelmään. Kehitystarpeita arvioidaan tarkemmin kohdassa 6.4.

4.2 ILMANPAINEN KIERTOLEIJUPOLTTO

4.2.1 Tekniset ominaisuudet ja kehitystaso

Leijupolttotekniikka sietää hyvin polttoaineen laatuvariaatioita, koska petimateriaalin osuus ja pedin lämpökapasiteetti ovat suuret verrattuna polttoainemäärään. Tekniikka soveltuu siksi monille polttoaineille ja polttoaineseoksille, kuten erilaisille hiililaaduille, turpeelle ja puujätteille sekä niiden seoksille. Muunneltavuus on hyvä ja polttoaineen vaihto yksinkertaista, jos laitos on alun perin suunniteltu monipolttoainekäyttöön. Tiettyjä lisälaitteita voidaan asentaa myös jälkikäteen. Suuret muutokset alun perin suunnitelluista polttoaineista ovat kuitenkin hankalia.

Tekniikka on jo vakiintunutta, mikä takaa sen, että laitteistojen ja materiaalien soveltuvuus tunnetaan eikä niistä aiheutuvia ylimääräisiä käytettävyysoongelmia enää ole. Kehitystavoitteita ovat mm. tekniikan kokoluokan nostaminen, entistä yksinkertaisempien kattilatyyppeiden kehittäminen ja hyötysuhteen nosto höyrynarvoja nostamalla. Kiertoleijutekniikassa suurimmat tähän mennessä rakenteilla olevat laitokset esimerkiksi Foster Wheeler Energialla ovat sähköteholtaan 2 x 250 MW ja suurin tarjottava laitoskoko 350 MW sähkötehoa. Kattilatekniikan yksinkertaisuudesta on esimerkkinä markkinoille tullut entistä vähemmän tilaa vaativa Compact-kattilatyyppejä (Anon 1995b). Siinä vesijäähdytteinen sykloni on integroitu läheisesti tulipesän kanssa. Kattilatyyppejä on vielä scale-up-vaiheessa (suurin lämpöteho 122 MW vuoteen 1997 mennessä) mutta syrjäyttäneen perinteisen kierto-leijukattilan noin viiden vuoden kuluessa.

Kannattavan laitoskoon alaraja on kierto-leijutekniikassa 30 - 50 MW polttoainetehoa. Kerrosleijukattila soveltuu pienempiinkin laitoksiin. Automaatioaste on korkea, ja periaatteessa laitos voi toimia yön yli miehittämättä, mitä Ruotsissa jo vaaditaan. Miehittämätön toiminta ei kuitenkaan ole suositeltavaa, koska varsinkin päästövaatimuksissa pysyminen vaatii jonkun valvomoon.

Hyötysuhde ja hiilidioksidipäästöt ovat hiilen poltossa suunnilleen samalla tasolla kuin pölypoltossa. Hiilidioksidipäästöihin voidaankin vaikuttaa lähinnä käyttämällä hyväksi tekniikan soveltuvuutta seos- ja monipolttoainekäyttöön.

4.2.2 Päästöjen käsittelymenetelmät ja saavutettavat päästötasot

Tekniikalla päästään suhteellisen alhaisiin typpipäästötasoihin, koska palamislämpötila on matala (870 - 880 °C) eikä termistä tyypeä siksi synny. Typpioksiduulia muodostuu kuitenkin enemmän kuin pölypoltossa (Couch 1997). Uusissa laitoksissa typpipäästöjen vähentämiseen käytetään ammoniakki-vesiliuosta, joka syötetään sykloniin. Käyttömäärä on moolisuhteena ilmaistuna $\text{NH}_3/\text{NO}_x = 1 \dots 2$. Ammoniakki toimii tehokkaimmin yli 800 °C lämpötilassa. Vesiliuosta käyttämällä vältetään kaasumaisen ammoniakkin käytön riskit. Myös urealiuosta on käytetty, mutta se saattaa aiheuttaa tukkeutumisoongelmia ja syaanivedyn muodostusta.

Tyypin poiston toimivuuden varmistamiseksi on uusimpiin laitoksiin asennettu savukanavaan minikatalyytti. Katalyytit ovat suhteellisen herkkiä toimintahäiriöille, kuten palamislämpötilan nousulle tai korkeille epäpuhtauspitoisuuksille (mm. alkalimetallit ja tietyt raskasmetallit). Hiilen kierto-leijupoltossa ei katalyyttejä ole käytetty vielä niin kauan, että kestoikää voitaisiin arvioida. Biopolttoaineilla alka- lit ovat joissakin tapauksissa aiheuttaneet ongelmia jo 2 000 käyttötunnin jälkeen.

Saavutettavat NO_x -tasot hiilen poltossa ovat:

Ilman lisätoimia	100 - 150 mg/MJ
SNCR-menetelmä	70 mg/MJ
SNCR + SCR-menetelmä	20 mg/MJ

Matalasta lämpötilasta johtuen raskasmetalleista jää tuhkaan suurempi osa kuin pölypoltossa. Myös helpoimmin haihtuvasta elohopeasta 50 - 80 % voi jäädä tuhkaan. Hienoin lentotuhka jää syklonin jälkeen savukaasuihin, ja se erotetaan yleensä sähkösuodattimella.

Rikki sitoutuu petimateriaalina käytettävään kalkkiin tai dolomittiin. Tehokas rikinpoisto vaatii kalkkiylimäärän (Ca/S-moolisuhde yleensä 2 - 3). Rikinpoistossa voidaan suhteellisen helposti päästä 50 mg/MJ tasolle. Pienemmätkin pitoisuudet ovat mahdollisia, mutta tällöin kalkin kulutus ja tuhkamäärä kasvavat huomattavasti ja samalla myös laitetarve kasvaa.

4.2.3 Jätteet ja niiden sijoitettavuus

Leijupolton tuhka on huokoista, kalkkipitoisuuden vuoksi alkalista (pH noin 12) ja voimakkaasti lujittuvaa. Metallien liukoisuudet ovat jonkin verran pienempiä kuin pölypolton tuhkasta, koska matalan lämpötilan takia suurempi osa metalleista jää inerteiksi oksideiksi. Myös alkalisuus pienentää useiden metallien liukoisuutta, mutta mm. molybdeenin ja seleenin liukoisuus voi kasvaa alkalisissa olosuhteissa. Liukoisuuden kannalta hankalin aine on kuitenkin kalsiumsulfaatti. Pitkän ajan kuluessa alkalisuuden väheneminen voi muuttaa tuotteen ympäristöominaisuuksia.

Suomessa kivihiilen leijupolton tuhkat sijoitetaan pääosin läjitysalueille, joissa niitä käytetään mm. puolikuivamenetelmän rikinpoistotuotteen stabilointiin. Sekapoltto vaikeuttaa usein tuhkien hyödyntämistä, koska tuhkan hiili- tai epäpuhtauspitoisuudet ovat suurempia.

4.2.4 Kehitystarpeet

Ylikriittisiin höyrynpaineisiin pääsy on hyötysuhteen parantamismahdollisuuksien takia tavoitteena myös leijupoltossa. Paineistaminen vaatii korkeita lämpötiloja kestävien materiaalien kehitystä. Myös jätteiden poltto edellyttää tavallista kestävämpiä materiaaleja. Tähän liittyen TEKES on äskettäin käynnistänyt Materiaalit energiateknologian palveluksessa -teknologiaohjelman.

Kaasujen käsittelyssä ajankohtainen ongelma on typenpoistokatalyyttien kestävyys silloin, kun poltetaan biopolttoaineita tai jätepoltoaineita ja savukaasuissa on katalyyttimyrkkyinä toimivia alkali- tai raskasmetalleja. Myös rikinpoiston optimointi siten, että mataliin päästötasoihin päästään nykyistä pienempiä kalkkimääriä käyttäen, kuuluu kehityskohteisiin. Myös leijupolton tuhkien hyötykäyttömahdollisuuksia olisi pyrittävä kehittämään. Hiilituhkat ovat seospolton tuhkia helpommin hyödynnettäviä, koska ne ovat tasalaatuisempia ja sisältävät useimmiten vähemmän palamatonta hiiltä ja/tai haitallisia epäpuhtauksia.

4.3 HIILEN PAINEISTETTU LEIJUPOLTTO

4.3.1 Tekniset ominaisuudet ja kehitystaso

Paineistetun leijupolton kehittäminen aloitettiin 1970-luvulla. Ensimmäisenä tutkittiin paineistettua kerrosleijuratkaisua (PFBC) Letherheadin ja Grimethorpen koelaitoksilla Englannissa. Myöhemmin Ahlström/Foster Wheeler alkoi kehittää paineistettua kiertoleijupolttoa (PCFB).

Jo toiminnassa tai suunnitteilla olevat laitokset ja niiden käyttöönottovuodet on esitetty taulukossa 1. Paineistettua kerrosleijutekniikkaa on jo kokeiltu käytännön mittakaavassa ABB:n laitoksissa. Paineistetun kiertoleijutekniikan (PCFB) ensimmäinen demonstraatiolaitos on suunnitteilla Yhdysvaltoihin Lakelandin kaupunkiin. Toimittajana on Foster Wheeler Energia. Laitoksen sähköteho on 157 MW, ja laitos käynnistyy vuonna 2000. Myöhemmin laitos muunnetaan "Topping"-laitokseksi, jossa PCFB-laitokseen yhdistetään osittaiskaasutin ja kaasunpolto ennen kaasuturbiinia. Kaasun lämpötila saadaan näin uusien kaasuturbiinien sallimalle tasolle, jolloin prosessin hyötysuhdetta voidaan nostaa. Topping-tekniikka edellyttää kaasun tehokasta puhdistusta.

Taulukko 1. Toiminnassa tai suunnitteilla olevat paineistetut leijupolttolaitokset (Anon 1997a).

Laitos	Laitevalmistaja	Tekniikka	Polttoaineteho, MW	Sähköteho (MW)/lämpöteho (MW)	Käyttöönottovuosi
Tidd, USA (koelaitos)	ABB	PFBC	200	70/-	1991 -1995**
Värtan, Tukholma	ABB	PFBC	2 x 200	135/ 225	1992
Escatron, Espanja	ABB	PFBC	200	73 / -	1993
Wakamatsu, Japani	ABB	PFBC	200	71/ -	1994
Karita, Japani	ABB/ IHI	PFBC	800	350/ -	1999*
Gottbus, Saksa	ABB	PFBC	200	74/ 220	1999*
Tomato, Japani	Mitsubishi Heavy Ind.	PFBC	200	85/-	1997*
Oshaki, Japani	Hitachi	PFBC		2x250/?	1999*
Lakeland, USA demonstraatiolaitos	Foster Wheeler	PCFB/ Topping		157/	2000*

* Suunniteltu käyttöönottovuosi

** Käyttöaika

Paineistettujen leijulaitosten investointikustannusten arvioidaan olevan noin 10 - 20 % alle nykyaikaisen pölypolttolaitoksen investoinnin. Hintaero johtuu pääosin tulipesän ja kattilarakenteiden pienenemisestä paineen kasvaessa. Samalla laitoksen hyötysuhdetta voidaan korottaa 2 - 4 % verrattuna vastaavilla höyryarvoilla toimivaan pölypolttolaitokseen. NykYTEKNIKALLA paineistettu leijupolttO voi olla kilpailukykyinen vaihtoehto ilmanpaineiselle, jos laitoksen sähköteho on yli 100 MW.

Paineistetut leijutekniikat sopivat erityisesti tapauksiin, joissa voimalaitoksen kattila on käyttökänsä lopussa mutta höyryturbiinilaitos on vielä kohtuullisen hyvässä kunnossa. Tällöin paineistetun polton kattila voidaan rakentaa pieneen tilaan ahtaalle vanhalle voimalaitostontille. Uusi laitos voi käyttää olemassa olevia polttoaine-tuhkajärjestelmiä ja sähkö-lämpökytkentöjä. Uuden tekniikan käyttöönoton ansiosta voimalan päästöt pienenevät, vaikka laitoksen teho kasvaa. Toisaalta n. 20 - 25 % tehon nosto, joka saavutetaan rakentamalla höyryturbiini "täyteen", ei ole niin suuri, ettei entisen voimalan infrastruktuuri olisi riittävä.

4.3.2 Päästöt ja jätteet

Paineistetun leijupolton NO_x -päästöt ovat luontaisesti pienet, koska polttolämpötilat ovat matalia (850 - 900 °C). Paineistetussa kiertoleijupoltossa on lisäksi mahdollista vaiheistaa polttoilman tuonti, jolloin NO_x -päästöt pienenevät edelleen. Tyypilliset päästömäärät ovat 50 - 200 mg/MJ (6% O_2), polttoaineesta ja ajotavasta riippuen. Eräissä kerrosleijulaitoksissa on käytössä minikatalyytti NO_x -lisäpoistoa varten ja saavutettava päästötaso 15 - 50 mg/MJ. Paineistetussa kiertoleijuprosessissa on mahdollista käyttää yksinkertaisempaa termistä nestemäisen ammoniakkin ruiskutukseen perustuvaa SNCR-menetelmää, jossa ei tarvita katalyyttia.

Rikinsidonta tapahtuu samoin kuin ilmanpaineisessa leijupoltossa eli syöttämällä kalkkikiveä tai dolomiittia tulipesään yhdessä polttoaineen kanssa. Paineistetussa kerrosleijulaitoksessa 90 %:n vähennys saavutetaan kalkki-rikkisuhteella 1.5 - 2.0 ja vastaavassa kiertoleijuratkaisussa jo Ca/S-suhteella 1.0 - 1.5.

Toisin kuin ilmanpaineisessa leijupoltossa, paineistetuissa leijuprosesseissa kalkkikiven sisältämä kalsiumkarbonaatti ei kalsinoidu, vaan rikinpidätyksreaktiot kulkevat suoraan karbonaatista sulfaattiin. Näin ei reagoimattomasta kalkkikivestä synny CO_2 -päästöjä. Tällä on merkitystä, jos polttoaine sisältää runsaasti karbonaatteja (esimerkiksi Viron "palava kivi") tai rikkiä, jolloin tarvitaan suurta kalkkiannostusta.

Pölynerotus

ABB käyttää kerrosleijulaitoksissa kaksivaiheista syklonierotinta ennen kaasuturbiinia. Kaasuturbiinit on muutettu siten, että ne sietävät syklonien läpäisemää hienoa pölyä (n. 200 ppm). Lopullinen pölynpoisto tapahtuu vasta kaasuturbiinin ja jätelämpökattilan jälkeen tavanomaisessa letkusuodattimessa. Tämä ratkaisu rajoittaa kaasuturbiinin valintaa ja on aiheuttanut myös jonkin verran eroosio- ja likaantumisongelmia turbiinissa.

Toinen mahdollisuus on puhdistaa savukaasut ennen turbiinia niin hyvin, että voidaan käyttää vakioturbiineja eikä kaasuja tarvitse enää toistamiseen puhdistaa turbiinin jälkeen. Sekä Foster Wheeler että Mitsubishi Heavy Industries ovat valin-

neet tämän ratkaisun. Myös Hitachi on varautunut suodatintekniikan käyttöön mutta aikoo käynnistää ensimmäisen laitoksensa ennen turbiinia asennettavia sykloneja käyttäen. Suodintekniikan etuna ovat suurempi valinnanvara turbiineissa ja jonkin verran parempi kokonaishyötysuhde. Kynnyskysymyksenä on kehitettyjen suodatinratkaisujen käyttöluotettavuus.

4.3.3 Kehitystarpeet ja suunnat

Paineistetun kerrosleijutekniikan kehityksessä päätavoite on yksikkökoon kasvattaminen. Paineistettua kiertoleijutekniikkaa ei vielä ole kaupallisesti demonstroitu, joten tavoitteena on ensimmäisen täyden mittakaavan laitoksen rakentaminen ja tekniikan demonstrointi. Tärkeää on myös keraamisiin suodattimiin perustuvan hiukkaserotustekniikan luotettavuuden demonstrointi.

Samanaikaisesti paineistetun kiertoleijulaitoksen kehitystyön kanssa FW kehittää tähän tekniikkaan perustuvaa ns. Topping-laitosta, jossa hyötysuhdetta edelleen korotetaan kaasuttamalla osa polttoainevirrasta niin, että saadulla tuotekaasulla voidaan nostaa savukaasujen lämpötilaa ennen kaasuturbiinia 100 – 200 °C:seen. Suunnitelmien mukaan myös tätä tekniikkaa demonstroidaan Lakelandin laitoksessa, joka tullaan varustamaan kaasuttimella vuonna 2002. Samalla tavoin kuin pölypoltossa, siirrytään myös paineistetussa leijupoltossa ylikriittisiin höyryturbiineihin. Molemmissa voidaan käyttää samantyyppisiä turbiiniratkaisuja.

Kuten muissakin tekniikoissa, käyttö kaupunkialueella edellyttää, että syntyvät sivutuotteet pystytään käyttämään mahdollisimman lähellä tuotantokohdetta. Siksi sivutuotteiden käyttömahdollisuuksien selvittäminen ja käytön edistäminen on myös merkittävä tutkimuskohde.

4.4 HIILEN JA BIOPOLTTOAINEIDEN KAASUTUS

Kaasutuskombilaitoksessa (IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle) kiinteä polttoaine muutetaan paineistetussa kaasuttimessa polttokaasuksi, joka puhdistetaan ja poltetaan kaasuturbiinin polttokammiossa. Savukaasujen energia käytetään höyrykehitykseen höyryturbiinia varten. Prosessin etuja ovat sähköntuotannon hyötysuhteen parantuminen, rakennusasteen nosto yhdistetyssä sähkön- ja lämmöntuotannossa ja mahdollisuus pieniin savukaasupäästöihin ja heikkolaatuisten polttoaineiden käyttöön. Kaasutuksen hapettimena voidaan käyttää joko hapeta tai ilmaa.

Happikaasuttimissa tuotekaasu jäädytetään ennen puhdistusta ja polttoa, jolloin kaasunpuhdistus on helppo toteuttaa. Jäädytys ja hapen valmistus huonontavat kuitenkin hyötysuhdetta ja samalla investointikustannukset kasvavat. Happikaasutuslaitoksen oman energiantarpeen arvioidaan olevan 10 - 15 %, kun se ilmakaasutuslaitoksissa jää alle 8 %:n (Couch 1997). Siksi tekniikan sovellutusten on oltava suurimittakaavaisia hiilen tai pohjaöljyn kaasutuslaitoksia. Happikaasutuksen etuna on pienempi käsiteltävä kaasumäärä, jolloin myös kaasutin ja kaasunkäsitte-

lylaitteistot ovat pienempiä kuin ilmakaasutuksessa. Yhdysvalloissa on toiminnassa kaksi vuosina 1995 ja 1997 käynnistynyttä demonstraatiolaitosta. Myös Buggenum Hollannissa on jo toimiva laitos (taulukko 2).

Ilmakaasuttimet toimivat yleensä leijupolttoperiaatteella. Ne voivat olla paineistettuja tai ilmanpaineisia. Tuotekaasua jäädytetään ennen kaasunpuhdistusta vain niin paljon, että alkalihöyryt pystytään poistamaan. Hyötysuhde on parempi kuin happikaasutuksessa ja kustannukset pienemmät. Tekniikka soveltuu happikaasutusta pienempiin laitoksiin ja myös mm. biomassoilte. Kuumapuhdistus vaatii kuitenkin vielä jatkokehittelyä.

Taulukko 2. Toiminnassa ja rakenteilla olevia hiiltä kaasuttavia IGCC-demonstraatiolaitoksia (Bergmann et al. 1997).

Laitos	Käytetty tekniikka	Hyötysuhde	Sähköteho, MW	Käyttöönottovuosi
Happikaasutus:				
Buggenum, Hollandi	Shell, läpivirtaus, kaasun kylmäpuhdistus, V 94.2 Siemens	43 %	253	1992, hiilikaasulla 1994
Public Service of Indiana/ DESTEC Wabash River, USA	DESTEC 2-vaiheläpivirtaus, kaasujen kylmäpuhdistus Jälkiasennus olemassa olevaan laitokseen	40 %	262	1995 lopussa
Tampa Electric, Polk County, USA	Texaco, läpivirtaus, kaasun kylmä- ja kuumapuhdistus	42 %	250	1997
Puertollano, Espanja	Prenflo, läpivirtaus, kaasujen kylmäpuhdistus, V94.3 Siemens, polttoaine hiili-pohjaöljyseos	45 %	320	1998 hiilikaasu (1996 maakaasu)
Ilmakaasutus:				
Nakoso, Japani, pilotti	Läpivirtaus, paineistettu, kaasujen kuumapuhdistus		200 t hiiltä/d	1991 - 1996
Sierra Pacific, Pinon Pine, USA	KRW WSV, kaasujen kuumapuhdistus (540 °C)	42 %	95	1997 lopussa
Värnamo	Biomassan kaasutus ja kaasutuskaasun poltto kombivoimalassa, paineistettu leijupoltto kaasutin		6	1993

Käyttökokemuksia on lähinnä Buggenumista sekä kahdesta Yhdysvalloissa jo suljetusta ensimmäisen sukupolven laitoksesta. Buggenumissa kaasuttimen ja muiden laitteiston osien katsotaan toimineen tyydyttävästi ja kaasupäästöissä on saavutettu odotetut tasot. Hiilen konversio on yli 99 % (Bergmann et al. 1997). Suurin ongelma on ollut liekin värähtely, johon ei vielä ole löydetty lopullista ratkaisua. Kokeusten perusteella on esitetty seuraavat arviot seuraavan sukupolven laitosten toteutettavuudesta:

- Sähköteho yhtä kaasutinta käyttäen voidaan nostaa 600 MW:iin.
- Hyötysuhde pystytään nostamaan 50 prosenttiin.
- 600 MW:n laitoksen investointikustannukset ovat samalla tasolla kuin vastaavankokoisen perinteisen, uusimmalla tekniikalla rakennetun hiilivoimalan.
- Laitoskomponenttien ja -järjestelmien yksinkertaistaminen on monilta osin mahdollista.

Koska tekniikka on demonstraatiovaiheessa, on sen käyttöönotto perinteisiä tekniikoita riskialttiimpaa. Lisäksi kustannukset ovat vielä korkeat ja käytettävyys alkuvaiheessa melko huono. Nykyisissä ratkaisuissa myöskään hyötysuhteet eivät ylitä vastaavia perinteisten tekniikoiden kehittyneiden versioiden hyötysuhteita. Hyötysuhde kuitenkin kasvanee nykyisestä selvästi seuraavan sukupolven laitoksissa. Hyötysuhdetta voidaan parantaa korottamalla kaasuturbiinin polttolämpötilaa, parantamalla höyryparametreja ja laskemalla vesi- ja höyrypuolen häviöitä. Etuja ovat myös rakennusasteen kasvu ja matalat päästötasot.

Kaasutuslaitos voidaan liittää olemassa olevaan laitokseen, jolloin kaasu käytetään lisäpolttoaineena esim. hiilikattilassa. Tällöin voidaan kaasuttaa erilaisia biomassoja tai jätemateriaaleja. Lahdessa on vuoden 1998 alussa käynnistynyt Suomen ensimmäinen esimerkkilaitos, jossa jätteellä korvataan 15 % hiilen tai maakaasun käytöstä. Pääosa jätteestä on puupohjaista. Jätteiden kaasutus edellyttää kuitenkin riittävää lajittelua, erityisesti klooria sisältävän materiaalin poistamiseksi. Kloori voi sekä aiheuttaa korroosiota että tuottaa haitallisia poistokaasuja. Toinen vaihtoehto on liittää laitokseen kaasuturbiini kombikytkentään höyryprosessin kanssa, mikäli kaasu täyttää kaasuturbiinin puhtausvaatimukset.

4.4.1 Päästöjen käsittely

Kaasutus vaatii monimutkaisen päästöjen käsittelyprosessin. Hiilen ilmakaasutuksessa leijupoltteknikalla puhdistusprosessi käsittää seuraavat vaiheet: Pääosa rikkistä poistetaan kalkin avulla kaasuttimessa. Savukaasut jäähdytetään (> 540 °C), hiukkaset poistetaan keraamisella suodattimella ja rikki erotetaan rikkinä tai rikki-dioksidina esimerkiksi sinkkioksidisorbenttia käyttäen. Lisäksi tarvitaan toinen hiukkasten poistovaihe ja ammoniakkin tai typpioksidien poisto.

Happikaasutuksessa kaasut puhdistetaan yleensä konventionaalista pesuritekniikkaa käyttäen, mikä kuitenkin vaikuttaa epäedullisesti hyötysuhteeseen. Nakason pilottilaitoksessa rikinpoistoteho oli 79 – 94 %. Pesurin on oltava paineistettu eikä siihen saa joutua kiintoaineita. Pesurijätevesi on puhdistettava, koska jätevesi on mutageenista ja voi sisältää mm. tervoja, fenoleita, bentseeniä ym.

Kaasunpuhdistustekniikka on koelaitoksissa toiminut suhteellisen hyvin ja päästötasot voidaan saada pienemmiksi kuin muissa laitostyypeissä. Hiukkaspäästöjen suodintekniikka kaipaa kuitenkin vielä kehitystä. Kaasunpuhdistuskustannukset ovat 10 - 30 % investointikustannuksista, erityisesti alkuainerikin tuotanto pesuineen ja strippauksineen on kallis. Biopolttoaineille kaasunpuhdistus on jonkin verran yksinkertaisempaa, koska rikinpoistovaihetta ei yleensä tarvita.

Kaasutustuhkien koostumus ja ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti polttoaineen, kaasutustekniikan, käytettyjen lisäaineiden ja hiukkaserotustekniikan perusteella. Paineistetun leijupolttokaasuttimen tuhka sisältää yleensä huomattavasti enemmän palamatonta ainesta kuin kiinteäkerroskaasuttimien tuhka. Hiilen leijupolttokaasutuksen tuhka on samantyyppistä kuin hiilen paineistetun leijupolton tuhka, kun taas ilmanpaineisessa leijupoltossa syntyvä tuhka on reaktiivisempaa kuin paineistetuissa ratkaisuisa, koska kalkin kulutus on suurempi. Tuhkien ominaisuudet ja käytettävyys tunnetaan vielä melko huonosti, koska kokemusta täysimittakaavaisista laitoksista on vähän.

4.5 MAAKAASUKOMBILAITOS

4.5.1 Tekniset ominaisuudet ja kehitystaso

Yhdistetyn kaasu-höyryprosessin käyttö suurissa voimaloissa on vielä suhteellisen uutta. Tekniikka on kuitenkin kehittynyt voimakkaasti erityisesti kombikytkentää varten suunnitelluissa kaasuturbiineissa ja niiden jälkilämpöä hyödyntävissä höyryprosesseissa, mikä näkyy mm. hyötysuhteen paranemisena. Esimerkiksi Helsingin Energian vuonna 1997 valmistuneessa Vuosaaren B-voimalassa sähköntuotannon hyötysuhde on 52 % lauhdetuotannossa. Vastapainekäytössä polttoaineen energiasta saadaan sähköksi 48 % ja lämmöksi 43 %. Uusimpiin kaasuturbiinityyppeihin perustuvissa ratkaisuisa sähköntuotannon hyötysuhde voi nousta 56 - 58 prosenttiin. On myös esitetty arvioita, että ennen vuosikymmenen loppua päästään 60 prosentin hyötysuhteeseen (Anon 1997c).

Hyötysuhteen nosto on mahdollistunut, koska materiaalit ja jäähdytystekniikka ovat kehittyneet siten, että polttokammion lämpötilaa on pystytty nostamaan. Tämä kehitys jatkuu edelleen. Hyötysuhdetta pyritään nostamaan myös lisäämällä kaasuturbiiniin välipoltto ja kehittämällä höyryprosessia, mm. käyttämällä useita painetasoja ja välitulistusta. Laitoksen tilantarve on pienempi kuin hiilen poltossa, koska polttoaineiden ja jätteiden varastointiin ei tarvita tilaa varapolttoainetta lukuun ottamatta. Varapolttoaineena on yleensä öljy, jota on velvoitevarastointilain perusteella varastoitava 3/12 vuoden kaasun käyttöä vastaava määrä, tai vastaava varmistus on hoidettava esimerkiksi vapaalla hiilikapasiteetilla ja hiilivarastolla. Myöskään päästöjen käsittelylaitteistoille ei tarvita tilaa.

Laitoksen toimitusaika on lyhyempi kuin hiilivoimaloissa. Kaasuturbiinit ovat valmistajien standardiyksiköitä, joka on toisaalta etu, toisaalta myös haitta, koska se rajoittaa yksikkökoon valintaa.

Laitosten käyttövarmuudessa saattaa olla vielä jonkin verran parantamisen varaa, koska tekniikka on suhteellisen uutta. Valmistajien pyrkiessä koko ajan korkeampaan polttolämpötilaan hyötysuhteen parantamiseksi on kuumien osien kestävyys ja niiden jäähtymisen toimivuus kriittinen käyttövarmuuden ja myös käyttökustannusten kannalta. Kaasuturbiini soveltuu edelleen huonosti osakuorman ajoon. Käytön joustavuutta voidaan parantaa vain jakamalla tehon tarve usealle koneelle. Etuna on toisaalta se, että kaasuturbiini on nopeasti käynnistettävissä.

4.5.2 Päästöt ja niiden käsittely

Maakaasukombilaitosten päästöissä esiintyy merkittäviä määriä vain typen oksideita ja hiilidioksidia. Typenoksidien päästöt pystytään uusissa voimaloissa laskemaan polttoteknisin keinoin parhaimmillaan tasolle 35 mg/MJ ja vesiruiskutusta käyttäen tasolle 20 mg/MJ asti. Yhteistuotantolaitoksissa vesiruiskutuksen käyttö laskee kuitenkin hyötysuhdetta. Hiilidioksidin päästöt sähkötehoa kohti laskettuna ovat noin 100 g/MJ.

4.5.3 Kustannukset

Investointikustannukset ovat pienemmät kuin hiililaitoksissa, koska kaasuturbiini on sähköteholtaan pääosa kombilaitosta ja sen tehohinta on halpa. Myöskään päästöjen ja polttoaineiden käsittelylaitteita ei tarvita yhtä paljon kuin hiililaitoksissa. Käytön aikaiset työaikakustannukset ovat pienempiä kuin hiilen pölypoltossa, jossa työvuoroon tarvitaan uusimmissakin laitoksissa kolme - neljä henkilöä, kun kaasukombilaitoksissa selvittää kahdella. Polttoaineen hinta sen sijaan on selvästi korkeampi kuin hiilen hinta. Hintasuhde on tulevaisuudessa epävarma. Käytettyjen materiaalien ja kehittyneemmän tekniikan kalleuden vuoksi laitoksen huoltokustannukset ovat suhteellisen korkeat.

Pitkällä aikavälillä kaasun saatavuus ja hinta ovat tärkeimmät polttoainevalintaan vaikuttavat tekijät. Maailmanlaajuisten hiilidioksidipäästöjen vähentämistä ajatellen maakaasu on eräänlainen välivaiheen polttoaine, jonka vaikutukset kokonaisuuden kannalta eivät välttämättä ole yhtä positiivisia kuin vaikutukset joidenkin teollistuneiden maiden hiilitaseisiin.

4.5.4 Kehitystarpeet

Maakaasun käyttöön liittyvät kehitystarpeet liittyvät lähinnä materiaalien ja turbiiniratkaisujen kehitykseen. Kaasuturbiinivalmistajia ei ole Suomessa. Suomessa valmistetaan kuitenkin kattiloita ja monia apulaitteita.

4.6 SEKAPOLTTO

Hiilen sekä erilaisten bio- ja jätepolttoaineiden sekakäyttö tulee tulevaisuudessa olemaan yksi tutkimuksen painopistealueista. Sekakäyttö antaa mahdollisuuden hyödyntää biomassaa laitoksissa, joille se ei yksinään riitä polttoaineeksi. Kaatopaikkatilan vähentyessä ja kustannusten noustessa paineet jätteiden polttoon kasvavat. Jätettä ei kuitenkaan välttämättä ole järkevillä kuljetusetäisyyksillä riittävästi yksinään poltettavaksi.

4.6.1 Jätteiden ja hiilen yhdistetty poltto

Yhdyskuntajätteen, siitä valmistettujen jätepolttoaineiden ja muiden energiapitoisten jätemateriaalien poltto joko erikseen tai sekapolttona kivihiilen tai turpeen kanssa on todennäköisesti yleistymässä myös Suomessa. Jätteisiin lasketaan tässä myös erilaiset puupohjaiset jätteet. Jos kattilaan syötettävästä energiasta alle 30 % on peräisin yhdyskuntajätteestä, ei polttoon nykyisen lainsäädännön mukaan sovelleta yhdyskuntajätteen polton päästönormeja.

Jätteiden polton liittäminen energiantuotantjärjestelmään vaatii koko järjestelmän suunnittelua jätteiden polton vaatimukset ja rajoitukset huomioon ottaen. Toimivien lajittelujärjestelmien luominen edistää yhdyskuntajätteen sekapolton onnistumista. 20 – 30 %:n jäteosuus vaikuttaa yleensä sähkön ja lämmön tuotannon hyötysuhdetta alentavasti ja laitteen käytettävyyttä heikentävästi. Siksi lähtökohtana olisikin ensi sijassa oltava jätteen käsittely, jonka sivutuotteena saadaan myös energiaa. Kokonaisuuden kannalta on parempi keskittää jätteiden poltto muutamiin laitoksiin, jotka on suunniteltu jätepolttoaineiden asettamat vaatimukset huomioon ottaen.

Tuotantotekniikat

Kattilalaitos olisi alun perin suunniteltava sekapolttota varten, koska hiilikattilaan verrattuna vaaditaan olennaisia muutoksia. Polton onnistuminen edellyttää polttoaineiden hyvää sekoittumista ja tasaista syöttöä. Syöttölaitteistot ovat olleet yksi ongelmakohdista silloin, kun olemassa oleva hiilikattila on muutettu sekapolttoon. Biomassapohjaiset materiaalit vaativat runsaasti käsittely- ja varastointitilaa sekä oman polttoaineidenkäsittelyjärjestelmänsä. Kuljetus- ja käsittelyongelmien sekä joissakin tapauksissa myös hajuhaittojen vuoksi jätteiden polttoon käytettävä laitos olisi myös parasta sijoittaa kaupunkien keskusta-alueiden ulkopuolelle.

Leijupolttotekniikan soveltuvuus monipolttokäyttöön ja vaikeille polttoaineille tekee siitä jätteiden sekapolttoon parhaiten soveltuvan vaihtoehdon. Pölypolttolaitokseen verrattuna saavutetaan helpommin matalat päästötasot. Hyvä sekoittuminen, pitkät viipymääjat, stabiili palaminen ja matalat palamislämpötilat luovat olosuhteet, joissa palamattomien hiilivetyjen ja typen oksidien pitoisuudet jäävät pieniksi, raskasmetallit ja syntyvät dioksiinit sitoutuvat tuhkaan ja halogeenit

kalkkiin. Tehokkailla hiukkaserottimilla päästään tällöin jo hyviin epäpuhtauksien poistotehoihin.

Yhtenä mahdollisuutena on jätteen kaasutus ilmanpaineisessa kaasuttimessa ja kaasun syöttäminen olemassa olevaan kattilaan, jolloin syntyvää tuhkaa ei tarvitse sekoittaa hiilituhkaan. Kaasutuskaasun puhdistustarve on kuitenkin selvitettävä ja epäpuhtauksien vaikutukset olemassa olevaan prosessiin arvioitava.

Pienten, alle 10 %:n jätemäärien, esimerkiksi rengas- ja puujätteiden tai maatalouden biomassajätteen, poltosta hiilen pölypolttokattiloissa on melko runsaasti kokemusta (Ekman et al. 1996). Suuret muutokset eivät vielä silloin ole tarpeellisia. 10 %:n ylitys merkitsee mm. jätteen pienen lämpöarvon takia yleensä merkittävää muutostarvetta.

Päästöt ja päästöjen käsittely

Palamisen seurauksena kaasuihin joutuvat epäpuhtaudet, kuten raskasmetallit, alumiini, kloori ja hiilivedyt, sekä palamistuotteena syntyvät dioksiinit aiheuttavat ongelmia erityisesti lajittelemattoman yhdyskuntajätteen poltossa. Poltettavan jätteen laatu on otettava huomioon savukaasujen puhdistusta suunniteltaessa. Päästöjen rajoittamistarpeen lisäksi halogeenit, erityisesti yhdessä monien biopolttoaineiden sisältämien alkaliain kanssa, aiheuttavat korroosiota ja vaativat korkealuokkaisempia materiaaleja. Alkalimetallit voivat myös toimia katalyyttimyrkkyinä ja lyhentää typenpoistokatalyyttien käyttöaika.

Sekapoltto huonontaa useimmiten syntyvän tuhkan laatua ja rajoittaa erityisesti hyötykäyttöä. Raskasmetallien ja mahdollisten orgaanisten epäpuhtauksien lisäksi käytettävyyttä voivat heikentää alkalit, kloridit ja palamaton hiili. Tuhkan käytettävyyteen voidaan osittain vaikuttaa palamisolosuhteiden, polttoaineiden koostumuksen ja polttoainejakauman optimoinnilla. Parhaaseen tulokseen päästään ratkaisulla, joissa kukin polttoaine poltetaan tai kaasutetaan erikseen.

Tutkimustarpeet

Jätteen ja hiilen sekapolto on kokemusta lähinnä leijupolttokattiloista. Niistäkin useimmat kaupallisessa käytössä olevat polttavat puupohjaista jätettä. Sekapoltoon soveltuvat laitteistot vaativat siksi vielä suhteellisen paljon kehitys- ja tutkimustyötä. Tutkimuskohteita ovat esimerkiksi jätteiden vaikutus palamistehoon erityyppisissä kattiloissa, materiaalien kehitys, vaikutukset päästöihin ja tuhkien laatuun sekä järjestelmätarkastelut sekapolton kokonaisvaikutusten ja merkityksen arvioimiseksi erilaisissa tapauksissa (Ekman et al. 1996). Liekki 2 -tutkimusohjelmassa on selvitetty erityisesti PCDD/PCDF-yhdisteiden syntymekanismia ja mahdollisuuksia käyttää dioksiinien syntyä ehkäiseviä inhibiittoreita sekä sekapolton tuhkien käyttäytymistä kattiloissa (Ruuskanen 1997). Dioksiinitutkimusta jatketaan sekä polttokokeilla että tilastollisilla tarkasteluilla.

Koska hiilen ja erityisesti jätteiden koostumus on vaihteleva, olisi tutkittava myös erilaisten seosten polton vaikutusta erilaisissa olosuhteissa. Jätteiden lajittelu, käsittely ja varastointi ennen polttoa olisi optimoitava, erityisesti tapauksissa joissa polttolaitos on lähellä asutusta. Kustannustarkastelujen (myös ulkoisten kustannusten) lisäksi olisi arvioitava jätteiden sekapolton yhteiskunnallista merkitystä mukaan lukien myös eri intressiryhmien asenteet, riskikäsitykset, pelot ym. Tällaisissa tapauksissa on myös päästöjen ja niiden vaikutusten perusteellinen tunteminen erittäin tärkeää.

4.6.2 Puun ja hiilen yhdistetty poltto

Metsäbiomassan ja hiilen yhdistettyä polttoa voidaan monilta osin verrata biomassapohjaisen jätteen ja hiilen yhdistettyyn polttoon. Metsäbiomassa ei kuitenkaan sisällä yhtä paljon haitallisia yhdisteitä kuin monet jätemateriaalit, jolloin savukaasujen puhdistamiseksi ei vaadita erityisratkaisuja. Yleensä kuitenkin tarvitaan samanlaiset kaasunpuhdistuslaitteet kuin hiilivoimalassa. Tuhka on vaikeammin hyödynnettävää kuin hiilituhka eikä se toisaalta sovellu myöskään esimerkiksi metsälannoituskäyttöön. Haitallisten metallien osuudet ovat puutuhkassa pienempiä kuin hiilituhkassa, mutta tuhka sisältää enemmän liukenevaa ainesta.

Laitemateriaaleille metsäbiomassan sekapoltto ei aseta yhtä suuria vaatimuksia kuin jätteiden poltto. Myös laskennallisten hiilidioksidipäästöjen väheneminen ja ratkaisulla saavutettava ympäristömyötäisempi yritysokuva voidaan laskea eduksi. Hyvin lähellä keskusta-alueita sijaitsevilla voimaloilla biomassan kuljetusten aiheuttama liikenne on kuitenkin ongelma. Myös varastointitilaa tarvitaan runsaasti. Biomassan kuivaus saattaa aiheuttaa hajuongelmia ja kuivurijätevedet on johdettava puhdistamoon. Näistä syistä biomassassa soveltuu käytettäväksi lähinnä kaupunkien reuna-alueilla sijaitsevilla voimaloilla, pienemmissä taajamissa tai voimaloissa, joissa on mahdollisuus laivakuljetuksiin.

Tanskassa ja Saksassa ollaan suunnittelemassa voimalaratkaisua, jossa biomassaa ja hiiliä poltetaan omissa kattiloissaan mutta molemmat kattilat on kytketty yhteiseen höyryturbiinilaitokseen (ks. kohta 7.3.3).

4.7 OLEMASSA OLEVIEN LAITOSTEN KEHITTÄMINEN

Erillisen lisäpolttoainetta tuottavan kaasuttimen lisääminen on vanhoissa laitoksissa hyvin toimiva ratkaisu, koska se ei vaadi juuri mitään muutoksia. Kaasulla voidaan tällöin korvata osa kiinteästä polttoaineesta tai maakaasusta.

Vanhan höyryturbiinin käyttö uuden kattilan yhteydessä on usein hyvin mahdollista, koska turbiinit ovat pitkäikäisiä eikä tekniikassa välttämättä ole tapahtunut suuria muutoksia. Toimintatapa on yleinen mm. Yhdysvalloissa, ja sillä saadaan huomattava säästö. Repowering-ratkaisuissa kaasuturbiini liitetään olemassa olevaan

höyryprosessiin joko rakentamalla erillinen jätelämpökattila vanhan laitoksen yhteyteen, lämmittämällä kattilaan menevää syöttövettä kaasuturbiinin savukaasuilla tai käyttämällä kaasuturbiinin savukaasuja höyrykattilan palamisilmana. Myös näiden ratkaisujen yhdistelmiä voidaan käyttää. Ratkaisu suunnitellaan yksilöllisesti laitostyyppistä riippuen.

Paineistettu poltto soveltuu hyvin vanhaan turbiiniin liitettäväksi. IGCC:n rakentaminen vanhaan laitokseen kasvattaa sen sijaan jo sähkötehoa niin paljon, että siirtokapasiteetti ja polttoaineen varastointikapasiteetti eivät sellaisinaan välttämättä riitä.

4.8 OSTOSÄHKÖ JA ERILLINEN LÄMMÖNTUOTANTO

Ostosähkön käyttö on vaihtoehto voimalarakentamiselle erityisesti, jos lisälämmön tarve on pieni tai jos tarvittava lisälämpö voidaan tuottaa muilla keinoin kuin yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa. Tällainen lämmöntuotantovaihtoehto on esimerkiksi jätevesien lämpöä käyttävän lämpöpumppuvoimalan rakentaminen.

Sähkön tuonti muualta vähentää voimalan rakentamisesta ja käytöstä aiheutuvia paikallisia haittoja. Kokonaishaitat vähenevät vain, jos sähkö tuotetaan muualla huomattavasti ympäristöä säästävämmin. Etuja voisivat olla mahdollisuus käyttää uusiutuvia energialähteitä tai sijoittaa voimala välittömästi polttoaineen tuotantoalueen yhteyteen, jolloin esimerkiksi biomassan kuljetusten haitat voidaan minimoida. Jos lämpöä joudutaan tuottamaan erillisessä kaukolämpölaitoksessa, ostosähkön käyttö lisää tuotannon kokonaispäästöjä. Yhteistuotannon edut jäävät pois, mutta osa haitoista siirtyy muualle.

Sähkömarkkinoiden vapautumisen mukanaan tuoma kilpailutilanne saattaa parantaa sähkön ostovaihtoehdon kannattavuutta, jos voidaan välttyä lisäinvestoinneilta tai ainakin lykätä niitä. Investoinnin riskit voidaan näin siirtää muualle. Toisaalta sähkön hintakehitys on heikommin ennustettavissa, jolloin odottamattomat hintamuutokset sekä mahdollisesti sähkön saantimahdollisuuksien heikkeneminen voivat olla riskitekijöitä. Pohjoismaiden sähkömarkkinoilla on nykyisin ylikapasiteettia, mikä mahdollistaa halvan sähkön oston. Ensi vuosikymmenellä kapasiteetin arvioidaan kuitenkin käyvän niukaksi, koska Norjassa uudet vesivoimakohdeet ovat kalliita ja mm. ympäristösyistä hankalasti rakennettavia (KTM 1997b). Ruotsissa taas ydinvoimaloiden sulkeminen lisää tarvetta rakentaa uutta lauhdutusvoimaa. Eurooppalaisten sähkömarkkinoiden avautuminen helpottaa sähkön vientiä Pohjoismaista Eurooppaan, mikä saattaa myös nostaa hintatasoa Suomessa.

Ostosähkön käytön haittojen ja etujen sekä niiden yhteiskunnallisen ja yrityskohdaisen merkityksen arvioimiseksi tarvittaisiin erilaisten tuotantojärjestelmien ympäristö- ja taloudellisten vaikutusten kokonaistarkasteluja. Kuten jätteiden ja hiilen poltossa, näihin olisi sisällytettävä myös yhteiskunnallisen merkityksen laajempi arviointi.

5 POLTTOAINEIDEN VASTAANOTTO JA VARASTOINTI

Polttoaineita varastoidaan yleensä useamman kuukauden tarvetta varten. Velvoitevarastointilain mukaan tuontipolttoainetta käyttävien voimaloiden on varastoitava varapolttoainetta. Sekä kivihiilen että maakaasun käyttäjien on varastoitava 3,5 vuoden tarvetta vastaava polttoainemäärä. Maakaasulaitoksilla varastoitava polttoaine on käytännössä öljyä. Velvoitetta on mahdollista osaksi korvata toisen laitoksen tuotannolla ja lisäämällä sille varastoitavaa polttoainetta.

Polttoaineen varastoinnin ja esikäsittelyn mahdollisia haittoja ovat hiilen pölyäminen, hajuhaitat biopolttoaineiden tai jätteiden käsittelyssä, varastoinnin tilantarve ja vaikutukset maisemaan. Haittoja voidaan ehkäistä siirtymällä suljettuun varastointijärjestelmään esimerkiksi siten, että varastotilat sijoitetaan maan alle tai maanpäällisiin silloihin ja halleihin. Biopolttoaineiden käsittelyssä hajuhaittaa aiheuttaa erityisesti kuivausvaihe. Kuivurin ja prosessiparametrien valinnalla voidaan vaikuttaa puusta haihtuvien orgaanisten päästöjen määrään. Epäsuorassa kuivauksessa päästöt jäävät noin neljäsosaan suoran kuivauksen päästöistä (Setzmann et al. 1993).

Hiilen varastoinnin pölyongelmia ja maisemavaikutuksia voidaan vähentää myös peittämällä pitkäaikaisemmat varastot istutuksin sekä käyttövarastoissa kastelemalla tarvittaessa. Jätepolttoaineiden käyttö kaupunkialueilla vaatii polttoaineen mukaisen kuljetus-, varastointi- ja syöttöjärjestelmän erityisesti, jos jäte sisältää hajuhaittaa aiheuttavaa tai mahdollisesti terveydelle haitallista materiaalia. Näiden järjestelmien suunnittelusta on kokemusta varsinaisissa jätteenpolttolaitoksissa.

6 PÄÄSTÖT JA NIIDEN KÄSITTELY

6.1 PÄÄSTÖT YMPÄRISTÖÖN

Energiantuotantolaitosten päästöihin vaikuttavat ennen kaikkea epäpuhtauksien pitoisuudet polttoaineessa, polttotekniikka ja päästöjen käsittelymenetelmät. Hiilidioksidipäästöihin vaikuttaa lisäksi polttoaineen hiilipitoisuus. Käsittelymenetelmien kehittyessä päästöjä ilmaan on pystytty rajoittamaan ja samalla tuotantotekniikoiden välisiä päästöeroja pienentämään. Päästöjen käsittelytekniikat ovat kehittyneet sitä mukaa, kun päästöille on alettu asettaa rajoitusvaatimuksia. Tämän seurauksena rajoitustekniikkaa on kehitetty yhdelle epäpuhtaustyypille kerrallaan eikä epäpuhtauksien poiston vaikutuksia koko tuotantojärjestelmän ole pystytty optimoimaan. Tehdyt parannukset ovat saattaneet aiheuttaa uusia ongelmia, kuten suurten jätemäärien ja hankalasti sijoitettavien jätteiden syntymistä. Myöskään puhdistustekniikoiden välisiä vuorovaikutuksia ei ole pystytty ottamaan riittävästi huomioon, kun tekniikat on optimoitu yhdelle komponentille kerrallaan.

Hiilidioksidia, rikkidioksidia, typen oksideita ja hiukkasia on suurten määrien ja merkittävien haittavaikutusten takia pidetty ilmaan joutuvista päästöistä haitallisimpina. Jatkossa tultaneen harkitsemaan myös tarvetta rajoittaa kaasumaisten raskasmetallien ja orgaanisten epäpuhtauksien, erityisesti polysyklisen aromaattisten hiilivetyjen, päästöjä. Hiilidioksidin lisäksi kiinnitetään huomiota myös muiden kasvihuonekaasujen, kuten typpioksiduulin ja metaanin, päästöihin. Tulevien rajoitusvaatimusten valmistelussa pyritään ottamaan entistä paremmin huomioon sijoitusympäristön vaatimukset ja epäpuhtauksien vuorovaikutukset. Jäteongelmien vuoksi olisi samanaikaisesti pyrittävä muuttamaan käsittelyprosessit epäpuhtauksien poistoprosesseista hyödyntämiskelpoisten tuotteiden tuotantoprosesseiksi.

6.1.1 Hiukkaset

Hiilen sisältämä palamaton aines poistuu prosessista osittain uunin pohjan kautta pohjatuhkana ja osittain savukaasujen mukana lentotuhkana. Lentotuhkasta pääosa erotetaan suodattimilla loppuosan poistuessa ilmaan hiukkaspäästöinä. Polttotekniikoissa, joissa kattilaan syötetään mineraalista sorbenttia kaasujen puhdistusta varten, myös käytetty sorbentti poistuu tuhkan mukana. Polttoaineen laatu ja polttotekniikka ovat tärkeimmät hiukkasten koostumukseen ja laatuun sekä pohja- ja lentotuhkan suhteelliseen jakaumaan vaikuttavat seikat. Ympäristövaikutusten kannalta merkittäviä tekijöitä ovat mm. tuhkan hiukkaskokojakauma, epäpuhtauspitoisuudet, epäpuhtauksien sitoutuminen tuhkaan ja palamattoman aineksen pitoisuus.

Hiukkasten erotukseen savukaasuista käytetään pöly- ja leijupolttolaitoksissa laitoskohtaisen ratkaisun ja viranomaisvaatimusten määrittämien tarpeiden mukaan

sähkö- tai kuitusuodattimia. Kuitusuodattimet ovat yleistyneet aikaisempaan verrattuna. Paineistetussa tekniikoissa pyritään hyötysuhteen parantamiseksi ensi sijassa hiukkasten kuumasuodatukseen keraamisilla suotimille.

Hiukasmaisten epäpuhtauksien ilmaan joutuvaa osuutta voidaan vähentää tehokkaasti nykyisillä tekniikoilla. Pienhiukkaset ($< 2,5 \mu\text{m}$) erottuvat kuitenkin muita heikommin. Pienhiukkaset ovat terveydelle haitallisempia kuin muut hiukkasjakeet, koska ne pääsevät hengitettäessä keuhkorakkuloihin ja niiden pinnalle on myös adsorboitunut suhteessa eniten raskasmetalleja ja orgaanisia epäpuhtauksia.

Suurten kaupunkien ilman tärkein hiukkaslähde Suomessa on katupöly, kun taas ulkomaiset terveysvaikutuksia koskevat tutkimukset on pääosin tehty kaupungeissa, joissa polttoprosesseista peräisin olevien hiukkasten osuus on merkittävä. Helsingissä arvioitiin 1980-luvun lopussa liikenteen osuudeksi n. 10 % hiukkasista ja energiantuotannon osuudeksi n. 5 %. Energiantuotannon osuus on pienentynyt tästä vielä huomattavasti maakaasuun siirtymisen myötä. Liikenteen ja energiantuotannon päästöissä pienhiukkasosuus on kuitenkin muita lähteitä suurempi, jolloin näiden päästöjen merkitys saattaa olla prosenttiosuutta suurempi.

Tulevien toimien kannalta on tärkeää selvittää hiukkaskokojakauman ja hiukkasten kemiallisen koostumuksen merkitys sekä se, ovatko terveysvaikutukset Suomessa samalla tasolla kuin on arvioitu muualta saatujen tulosten perusteella (Pakkanen et al. 1997). Muita Suomen kannalta tärkeitä selvityskohteita ovat mm. kylmän ilmaston merkitys ja ilman epäpuhtauksien yhteisvaikutukset. Pienhiukkasten Suomessa aiheuttamien haittojen tasoa selvittäviä tutkimuksia on jo aloitettu (Pakkanen et al. 1997, Raunemaa et al. 1997). Niissä selvitetään mm. pääkaupunkiseudun ilmakehässä olevien pienhiukkasten kokojakaumaa, koostumusta ja lähteitä sekä jo käytettävissä olevan mittaustieteen soveltuvuutta Suomen pienhiukkaskuormituksen koostumuksen ja aikakehityksen sekä väestön pienhiukkasaltistumisen arviointiin.

6.1.2 Rikki ja typpi

Rikkidioksidi syntyy suoraan polttoaineen sisältämästä rikistä ja on siksi ongelma ennen kaikkea hiilen ja öljyn poltossa. Myös turpeen polton rikkipäästöjen rajoittaminen saattaa tulla tarpeelliseksi happamoittavia kaasuja koskevien päästövaatimusten kiristyessä. Typen oksideita syntyy polttoaineen sisältämästä tpeestä ja korkeammassa lämpötiloissa myös ilman sisältämästä tpeestä. Matalissa lämpötiloissa toimivissa polttotekniikoissa, ennen kaikkea leijupoltossa, yli 90 % typen oksideista on peräisin polttoaineista. Hiilen leijupolton typpioksidipäästöt ilman rajoitustoimia ovat 70 - 140 mg NO_2/MJ , hiilen pölypoltossa vastaavat päästöt ovat 180 - 700 mg NO_2/MJ .

Korkeammassa lämpötiloissa toimivien tekniikoiden typpioksidipäästöihin voidaan vaikuttaa palamisteknisesti. Tärkein rajoituskeino on polttoilman vaiheistus

polttimilla ja/tai tulipesässä. Pölypolttokattiloissa vaiheistuksella voidaan saavuttaa 180 - 230 mg/MJ päästötaso. Koska vaiheistus vaikuttaa lentotuhkan hiilipitoisuuteen ja voi vaikeuttaa sen käyttöä rakennusteollisuudessa ja lisäksi heikentää sähkösuodattimen erotuskykyä, olisi low NO_x -poltto optimoitava myös tuhkan hiilipitoisuuden suhteen (Hjalmarsson 1992). Palamiseen voidaan vaikuttaa mm. poltintyyppillä, poltinten sijoituksella sekä hiilipölyn ja polttoilman suhteella (Hämälä 1995). Polton optimointia ja optimaalisten typenpoistojärjestelmien suunnittelua voidaan helpottaa tietokonemallinnusta ja simulointia käyttäen.

Typpioksiduulin päästöt ovat konventionaalisissa polttotekniikoissa suhteellisen pienet (< 10 ppm N₂O). Hiilen leijupoltossa N₂O-päästötaso on 20 - 80 ppm. Typenpoisto katalyyttisella tai SNCR-tekniikalla saattaa nostaa typpioksiduulipäästötasoa muutamilla kymmenillä prosenteilla (Hjalmarsson 1992, Soud & Fukasawa 1996). Biopolttoaineiden typpioksiduulipäästöt ovat pieniä.

Rikin ja typen oksidit toimivat happamoittavina kaasuina ja niitä pyritäänkin esimerkiksi EU:n uusia rajoittamisstrategioita suunniteltaessa tarkastelemaan yhdessä. Typen oksidit vaikuttavat myös alailmakehän otsonin muodostukseen yhdessä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kanssa ja rehevöitymiseen yhdessä ammoniakin kanssa. NO₂- ja vähemmässä määrin myös SO₂-pitoisuuksien on muutamissa Suomen kaupungeissa tehdyissä tutkimuksissa todettu olevan yhteydessä hengitystieoireisiin. Mahdollisesti typpidioksidilla ja hiukkasilla on myös synergiavaikutuksia (Timonen 1997).

6.1.3 Kasvihuonekaasut

Kasvihuonekaasuja ovat maapallon säteilyenergiatasetta ja sitä kautta ilmastoa muuttavat hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄), typpioksiduuli (N₂O) ja halogenoitdut hiilivedyt. Kaksi kolmannesta ihmisen toiminnan aiheuttamasta ilmastomuutosuhasta aiheutuu hiilidioksidipäästöistä, joiden merkittäviä lähteitä ovat fossiilisten polttoaineiden käyttö ja metsien hävittäminen. Energiantuotanto on myös merkittävä typpioksiduulipäästöjen lähde. Energiantuotannon metaanipäästöt ovat peräisin lähinnä pienpoltosta sekä maakaasun ja hiilen tuotannosta.

Hiilidioksidia syntyy polttoaineen sisältämän hiilen palaessa. Polttoainetalouden parantamispyrkimykset hyötysuhdetta nostamalla ovat sopusoinnussa hiilidioksidipäästöjen rajoittamistavoitteiden kanssa. Hyötysuhteen nostolla on myös monia muita positiivisia ympäristövaikutuksia polttoaineen kulutuksen laskusta päästöjen ja jätteiden, päästöjen käsittelylaitetarpeiden, tarvittavien kemikaalimäärien, kuljetustarpeiden ym. vähenemiseen. Energiantuotannossa syntyvän hiilidioksidin talteenottoon ja loppusijoitukseen liittyy edelleen monia ratkaisemattomia kysymyksiä eikä talteenotolla pystytä rajoittamaan päästöjä ainakaan lähimpinä vuosikymmeninä. Tällöin vähennyskeinoiksi jäävät siirtyminen mahdollisimman vähän hiiltä sisältäviin polttoaineisiin tai biopolttoaineisiin, jotka kuluttavat hiiltä kasvaessaan, tai muihin uusiutuviin energialähteisiin sekä energian tuotannon hyötysuhteen kasvattaminen ja kulutuksen vähentäminen.

6.1.4 Kaasumaiset metallit ja orgaaniset epäpuhtaudet

Tavanomaiset hiukkasten erotukseen käytettävät laitteet eivät pysty erottamaan kaasumaisina poistuvia aineita, joista hankalin on elohopea. Elohopea muuttuu vesistöissä myrkylliseksi ja kerääntyväksi metyylielohopeaksi ja kulkeutuu erityisesti kalojen välityksellä edelleen ravintoketjuissa. Hiilen polton osuudeksi ihmisen tuottamista elohopeapäästöistä on Euroopan maissa arvioitu 10 - 30 % (Sloss 1995). Elohopean käytön vähentyessä hiilen suhteellinen merkitys ympäristöön joutuvan elohopean lähteenä on kasvamassa. Hiukkaserotuslaitteistot pystyvät poistamaan lähinnä vain hiukkasmaisen tai hiukkasiin adsorboituvan osan elohopeasta. Elohopean poistotehoon vaikuttaa tällöin myös elohopean yhdiste- ja faasi-jakauma (spesiaatio), jonka tarkempi tunteminen ja ymmärtäminen auttaa myös puhdistusvaihtoehtojen kehittämisessä.

Orgaanisten epäpuhtauksien syntyminen on hiilivoimaloissa vähäistä. Typpipäästöjen vähentämiseksi tehtävät muutokset saattavat vaikuttaa orgaanisia päästöjä lisäävästi, ja siksi myös tähän aiheeseen olisi tutkimuksissa kiinnitettävä huomiota.

Hiilivoimalat eivät ole merkittäviä dioksiinipäästölähteitä. Monissa tutkimuksissa dioksiinipäästöt ovat jääneet alle määritysrajan. Frankenhauserin et al. (1993) tekemissä hiilen ja muovien sekapolttokokeissa lentotuhkan dioksiinipitoisuudet olivat 0,01- 0,6 ng/g TE Nordic, mikä on alle Saksassa maatalousmaalle asetetun rajan 1 ng/g I-TEQ. Tekijät arvioivat vähäisen dioksiinien muodostuksen tärkeimmäksi syyksi hiilen rikkipitoisuuden. Rikin läsnäolon on myös useissa muissa yhteyksissä todettu vähentävän dioksiinien muodostusta (Okawa et al. 1996).

6.2 PÄÄSTÖJEN KÄSITTELY- JA VÄHENNYSTEKNIIKAT

6.2.1 Hiukkasmaiset päästöt

Konventionaalisissa polttotekniikoissa hiukkasten poistoon käytetään sähkö- tai kuitusuodattimia. Kuitusuodattimet soveltuvat erityisesti hankalasti erotettaville yhdisteille tai tapauksiin, joissa halutaan optimoida kaasumaisten yhdisteiden, erityisesti elohopean, poisto. Pienhiukkasalueella kuitusuodattimien erotusteho on parempi kuin sähkösuodattimien.

Kaasujen kuumapuhdistus on lähes välttämätöntä, jotta tekniikoissa, joissa palamiskaasut johdetaan kaasuturbiineihin (IGCC, PFBC, Topping), päästään mahdollisimman korkeaan hyötysuhteeseen. Kaasujen jäädytys ja puhdistus pesurilla johtavat hyötysuhteen laskuun. Hiukkasmaisten epäpuhtauksien poistossa lupaavimpia vaihtoehtoja ovat piikarbidisuodattimet sekä keraamiset komposiitti- ja kuitusuodattimet. Toimivuus edellyttää pientä paineen alenemaa ja hyvää hiukkasten keräystehoa. Jotta tähän päästäisiin, on suodattimien oltava helposti puhdistuvia. Puhdistettavuuteen vaikuttavat suodattimen ominaisuuksien lisäksi myös erotettavan tuhkan ominaisuudet. Kuumapuhdistuksessa ei vielä ole päästy kaupalli-

siin sovelluksiin asti. Lisätutkimusta vaativia kysymyksiä ovat mm. erilaisten polttoaineiden vaikutus suodattimien toimintaan sekä suodattimien kestävyys ja puhdistettavuus (Ergündeler et al. 1997).

6.2.2 Rikki ja typpi

Rikinpoistoon käytetään hiilen pölypolttolaitoksissa yleisimmin märkämenetelmällä toimivaa rikinpoistolaitteistoa, jossa lopputuotteena on rikinpoistokipsi. Mm. pääkaupunkiseudun voimaloissa käytetään puolikuivamenetelmää, jonka etuina ovat yksinkertaisuus ja riskittömyys. Sijaituskohteiden löytäminen syntyvälle kalsiumsulfidille ja -sulfaattia sisältävälle rikinpoiston lopputuotteelle on ongelma, johon ei ole löydetty hyvää ratkaisua. Pääasiassa on tutkittu maarakennuskäyttöä, jota kuitenkin vaikeuttaa liukoisten suolojen pitoisuus materiaalissa. Tavannaisten rikinpoistoprosessien lisäksi on kehitetty myös prosesseja, joissa rikkidioksidi adsorboidaan regeneroitavaan sorbenttiin, erotetaan ja prosessoidaan rikkihapoksi tai alkuainerikiksi. Näitä menetelmiä käytetään kemian teollisuudessa, mutta niitä on asennettu vain hyvin harvoihin voimaloihin. Syynä tähän ovat prosessin monimutkaisuus ja korkeammat investointikustannukset. Etuna on rikin konsentroiduuteen pienempi lopputuotemäärä. Menetelmät voivat olla kilpailukykyisiä vain siinä tapauksessa, että tuotteet pystytään markkinoimaan.

Leijupoltteknikoissa rikinpoistoon käytetään petiin syötettävää sorbenttia, yleensä kalkkia. Erotustehoa voidaan säätää Ca/S-suhdetta säätämällä. Paineistetuissa tekniikoissa tarvittava sorbenttimäärä on pienempi kuin paineistamattomissa. Lopputuotteena syntyy kalsiumsulfaatin ja tuhkan seos, joka sisältää myös reagoimattomia sorbenttia. Reaktiivisinta on paineistamattoman leijupolton tuhka, jonka reagoimattoman sorbentin osuus hankaloittaa käyttöä.

IGCC-menetelmässä rikinpoisto tapahtuu yleensä useammassa vaiheessa. Leijukaasutuksessa osa rikistä sidotaan sorbenttiin ja loppuosa poistetaan alkuainerikkinä.

Nykyisillä rikinpoistotekniikoilla päästään noin 95 %:n rikinpoistotehoon. Rikinpoiston tehostaminen nykyisestään kasvattaa jätemääriä entisestään. Rikinpoistolaitteisto poistaa myös klooria, bromia ja jodia, joista noin 95 % erottuu (Couch 1997). Hiukkasmaisten metallien osuus pienenee myös rikinpoistolaitteistossa. Toisaalta haitallisimpien pienhiukkasten osuus päästöissä saattaa rikinpoistolaitteiston jälkeen olla suurempi kuin ennen rikinpoistoa.

Typpioksidien poistoon voidaan käyttää joko palamisteknisiä keinoja, SNCR-menetelmää (selective non-catalytic reduction) tai selektiivistä katalyyttistä pelkistystä. Palamistekniseen päästöjen vähentämiseen käytetty polttoilman vaiheistus vaikuttaa typpipäästöjen pienenemisen lisäksi myös mm. syntyvän lentotuhkan ominaisuuksiin.

Katalyyttinen typenpoisto on tehokkain ja varmin typenpoistomenetelmä, mutta kaasumaisen ammoniakkin käyttö aiheuttaa erityisesti kaupunkien keskusta-alueilla turvallisuusriskin. SNCR-menetelmässä pelkistävänä kemikaalina on ammoniakki-vesiliuos tai urea. Menetelmän käyttö edellyttää, että pelkistyskemikaali pystytään ruiskuttamaan savukaasuihin oikeassa lämpötilassa, mikä on 800 - 1100 °C. Siksi menetelmää on käytetty pääasiassa leijupoltossa. Saavutettava typenpoistoteho voi katalyyttisessä menetelmässä nousta yli 90 %:n ja SNCR-menetelmässä 80 %:iin. SNCR- ja SCR-menetelmien käyttö nostaa tuhkan ammoniakkipitoisuutta, mikä saattaa haitata tuhkan käyttöä mm. sementtiteollisuudessa. Tuhkan NH₃-pitoisuus, joka tavallisesti on noin 10 mg/kg, voi nousta 2 - 4-kertaiseksi.

Erillismenetelmien lisäksi on kehitetty useita yhdistettyjä rikin- ja typenpoistoprosesseja. Niistä ainoastaan aktiivihiiliprosessia ja katalyyttistä absorptiota on toistaiseksi sovellettu myös kaupallisessa mittakaavassa (Soud & Fukasawa 1996). Muita mahdollisuuksia ovat erilaiset märkäprosessit ja aktivointimenetelmät. Menetelmien etuna ovat hyvä puhdistustulos molemmille yhdisteille samanaikaisesti ja kiinteiden jätteiden määrän sekä kemikaalien kulutuksen väheneminen erillisprosesseihin verrattuna. Useimmissa prosesseissa typpioksidi reagoi alkuainetypeksi. Rikinpoiston lopputuotteena on alkuainerikki, rikkihappo tai nesteytetty rikkidioksidi. Typenpoistokemikaalina käytetään katalyyttisissä menetelmissä ammoniakia.

Jätteiden tuotannon lisäksi savukaasujen puhdistus kuluttaa energiaa. Rikinpoistolaitteiston energiankulutuksen on arvioitu olevan 0,3 - 0,6 % polttoainetehosta tai 0,7 - 1,7 % sähkön tuotantotehosta (Takeshita 1995). Koko savukaasujen käsittelyn vastaava energiankulutus taas on 0,5 - 1,0 % polttoainetehosta, yhdistetyssä typen- ja rikinpoistossa kuitenkin 1,2 - 1,3 %. Rikinpoistossa märkämenetelmällä syntyy myös jätevetä. Esimerkiksi Avedoren sähköteholtaan n. 250 MW:n laitoksessa käytettävä vesimäärä on 39 t/h ja jätevesimäärä 5 t/h.

6.2.3 Kasvihuonekaasut

Hiilidioksidin talteenottoon soveltuvia menetelmiä on kaupallisessa käytössä kemian teollisuudessa. Käytössä tai kehitteillä olevia menetelmiä ovat kemiallinen absorptio amiiniliuoksiin, fysikaalinen absorptio, kalvoerotus ja kryogeeniset menetelmät (Blok et al. 1992). Energiantuotannon savukaasuissa pitoisuudet ovat kuitenkin huomattavasti laimeampia, jolloin talteenoton energiankulutus ja kustannukset nousevat korkeiksi. Suurille hiilidioksidimäärille ei myöskään ole löydettävissä hyötykäyttökohteita. Siksi ainoaksi vaihtoehdoksi jää toistaiseksi loppusijoitus meriin tai tuotannosta poistettuihin maakaasu- tai öljykenttiin. Loppusijoituksen mahdolliset ympäristövaikutukset ja toimivuus käytännön olosuhteissa tunnetaan vielä huonosti. Kokonaisuutena talteenotto ja loppusijoitus kuluttavat myös paljon energiaa, jolloin todellinen hiilidioksidipäästöjä vähentävä vaikutus voi jäädä pieneksi.

Yhtenä vaihtoehtona on tutkittu mahdollisuuksia tehostaa hiilidioksidin biologista sitoutumista mikro-organismeihin, jotka voitaisiin edelleen kierrättää polttoai-

neeksi, kemikaaleiksi tms. Myös hiilidioksidin valokemiallista luonnon fotosynteesiä matkivaa pelkistystä sekä sähkökemiallista ja katalyyttistä pelkistystä on tutkittu. Kaikki nämä menetelmät on pystytty osoittamaan toimiviksi, mutta niiden teho on vielä hyvin kaukana käytännön mittakaavassa tarvittavasta.

Typpioksiduulipäästöjen käsittelyyn ei toistaiseksi ole tyydyttäviä tekniikoita. Piilotti- tai laboratoriomittakaavassa on tutkittu mm. jälkipolttoa syklonissa ja katalyyttistä hajottamista yhdessä typpioksidien kanssa (Hjalmarsson 1992). Kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamissopimusten ulottaminen koskemaan myös typpioksiduulipäästöjä lisää todennäköisesti vähentämismahdollisuuksien tutkimusta.

6.2.4 Elohopea ja muut kaasumaiset raskasmetallit

Elohopea on kaasumaisen olomuotonsa takia muita metalleja hankalammin erotettavissa savukaasuista. Sähkö- ja kuitusuodattimilla voidaan poistaa 35 - 40 % elohopeasta, pääosin hiukkasmaisena tai kaksiarvoisena esiintyvä osuus. Myös tuhkan palamaton hiili, savukaasujen kloori ja typpidioksidi voivat parantaa erotustehoa hapettamalla elohopean adsorboituvaan muotoon. Käyttökelpoisin keino erotuksen tehostamiseksi on kuitenkin pitää hiukkasten erotuslämpötila mahdollisimman matalana.

Rikinpoistolaitteistojen elohopean erotusteho on erittäin vaihteleva, 5 - 95 %, tavallisimmin muutamia kymmeniä prosentteja. Kaksiarvoinen elohopea erottuu yleensä pesureissa, kun taas alkuainemuodossa oleva elohopea pääsee lähes täysin läpi (Sloss 1996). Puolikuivamenetelmässä elohopean poistoteho voidaan nostaa 90 %:iin aktiivihiili-injektiolla. Aktiivihiili erottuu yhdessä rikinpoistotuotteen kanssa. Elohopea jää rikinpoistojätteeseen ja samanaikaisesti jätemäärä kasvaa. Tämä vaikeuttaa jätteen sijoittamista entisestään.

Toisena vaihtoehtona on kokeiltu aktiivihiili-injektiota hiukkaserotuksen jälkeen. Tällöin laitteistoon on lisättävä kuitusuodatin aktiivihiilen poistoon. Hiili saadaan talteen erillisenä, jolloin sitä voidaan kierrättää sekä käytön jälkeen käsitellä erottamalla elohopea, jolloin haitallisen jätteen määrä jää pienemmäksi (Sloss 1995). Aktiivihiilen tehoa voidaan parantaa impregnoimalla hiileen rikkiä tai jodia.

Myös zeoliitin käyttöä elohopeapitoisten kaasujen puhdistukseen on tutkittu (Mayer-Schwinning et al. 1995). Etuna on mahdollisuus sorbentin regenerointiin. Zeoliittien adsorptioteho on kuitenkin hiilivoimaloissa tehdyissä kokeissa laskenut nopeasti (Sloss 1995). Seleenillä pinnoitettuja keraamisia elohopeasuodattimia on käytetty erityisesti metalliteollisuudessa. Elohopea reagoi suhteellisen stabiiliksi elohopeaselenidiksi. Seleenisuodatin ei suuren painehäviön vuoksi sellaisenaan sovellu hiilivoimaloihin. Lisäksi elohopeaselenidin stabiilius heikkenee hapettuessa, jolloin osa siitä voi höyrystyä suodattimesta (Dismukes 1994).

6.3 JÄTTEET JA NIIDEN KÄSITTELY

Jätteiden muodostumismekanismia on käsitelty edellä kaasunpuhdistustekniikoiden yhteydessä. Tulevissa laitosratkaisuissa päästöjen käsittelyä olisi tarkasteltava kokonaisuutena, jossa päästötavoitteiden, päästöjen käsittelykustannusten ja tekniikan käytettävyyden lisäksi otetaan huomioon myös syntyvät jätteet ja niiden sijoitusmahdollisuudet sekä jätehuollon todennäköisesti edelleen nousevat kustannukset. Sivutuotteiden hyödynnettävyyden parantaminen edellyttää, että kaasunpuhdistusprosesseja kehitetään epäpuhtauden poistoprosessin sijasta tietyn hyödynnettävän tuotteen tuotantoprosessiksi.

Nykyisissä laitoksissa syntyvien tuhkien ja rikinpoistojätteiden maarakennuskäyttöä koskevaa tutkimusta on meneillään suhteellisen paljon. Sekä teknisen soveltuvuuden, erityisesti pitkäaikaiskäyttämisen, että ympäristökelpoisuuden arvioimiseksi ja tuotteiden käyttökelpoisuuskriteerien asettamiseksi tarvitaan vielä lisätutkimusta. Tuotteiden käytettävyyteen voidaan vaikuttaa myös laitoksella asettamalla yhdeksi tavoitteeksi syntyvän tuhkan ominaisuuksien parantaminen tuotantoa optimoimalla sekä sivutuotteiden ominaisuuksia parantavilla jälkikäsittelyillä. Tavanomaiset käyttökohteet asettavat kuitenkin rajan jälkikäsittelymahdollisuuksille, koska materiaaleilta edellytetään suhteellisen halpaa hintaa.

Muiden tekniikoiden jätteiden käyttömahdollisuuksia on tutkittu huomattavasti vähemmän. Tähän ovat olleet syynä tekniikoiden vähäisemmät käyttökokemukset ja toistaiseksi vielä pienet jätemäärät, jolloin ongelmat ovat jääneet lähinnä paikallisiksi. Jätteiden koostumus ja sijoitettavuusominaisuuksien parantaminen ovat tärkeitä tutkimuskohteita myös, mikäli sekapoltto yleistyy. Jos muun kuin pääpolttoaineen osuus on yli 10 %, tuhkan ominaisuudet muuttuvat niin paljon, että se ei sovellu tavanomaisiin käyttökohteisiin. Maarakennusominaisuuksia heikentävät mm. lisääntynyt palamattoman hiilen pitoisuus ja jätteiden polton tuottamat haitta-aineet. Hiilen ja jätteiden käyttö lisäpolttoaineena taas nostaa metsäbiomassatuhkien epäpuhtauspitoisuuksia ja haittaa näin lannoitekäyttöä.

6.4 KEHITYSTARPEET

Päästöjen käsittelyä kehitettäessä on tärkeää päästä kokonaisvaikutuksiltaan mahdollisimman haitattomaan menetelmään. Tavoitteita ovat mm. hyvä puhdistusteho mahdollisimman monille epäpuhtauksille, hyödyntämiskelpoiset lopputuotteet, haitallisten epäpuhtauksien konsentroidin mahdollisimman pieneen jätemäärään, kemikaali- ja laitetarpeen minimointi ja riskien minimointi. Tekniikan kehityksen lisäksi tämä edellyttää järjestelmä- ja kustannus selvityksiä, mukaan lukien syntyvien uusien ja entisten jättemateriaalien markkinaselvitykset ja tulevien markkinoiden arvioinnin. Teknisiä kehitysvaihtoehtoja ovat mm. useiden epäpuhtauksien yhdistettyyn käsittelyyn soveltuvat tekniikat, tekniikoiden kehittäminen elohopean ja muiden kaasumaisten yhdisteiden sitomiseksi tai poistamiseksi, entistä paremmin hyödynnettävien jäännösmateriaalien tuottaminen ja alkuainerikin käyttömah-

dollisuuksien selvittäminen. Kaasunpuhdistuksen vaihtoehtona tai rinnalla olisi myös entistä paremmin arvioitava ja kehitettävä mahdollisuuksia poistaa epäpuhtaudet suoraan hiilestä.

6.5 YMPÄRISTÖ- JA TURVALLISUUSRISKIT

Voimaloiden turvallisuusriskit ovat pääosin voimala-alueelle rajoittuvia työturvallisuusriskejä. Työturvallisuuteen liittyviä riskitekijöitä ei kuitenkaan käsitellä laajemmin tässä yhteydessä.

Voimala-alueen ulkopuolelle ulottuvia riskejä voi aiheutua erityisesti polttoainesten ja kemikaalien kuljetuksista. Katalyyttisessä typenpoistossa tarvittavan kaasumaisen ammoniakkin käyttö voi aiheuttaa turvallisuusriskin erityisesti kaupunkien keskusta-alueilla.

7 ESIMERKKEJÄ NYKYISISTÄ KAUPUNKIVOIMALARATKAISUISTA

7.1 HELSINKI

7.1.1 Toimintaympäristö ja tuotantolaitokset

Helsingin Energia (HKE) on kaupungin liikelaitoksena toimiva pääkaupungin energiahuollosta vastaava laitos, joka nykyisin toimii sähkömarkkinoilla Suomessa ja rajoitetusti myös muissa Pohjoismaissa. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto on Helsingissä aloitettu jo 1950-luvulla. Kaupunki on lähes kokonaan kaukolämmön piirissä. Vuonna 1996 lämmöstä tuotettiin 87 % yhteistuotantona ja 13 % lämpölaitoksissa. Kaupungin hankkimasta sähköstä 71 % tuli omista voimalaitoksista, 23 % ydin-, hiili- ja vesivoimalaitoksista, joihin kaupungilla on osuuksia ja 6 % ostoina. Hankitusta sähköstä toimitettiin Imatran Voima Oy:lle Vuosaari A:n sopimussähköä 11 % ja myytiin tilapäiskaupoilla noin 13 % koko hankintamäärästä.

Energiantuotannon pääpolttoaineina ovat hiili ja maakaasu. Toisen maakaasukombivoimalan käynnistyttyä maakaasun osuus polttoaineista nousee yli 50 %:n. Yhteistuotantolaitokset sijaitsevat Hanasaassa ja Salmisaassa, jotka ovat kaupungin keskustan välittömässä läheisyydessä. Kolmas sijaintikohde on Vuosaari, johon valmistui vuonna 1991 ensimmäinen maakaasukäyttöinen kombivoimalaitos. Sen sähkö- ja kaukolämpöteho ovat molemmat 160 MW. Vuosaaren toinen maakaasukäyttöinen voimalaitos on aloittamassa toimintaansa vuonna 1997. Sen sähköteho on lauhdutuskäytössä 520 MW. Vastapainekäytössä sähköteho on 460 MW ja samanaikainen kaukolämpöteho on 420 MW.

Hanasaassa on kaksi kahden yksikön hiilikäyttöistä voimalaa, joiden sähköteho on yhteensä 376 MW ja kaukolämpöteho 580 MW. Vanhempi A-laitos on poistumassa käytöstä. Salmisaari B on uusin Helsingin hiilikäyttöisistä voimalaitoksista. Sen sähköteho on 150 MW ja kaukolämpöteho 290 MW (muutettuina nettotehoiksi lämpötilaan -25 °C).

Salmisaari A:ssa toimii hiiltä käyttävä 170 MW:n vesikattila kaukolämmitystä varten. Sähköntuotannon varalaitoksena on Kellosaaren 118 MW:n kaasuturbiinilaitos Ruoholahdessa ja lämmöntuotannon huippu- ja varalaitoksina eri puolilla kaupunkia olevat kaukolämpökeskukset.

Sähkön ja lämmön tuotannon vuosihyötysuhde on 85 %, mikä on erittäin korkea. Lämmönsiirron häviöt ovat 3 % polttoaine-energiasta ja yhteistuotannon häviöt 12 % polttoaine-energiasta. Erillistuotannossa hyötysuhde olisi 56 %, jos oletetaan, että lämpö tuotetaan kiinteistökohtaisesti. Tehokkaasta ja päästöt minimoivasta energian tuotannosta on myönnetty Helsingin kaupungille YK:n ympäristöpalkinto vuonna 1990.

7.1.2 Päästöt ja jätteet

Energiantuotannon rikki-, typpi- ja hiilidioksidipäästöt ovat pienentyneet kaukolämpöön siirtymisen, savukaasujen puhdistuksen käyttöönoton ja energiantuotannon tehostumisen myötä huomattavasti, vaikka energiankulutus on kasvanut. Rikkipäästöt olivat vuonna 1993 noin 5 600 tonnia ja vähenevät vuoden 1997 jälkeen arvioilta 2 500 tonniin vuodessa, mikä on 90 % vähemmän kuin päästöt vuonna 1981. Viimeisen ilman rikinpoistoa toimivan laitoksen käyttö väheni huomattavasti toisen maakaasuvoimalan käynnistyttyä vuonna 1997. Vuonna 1999 se siirretään kokonaan varavoimalaksi. Hiilivoimaloiden rikinpoistoon käytetään puolikui-vamenetelmää, joka on valittu yksinkertaisuuden, alhaisen riskitason ja kohtuullisten kustannusten vuoksi. Menetelmän teho ja toimivuus on hyvä, mutta ongelmana on syntyvän sulfiitteja ja sulfaatteja sisältävän rikinpoistotuotteen sijoittaminen. Ensisijaisena tavoitteena on kaikkien energiantuotannossa syntyvien sivutuotteiden hyötykäyttö, jonka kehittämiseen on viime vuosina panostettu huomattavasti.

Typen oksidien päästöt olivat 8 400 tonnia vuonna 1993 ja noin 7 000 tonnia vuonna 1995. Ennuste vuodelle 2000 on 6 500 t NO_x, mikä on suunnilleen 50 % vähemmän kuin vuonna 1988. Päästöjen vähenemiseen vaikuttavat voimaloissa tehdyt palamistekniset muutokset sekä maakaasun käyttöönotto. Hiukkaspäästöt olivat 550 t vuonna 1993. Vuoden 1997 jälkeen niiden arvioidaan laskevan 250 tonniin vuodessa. Lisäksi hiiltä varastoitaessa ja siirrettäessä syntyy pölyä, joka pääosin jää voimala-alueelle. Kosteaa ilmasto rajoittaa pölyämistä melko tehokkaasti suuren osan vuodesta.

7.2 TUKHOLMA

7.2.1 Ruotsin energiapolitiikan tavoitteet

Ruotsin tärkeimpiä energiapoliittisia tavoitteita ovat kilpailukykyisen energiantuotannon turvaaminen, kestävän taloudellisen ja sosiaalisen kehityksen turvaaminen, kotimaisen ja uusiutuvan energian käytön edistäminen ja energian tuotannon ja käytön tehostaminen. Biopolttoaineiden käyttöä pyritään edistämään mm. biomas-san käyttöä tukevilla vero- ja maksupäätöksillä. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto ei Ruotsissa ole yhtä yleistä kuin Suomessa. Vuonna 1995 vain 6 % koko tuotannosta oli yhteistuotantoa.

7.2.2 Toimintaympäristö ja tuotantolaitokset

Stockholm Energi (SE) on Tukholman alueen ainoa energialaitos. Se tuottaa sähköä, kaukolämpöä ja kaukokylmää. Alueen asiakasmäärästä 60 % on kaukolämmön piirissä. Tuotettu lämpömäärä on 5 TWh vuodessa, mutta käyttö on vuosittain laajentunut noin 150 – 200 GWh:lla. Kaukolämmön lisäksi lämmitykseen käytetään lähinnä pieniä öljykattiloita ja sähköä.

Lämmön tuotanto on keskitetty Tukholmassa Värtanin alueelle sekä Hässelbyn ja Högdalenin laitoksiin. Lisäksi alueella on kaksi merivedestä ja puhdistetusta jätevedestä lämpöä tuottavaa lämpöpumppulaitosta. Ensimmäinen yhdistetty sähkön ja lämmön tuotantolaitos valmistui vuonna 1959 Hässebyhyn. 1960- ja 1970-luvuilla lämmöntuotannon polttoaineena käytettiin öljyä.

1970-luvun lopulla alettiin vaatia öljyn käytön vähentämistä ympäristön parantamiseksi. Lämmön tuottamiseksi rakennettiin sähkökattiloita sekä Ropstenin ja Hammarbyn lämpöpumppulaitokset. Högdalenin 1970 rakennettu jätteenpolttolaitos muutettiin yhdistetyksi sähkön ja lämmön tuotantolaitokseksi ja Hässelbyn laitos hiilikäyttöiseksi.

1990-luvulla Ruotsin energiapolitiikan yhdeksi tavoitteeksi asetettiin siirtyminen uusiutuvien energialähteiden käyttöön. Hässelbyn laitos muutettiin siten, että hiilen kanssa voidaan polttaa biopolttoaineita. Yhdessä sahateollisuuden kanssa perustettiin puupellettien tuotantolaitos, josta polttoaine tuodaan laitokselle laivalla. Lisäksi on käytetty myös ulkomailta tuotua oliivinsiemenjätettä. Laitoksen 1 200 GWh:n lämmöntuotannosta 500 GWh tuotetaan biopolttoaineella. Tavoitteena on kasvattaa tätä osuutta.

Ympäristövaatimukset olivat merkittävien valintaperuste myös, kun Värtanin alueelle alettiin 1980-luvulla suunnitella uutta laitosta yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon. Ratkaisuksi valittiin hiilen paineistettu leijupoltto. Laitetoimittajana oli ABB. Laitos valmistui 1992 ja se oli ensimmäinen toimitettu täyden mittakaavan laitos.

Tukholman Energian lämmöntuotannosta noin 40 % tuotetaan nykyisin fossiilisista polttoaineista, 21 % biopolttoaineista ja jätteistä, 22 % lämpöpumpuilla ja loppuosa, 17 %, sähköllä. Lämmöntuotannon yhteydessä tuotettu sähköteho on 480 MW. Sähkön tuotantoa varten SE on hankkinut mm. ydinvoimalaosojuksia sekä vesivoimaa. Vesivoiman osuutta on kasvatettu ostamalla jo toimivia laitoksia 1990-luvulla. Uutta vesivoimarakentamista ei kuitenkaan pidetä ekologisesti kestäväenä. Normaali vuosina vesivoiman osuus sähköntuotannosta on noin 45 %, ydinvoiman suunnilleen saman verran ja loppuosa tuotetaan lämpövoimalaitoksissa.

Uusia laitoksia ei ole suunnitteilla, vaan lisälämpö pyritään tuottamaan laitosten käyttöä tehostamalla. Kaukolämpöyhteistyö ympäristön kuntien kanssa on todettu sekä ympäristön kannalta että taloudellisesti kannattavaksi ja se tulee edelleen laajenemaan.

Rikkipäästöt ovat laskeneet kahdella kolmanneksella ja typpipäästöt puolella vuosina 1988 - 1994. Typpipäästöjen vähentäminen ollut yksi viime aikojen tärkeimmistä tavoitteista. Hässelbyssä rajoittamistoimina olivat low-NOx-tekniikan ja biopolttoaineiden käyttöönotot, joilla päästöt saatiin kolmannekseen aikaisemmas-

ta. Högdalenin voimalassa typpipäästöt laskivat kolme neljänestä, kun vuonna 1995 otettiin käyttöön ei-katalyyttinen SNCR-tekniikka. Värtaverketin molemmissa kattiloissa on katalyyttinen typenpoisto ja öljylämpövoimalassa low-NO_x -poltto.

7.2.3 Värtanin PFBC-laitos

Värtanin uusimman voimalan suunnittelua aloitettaessa oli selvää, että laitoksen olisi sijaintinsa vuoksi täytettävä tiukat ympäristövaatimukset. Vaikka yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon valittiin uusi tekniikka, jota sovellettaessa pyrittiin alusta alkaen tiukkoihin päästörajoihin, hyväksymisprosessi oli pitkä ja hankala (Nordin & Dahl 1993). Suunniteltuja ratkaisuja jouduttiin muuttamaan asukkaiden vastustuksen takia. Yksi näistä muutoksista oli siirtyminen täysin suljetuun hiilijärjestelmään muuttamalla maanalainen öljyvarasto hiilivarastoksi. Kaikki kuljetukset ja käsittely tapahtuvat maan alla. Laitokselta edellytettiin myös tiukkoja päästörajoja (30 mg S/MJ, 50 mg NO_x/MJ, 5 mg hiukkasia/MJ ja < 8 kg Hg/vuosi), suhteellisen tiukkoja melurajoja (alle 50 dB päivällä, alle 45 dB yöllä), optimoidun rikinpoistotekniikan (rikinpoistoteho, jätteen sijoitettavuus ja käsiteltävyys huomioon ottaen) valintaa ja sopeutumista kaupunkikuvaan.

Voimala tuottaa 135 MW sähköä ja 225 MW kaukolämpöä. Laitosta käytetään vain lämmityskaudella, koska lauhdutuskäyttö ei ole mahdollista. Laitoksessa on kaksi polttoyksikköä (P200), jotka on yhdistetty yhteen höyryturbiiniin. Hyötysuhde on 89 % (LHV) ja polttolämpötila 860 °C. Tyypillisiä käyttöarvoja on esitetty taulukossa 3. Syötettävän hiilen rikki- ja tuhkapitoisuus on 0,5 - 1,5 %, tuhkapitoisuus 8 - 21 % ja kosteus 6 - 15 %. Sorbenttina käytetään dolomiittia 2 x 0,5 kg/s ja tuhkaa syntyy 2 x 1,6 kg/s.

Taulukko 3 Värtanin paineistetun leijupolttolaitoksen suunnitteluarvoja ja käytön aikana saavutettuja arvoja (ABB Carbon 1997).

Suunnitteluarvot	Tyypilliset käyttöarvot	Parhaat saavutetut arvot	Rajoittamistekniikka
Rikkipäästöt			
60 mg SO ₂ /MJ	6 - 30 mg SO ₂ /MJ	< 6 mg SO ₂ /MJ	Sorbentin
60 ppm (6 % O ₂)	6 - 30 ppm (6 % O ₂)	< 6 ppm (6 % O ₂)	syöttö
92,4 % poistoteho	94 - 99 % poistoteho	> 99 % poistoteho	
3,8 Ca/S	2,8 Ca/S	3,8 Ca/S	
Typpipäästöt	10 - 50 mg/MJ	10 mg/MJ	Ammoniakin syöttö ja mini-katalyytti
50 mg/MJ (alun perin suunnittelu- luarvo 70 mg/MJ)			

Laitoksella on tutkittu mahdollisuuksia polttaa samanaikaisesti hiiltä ja biomassaa (Stockholm Energi 1996). Tällöin todettiin, että olemassa olevissa laitteistoissa ei voida käyttää puupohjaisia polttoaineita ilman laajoja muutoksia.

PFBC-tuhkasta voidaan valmistaa veden kanssa kovettamalla betonimaista synteettistä soraa, joka soveltuu tiemateriaaliksi. Käyttökohteina ovat olleet myös kaatopaikkatiivisteet, täytöt ja maan stabilointi. Suotovesien metallipitoisuudet ovat samalla tasolla kuin moreenista tai luonnonsorasta liukenevat pitoisuudet. Tuhkasta liukenee kuitenkin melko runsaasti klorideja ja sulfaatteja.

7.2.4 Tulevat tavoitteet ja toteutettavat toimet

Ympäristövaatimukset ja -odotukset vaikuttavat merkittävästi Tukholman Energian toiminnan suuntaamiseen ja tuleviin tavoitteisiin. Tuotannolta edellytetään muun muassa uusiutuvan energian käytön lisäämistä. Sähköntuotantoon ostetun vesivoiman osuutta ei enää voida merkittävästi lisätä, koska kuivina vuosina voi syntyä liian suuri tuotantovajaus. Keskeisiä tutkimus- ja kehitysalueita ovat bioenergian, maakaasun, aurinkoenergian ja tuulivoiman käytön kehittäminen ja ympäristötavoitteiden yhdistäminen toiminnan ohjaukseen. Biopolttoaineen käytön edistämiseksi pyritään nostamaan polttoaineen energiapitoisuutta mm. pellettimalla ja vähentämään biopolttoaineen lastauksessa, murskauksessa ja varastoinnissa syntyviä pöly- ja hajuhaittoja.

Ympäristötavoitteet pyritään yhdistämään paremmin toiminnan ohjaukseen strategisten tarkastelujen, ympäristötarkastusten ja niiden pohjalta kehitettävän hallintajärjestelmän avulla. Tuotantolaitoksille ollaan tekemässä kokonaisarviointia, joka käsittää kaikki hankittavat tuotteet ja raaka-aineet, kuljetukset, työympäristön, laitosten optimaalisen käytön, jätteiden käsittelyn jne. Tavoitteena on luoda jatkuva toimiva toiminnanohjausjärjestelmä, jonka perustana ovat ympäristöajattelu ja kestävä materiaalitalous. Suurimmalle osalle laitoksista ollaan hankkimassa EMAS-hyväksyntä. Tuotteille ja tuotannon eri osille tehdään elinkaarianalyseja, joita myös asiakkaat tarvitsevat yhä enemmän omien tuotteidensa elinkaaritietojen selvittämiseksi.

Vesivoimalla tuotettu sähkö on saanut Ruotsin ympäristöviraston Naturvårdsverkens "Bra Miljöval"-ympäristömerkin. Asiakkaat voivat valita, millä tavoin heidän ostamansa sähkö on tuotettu. Asiakkaat maksavat tuulivoimalla tuotetusta sähköstä noin 8 penniä/kWh enemmän kuin yleissähköstä. Myös vesivoimalla tai paikallisesti tuotettu sähkö on perushintaa kalliimpaa.

Yhtenä tavoitteena on tehokkaampi energian käyttö. Asiakkaita pyritään ohjaamaan vähentämään tehonkulutusta viihtyvyyttä tai käyttömukavuutta haittaamatta. Suurasiakkaat voivat saada osana sopimusta energiakatselmuksen neuvontaa.

7.3 KÖÖPENHAMINA

7.3.1 Kehityssuunnat Tanskassa

Tanskassa sähkön ja lämmön yhteistuotanto on tavallista erityisesti suurimmissa kaupungeissa, joissa energia tuotetaan hiilivoimaloissa. Yhteistuotannon osuus koko maan lämmönkulutuksesta on noin 50 % (COGEN Europe 1996). Siksi Tanskan voimaloiden keskimääräinen hyötysuhde on lähes 60 % ja suunta on edelleen kasvava. Energiapolitiikan tavoitteeksi on asetettu 20 %:n hiilidioksidipäästöjen lasku vuoden 1988 tasosta vuoteen 2005 mennessä (Energi 21, 1996). Tavoitteena on myös vähentää riippuvuutta tuontienergiasta ja pysyä kansainvälisesti kilpailukykyisenä energia-alalla mm. olemalla edelläkävijä ympäristönsuojelussa, uusiutuvien energiamuotojen käytössä ja energiatehokkuudessa.

Tärkeimpiä kehitystavoitteita ovat maakaasun ja biopolttoaineiden käytön lisääminen pienissä yksiköissä, tuulivoiman käyttö, hiilivoimaloiden hyötysuhteen nosto ylikriittisiä höyryprosesseja kehittämällä ja yhteistuotannon leviäminen myös pienempiin asutuskeskuksiin. Maakaasua tuotetaan Tanskan omilla Pohjanmeren kentillä, ja putkiverkosto kattaa jo suurimman osan maasta. Erilaisten jätebiomasojen, kuten oljen, käyttömahdollisuuksia pienten tuotantoyksiköiden polttoaineena on tutkittu paljon ja niissä on myös päästy käytännön sovelluksiin. Suuret voimalat tulevat kuitenkin jatkossakin olemaan maakaasu- tai hiilikäyttöisiä.

Kaukolämpöjärjestelmiin liittyviä kehityskohteita ovat olleet mm. lämpöhäviöiden minimointi ja optimointimallien kehittäminen. Lämpöhäviöiden minimoimiseksi on pyritty luomaan kaukolämpöjärjestelmä, jossa lämpötilat ovat mahdollisimman matalat. Lämpöhäviöiden vähenemisen lisäksi laitosten kokonaishyötysuhde paranee ja voidaan käyttää halvempia putkistokomponentteja. Kaukolämpöjärjestelmän dynaamista simulointimallia on kehitelty Tanskan teknillisessä korkeakoulussa. Lopullisena tavoitteena on tuotantokustannukset minimoiva on-line-optimointijärjestelmä.

7.3.2 Toimintaympäristö ja tuotantolaitokset

Kaukolämpö on Kööpenhaminassa ollut käytössä jo vuosikymmeniä. Kaukolämpöjärjestelmä kattaa koko kaupungin ja suuren osan ympäröivästä alueesta. Kaikkiaan asiakkaita on noin 500 000 (vuosienergia 25 800 TJ/a) 16 kunnan alueella. Verkko tullaan laajentamaan koko alueen kattavaksi. Sähkön kuluttajia alueella on 850 000 ja vuosittain myyty sähkömäärä 8 TWh. Energia tuotetaan yhdeksässä yhteistuotantolaitoksessa. Amagerin kolmen voimalan polttoaineena on hiili. Niiden sähköteho on yhteensä 514 MW ja lämpöteho 665 MJ/s (Mortensen 1996). Lisäksi Avedoren hiilivoimala tuottaa 250 MW sähköä ja 330 MJ/s lämpöä. Loppuosa lämmöstä tuotetaan jätteenpolttolaitoksissa sekä kaasu-, öljy- ja hiililämmitteisissä huippuvoimaloissa. Lämmöntuotanto ja lämmönsiirto toimivat omina yhtiöinään. Siirrosta pieniasiakkaille vastaavat paikalliset jakeluyhtiöt.

Kaukolämmön on Kööpenhaminassa laskettu säästävän öljyä 360 000 t, vähentävän hiilidioksidipäästöjä 50 %, rikkidioksidipäästöjä 35 % ja typen oksidien päästöjä 50 % verrattuna pienkattilalämmitykseen.

7.3.3 Esimerkki – Avedore

Avedoren yhdistetty sähkön ja lämmön tuotantolaitos sijaitsee Kööpenhaminassa melko lähellä keskusta-aluetta. Laitos toimittaa lämpöä yhteen Euroopan suurimmista kaukolämpöverkoista, joka ulottuu kymmenien kilometrien päähän lähikaupunkiin. Lähivuosina verkkoon tullaan liittämään runsaasti uusia asiakkaita. Koska useita vanhoja pienempiä laitoksia joudutaan samanaikaisesti sulkemaan, Avedoren toisen vaiheen rakentaminen on katsottu tarpeelliseksi lähivuosina.

Vuonna 1991 valmistuneen Avedore 1:n sähköntuotantoteho on 250 MW, yhdistetyssä tuotannossa sähköteho 215 MW ja lämpöteho 330 MW. Yhdistetyssä tuotannossa hyötysuhde on 92 % ja sähköntuotannossa 42 % (Anon 1996a). Lämmön tilapäistä varastointia varten laitoksella on kaksi lämpöakkuja. Laitoksen tuottama kaukolämpö kattaa noin 100 000 asukkaan tarpeen. Laitoksen höyryarvot ovat 245 bar ja 545 °C. Päästörajat ovat 60 mg/MJ NO_x, 60 mg/MJ SO₂ ja 5 mg/MJ hiukkasia. Päästöjen rajoittamiseksi käytetään sähkösuodatinta, märkää rikinpoistoa ja low-NO_x-polttimia. Vuonna 1993 laitokseen asennettiin typenpoistokatalyytti. Tuhkaa syntyy 13 t/h ja rikinpoistokipsiä 3,5 t/h. Rikinpoistokipsi on hyötykäytetty kipsilevytuotannon raaka-aineena. Myös pääosa tuhkasta on hyötykäytetty sementtiteollisuudessa, tienrakennuksessa ja muissa maarakenteissa.

Sijainnin vuoksi kaupunkikuvaan ja matalaan rantamaisemaan sopeuttamista pidettiin laitossuunnittelussa erittäin tärkeinä. Laitos on sijoitettu kahteen vierekkäiseen rakennukseen siten, että toisessa ovat sähkön- ja lämmöntuotantolaitteistot ja toisessa savukaasujen käsittelylaitteistot. Kattilarakennuksen korkeus on 70 m ja piipun korkeus 150 m. Hiilivarasto on jaettu pitkäaikaisvarastoon ja käyttövarastoon. Pitkäaikaisvaraston pinnalle on pölyämisen estämiseksi istutettu ruohopeite. Lyhytaikaisvaraston pölyämistä ehkäistään säännöllisin tiivistyksin ja suihkuttamalla tarvittaessa pinnalle vettä.

Laitoksen pääomakustannukset olivat 415 milj. USD. Kustannuksia lisäsi laitoksen sijoitus uudelle voimala-alueelle, jolloin oli rakennettava myös satama, hiilen varastoalueet, verkkoyhteydet ym. (Anon 1996a). Käyttökokemuksia pidetään kokonaisuutena suhteellisen hyvinä. Käytettävyysaste on noussut ensimmäisen käyttövuoden 88 %:sta 94 - 95 %:iin (yli 8 000 h/a) vuosina 1994 ja 1995 (Couch).

Avedoreen on suunniteltu toista monipolttoainevoimalaa, jonka pääpolttoaineina ovat kaasu ja öljy (Noppenau 1996). Laitoksen perusyksikkönä on kaasukattila ja ylikriittinen höyrypiiri. Lisäksi laitospölyämiseen kuuluvat kaasuturbiinilaitos ja erillinen biomassakattila, jonka tuottama höyry johdetaan ylikriittiseen höyry-

piiriin sähköntuotantoa varten (Anon 1997b). Kaasuturbiinilaitos tuottaa sähköä ja sen jätelämpökattilaa käytetään kaasukattilan syöttöveden lämmitykseen, mikä integroi kaasuturbiinin kattilalaitokseen ja parantaa hyötysuhdetta. Ratkaisun etuina pidetään mahdollisuutta saada kullekin polttoaineelle maksimaalinen hyötysuhde, mahdollisuutta hyödyntää joustavasti kulloinkin kustannuksiltaan edullisinta polttoainetta ja tuottaa erillisiä tuhkajakeita kustakin polttoaineesta, mikä helpottaa tuhkan hyödyntämistä (Noppenau 1996).

Alun perin laitoksen piti käynnistyä vuonna 1999, mutta rakentamista on siirretty siten, että laitos käynnistyisi vuonna 2001 (Anon. 1997b). Ensimmäisissä suunnitelmissa pääpolttoaineena ollut hiili on korvattu maakaasulla, jotta laitos olisi Tanskan maakaasun ja bioenergian käytön lisäämistä painottavien energiapolitiittisten tavoitteiden mukainen. Sähköntuotantoteho tulee olemaan 540 - 570 MW ja lämpöteho n. 580 MJ/s. Polttoaineen kulutus on n. 600 miljoonaa m³ maakaasua ja 150 000 tonnia biomassaa. Tuki- ja varapolttoaineena toimivan öljyn arvioitu vuosikulutus vastaa noin 120 miljoonaa m³:ä maakaasua.

Periaatteeltaan vastaavaa laitosta ollaan rakentamassa Saksaan lähelle Stuttgartia. Laitoksen sähköteho on 335 MW ja lämpöteho 280 MW höyry- ja kaasuturbiineita samanaikaisesti käytettäessä. Pelkässä sähköntuotannossa teho on 380 MW.

7.4 KALUNDBORG

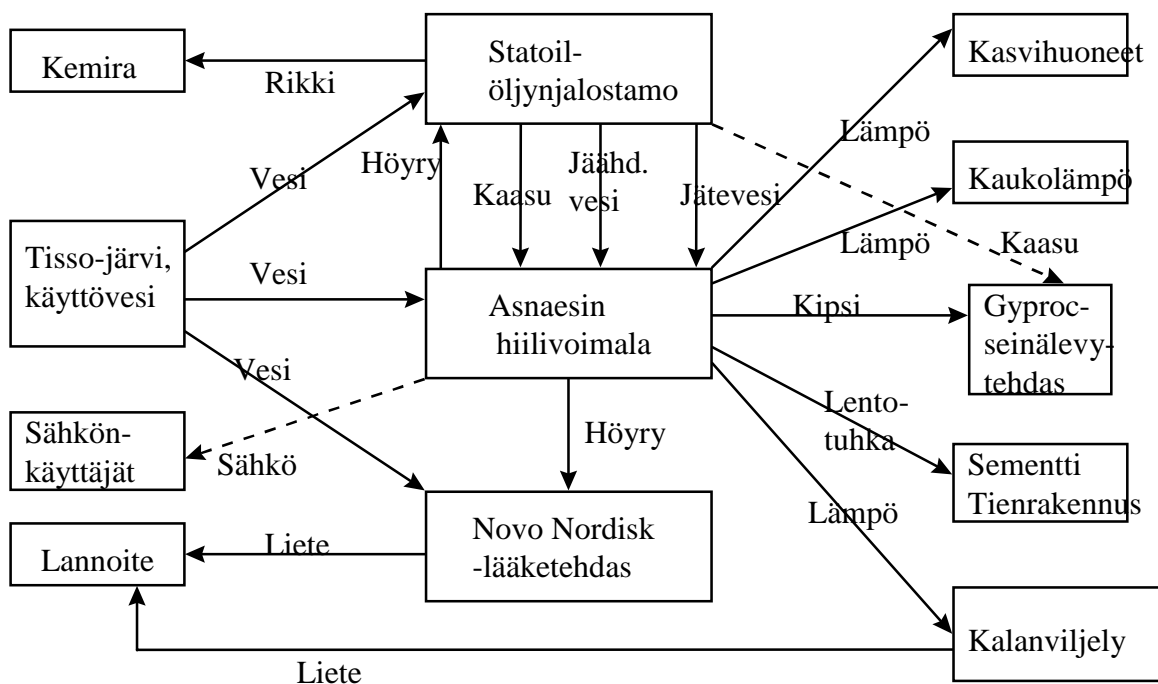
Kalundborgin teollisuus- ja energiantuotantolaitosten muodostama verkosto (kuva 1) esitetään usein esimerkkinä niin sanotuista teollisista ekosysteemeistä. Teollisella ekosysteemillä tarkoitetaan laitos- ja toimintoverkosta, jossa syntyvät materiaali- ja energiavirrat hyödynnetään mahdollisimman suuressa määrin. Verkosto on syntynyt alueelle vähitellen kahdenkymmenen vuoden kuluessa. Kaikki hyötykäyttösopimukset on tehty kahdensivuisina ja lähinnä taloudellisista syistä, eli yritykset pyrkivät hyödyntämään jätemateriaaleja ja -energiaa tuottavasti. Yritykset ovat pyrkineet hyödyntämään vain omaan ydinosaamiseensa liittyviä virtoja, uusia sivuversoja ei ole luotu jätevirtojen hyödyntämiseksi. Ympäristöhyöty ja sen tuoma markkinointiarvo havaittiin vasta, kun verkosto oli jo pääosin syntynyt.

Alueella toimivista yhteistyöosapuolista tärkeimmät ovat

- Asnaesin hiilivoimala, joka on Tanskan suurin, 1 500 MW:n voimala
- Statoilin öljynjalostamo, tuotantokapasiteetti 4,8 milj.t/a
- Gyprocin kipsilevytehdas, tuotantokapasiteetti 14 milj. m²
- Novo Nordisk, kansainvälinen biotekniikkayritys, jonka Kalundborgin tehdas tuottaa lääkeaineita ja teollisuusentsyymejä
- Kalundborgin kaupunki, joka toimittaa kaukolämpöä 20 000 asukkaalle sekä vettä teollisuudelle ja asukkaille
- kasvihuoneet, kalankasvattajat ja maarakennusurakoitsijat, jotka hyödyntävät lämpöä tai jäännösmateriaaleja

Alun perin Statoil poltti suuren osan tuotetusta kaasusta soihdussa ja hiilivoimalan kokonaishyötysuhde oli noin 40 %:a. 1970-luvun alkupuolella alueelle siirtyi Gyproc hyödyntääkseen Statoilin siihen asti polttamalla hävitettyä kaasua. 1980-luvun alussa Kalundborgiin valmistui kaukolämpöverkko, johon lämpö toimitettiin Asnaesin voimalasta. Sen jälkeen Novo Nordisk ja Statoil aloittivat Asnaesin höyryn käytön. Voimala käyttää jäähdytykseen osittain suolaista merivettä, josta osa toimitetaan kalanviljelylaitokselle. Vuonna 1992 voimala korvasi osan hiilestä jalostamokaasulla. Tämän edellytyksenä oli jalostamon rikinpoiston parantaminen.

1970-luvulla alkoi jättemateriaalien hyötykäyttö, kun Novo Nordiskin ja kalanviljelylaitoksen vedenkäsittelyprosessin lietettä (yhteensä n. 1 milj. t/a) alettiin käyttää lannoitteena läheisillä maataloilla. Voimalan rikinpoistokipsi myydään Gyprocille, jonka raaka-aineesta kaksi kolmannesta on peräisin voimalasta. Lentotuhka hyödynnetään sementintuotannossa. Jalostamon rikinpoistotuotteena syntyvä nestemäinen rikki käytetään rikkihappotuotannossa.



Kuva 1. Asnaesin hiilivoimalan (Kalundborg) integrointi ympäröivään teolliseen ja kaupunkiyhteisöön (Karamanos 1995).

Novo Nordiskin pääjohtajan mukaan (Indigo Development 1996) yhteistyöverkoston kehittämisedellytykset ovat parhaat, jos mukana olevat laitokset ovat erilaisia mutta yhteensopivia ja tehdyt sopimukset taloudellisesti järkeviä ja tuottavia. Parhaiten toimii vapaaehtoisesti syntynyt yhteistyö, jonka edellytyksiä voidaan kui-

tenkin parantaa viranomaisten tuella. Kuljetusten taloudellisuuden varmistamiseksi osapuolten on sijaittava lähellä toisiaan. Toiminnan syntymistä edistää, jos yritysten johto tuntee toisensa ennestään.

7.5 ESIMERKKEJÄ HOLLANNISTA

7.5.1 Kehityssuunnat Hollannissa

Hollannissa lämmitysenergian kulutus on vähentynyt huomattavasti viidentoista viime vuoden aikana, koska talot on eristetty paremmin energian säästämiseksi. Lämmöntuotannon polttoaineena on lähes kokonaan maakaasu. Noin 96 % asunnoista on liitetty maakaasuverkkoon. Kaukolämpöverkkoon on koko maassa liitetty noin 300 000 asuntoa, mikä on vähän alle 3 % kokonaismäärästä. 95 % kaukolämmöstä tuotetaan yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa, jonka pää-polttoaineet ovat maakaasu (> 70 %) ja hiili (25 %). Loppuosa tuotetaan pääosin jätteenpolttolaitoksissa. Sähköntuotannossa hiilen osuus oli vuonna 1994 46 % ja maakaasun osuus 42 %.

Tavoitteeksi on asetettu rakentaa sähkön tuotantolaitokset kohteisiin, joissa lämpö pystytään käyttämään hyväksi, ja kaksinkertaistaa näin kaukolämmön tuotanto vuoteen 2000 mennessä. Vertailuvuotena on vuosi 1990. Kaukolämpöverkkoon pyritään liittämään pääasiassa suuria yksiköitä, kuten virastorakennusalueita, yliopistoja ja hotelleja, koska asuntojen lämmitysenergian tarve on vähäinen. Yleisiä energiapoliittisia tavoitteita ovat tuotannon hyötysuhteen nostaminen (sisältää myös yhdistetyn tuotannon lisäämisen), tuotannon varmuuden turvaavan polttoainejakauman säilyttäminen, päästöjen rajoittaminen ja energian säästö.

7.5.2 Hemweg 08, Amsterdam

Amsterdamin Hemwegin laitos (yksikkö 08) on otettu käyttöön vuonna 1994. Hollannin energiapoliittiset tavoitteet otettiin huomioon laitossuunnittelussa sijoittamalla voimala siten, että myös lämpö voidaan käyttää hyväksi. Voimala-alueella on myös aikaisemmin rakennettuja hiili- ja maakaasukäyttöisiä lauhdelaitoksia. Hemweg 08 on hiilen pölypolttolaitos, jossa on ylikriittinen prosessi. Polttoaineena voidaan käyttää myös maakaasua. Laitoksen sähköteho on 630 MW ja lämpöteho 460 MW. Sähköntuotannossa hyötysuhde on 44 %. Laitoksen päästöjen vähentämiseksi käytetään sähkösuodinta, low-NO_x-polttimia ja märkäpesuria rikinpoistoon. Rikinpoistoteho on 89 % ja saavutettava typpipäästötaso on 260 mg/m³.

Polttoaineena käytettävä hiili varastoidaan purkusatamassa noin kahden kilometrin päässä laitoksesta. Sieltä valmiiksi sekoitettu hiili siirretään päivittäin hihnakuuljettimella laitoksen varastoalueelle.

7.5.3 Utrecht, Lage Weide 6

Utrecht on Hollannissa ensimmäinen kaupunki, jossa on otettu käyttöön kaukolämpö jo 1920-luvulla. Vuonna 1970 Utrecht-Nieuwegeinin alueelle toimitettu lämpömäärä oli noussut 2 500 TJ:een vuodessa ja vuonna 1996 jo 3 200 TJ:een. Vuonna 1995 valmistui uusi Lage Weiden maakaasuvoimala, jonka sähköntuotantoteho yhdistetyssä tuotannossa on 220 MW ja lämmöntuotantoteho 180 MW. Lauhdekäytössä sähköteho on 250 MW. Sähkö toimitetaan kansalliseen sähköverkkoon ja lämpö Utrecht-Nieuwegeinin kaukolämpöverkkoon. Laitos rakennettiin kanaalin rannalle voimalaitostontille, jolla ollut aikaisempi hiililaitos purettiin. Laitos oli suunniteltava siten, että se pystyttiin sovittamaan ennalta määrättyyn paikkaan ja olemassa olevaan rajoitettuun tilaan.

7.6 WIEN

7.6.1 Kehityssuunnat Itävallassa

Tavoitteena on saatavissa olevien energiantuotantomahdollisuuksien optimaalinen hyödyntäminen ja erityisesti kotimaisen bioenergian (jätteiden, hakkeen, oljen) osuuden kasvattaminen. Bioenergiaa pyritään käyttämään varsinkin harvaan asuttujen alueiden pienissä lämpölaitoksissa. Maakaasu on Itävallassa merkittävä polttoaine. Uusia asuma-alueita rakennettaessa siirrytään yhä enemmän kaukolämpöön; vuonna 1981 rakennetuista asunnoista jo 59 % on kaukolämmitettyjä, kun ennen vuotta 1919 rakennetuista asunnoista vain noin 20 % on liitetty kaukolämpöverkkoon.

7.6.2 Toimintaympäristö ja tuotantolaitokset

Wienin energiantuotantojärjestelmän erikoispiirteinä ovat lähes kaupungin keskustaan sijoitetut jätteenpolttolaitokset. Laajempi siirtyminen kaukolämpöön alkoi vuodesta 1971, jolloin Spittelaun pääasiassa jätettä polttoaineena käyttävä sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos aloitti toimintansa. Vuoteen 1996 mennessä kaukolämpöverkkoon liitettyjen asuntojen lukumäärä oli noussut 150 000:een ja lisäksi oli olemassa valmiudet liittää verkkoon noin 70 000 muuta asuntoa (Anon 1995a). Kaukolämpöön liitettyjen asuntojen osuus on noin 32 % kokonaisuudessaan. Lisäksi kaukolämpöä toimitetaan yli 3 000 suurasiakkaalle. Suurin osa kaukolämmöstä tuotetaan yhdistetyissä sähkön- ja lämmöntuotantolaitoksissa Simmeringin voimalan kahdessa yksikössä ja aikaisemmin huippuvoimalana toimineessa Leopoldaun kaasuturbiinilaitoksessa, joka muutettiin sähkön- ja lämmöntuotantoon soveltuvaksi vuonna 1987.

Spittelaun lisäksi kaupungissa on myös vuonna 1985 rakennettu Flötzersteigin jätteenpolttolaitos. Laitoksissa käsitellään yhteensä 450 000 tonnia jätteitä vuodessa,

mikä on 54 % Wienissä syntyvästä kokonaisjättemäärästä. Myös ongelmajätteen käsittelylaitos, EBS, on kytketty Wienin kaukolämpöverkkoon. Jätteillä tuotetun kaukolämpöenergian osuus on noin viidesosa vuotuisesta tarpeesta.

Spittelaun jätepolttoaineella tuotettava lämpöteho on 60 MW ja sähköteho 6 MW. Laitoksessa on myös kolme lämpötehoaan 20 MW:n kaasukattilaa sekä kaksi huippu- ja varakäytössä olevaa kaasu-öljykattilaa. Laitos sijoitettiin nykyiseen paikkaan, koska suunnitteluvaiheessa päätavoitteena oli tuottaa lämpöä läheiseen sairaalaan. Lisäetuna oli mahdollisuus jäähdytysveden saantiin viereisestä kanavasta. Jätteiden hävittäminen ja lämmöntuotanto päätettiin yhdistää, koska jätteiden kaatopaikkasijoitus oli samanaikaisesti vaikeutunut tilanpuutteen vuoksi.

Spittelaun laitos tuhoutui osittain tulipalossa vuonna 1987. Laitosta uusittaessa sinne rakennettiin uusimman tekniikan mukainen savukaasujen puhdistuslaitos, joka korvasi vuotta ennen paloa valmistuneen tasoltaan vaatimattomamman laitoksen. Kaasut puhdistetaan pesurilla. Pesuvesi voidaan tarvittaessa kierrättää, mutta tavallisesti se puhdistetaan ja palautetaan vesistöön. Laitokseen asennettiin myös typenpoistolaitos, joka silloin oli vielä uutta, kokeiluvaiheessa olevaa tekniikkaa. Dioksiinipäästöt on pyritty rajaamaan mahdollisimman pieniksi ja ne ovat olleet selvästi alle vaaditun $0,1 \text{ ng TE/nm}^3$. Haitallisten päästöjen minimoimiseksi polttolämpötila on korkea, $1\ 150 \text{ }^\circ\text{C}$. Viranomaiset ovat velvoittaneet laitoksen seuraamaan jatkuvatoimisesti hiukkas-, rikkidioksidi-, kloorivety-, typpioksidi-, hiilimonoksidi- ja hiilivety-päästöjä. Asukkaiden epäluulojen vähentämiseksi laitokseen on asennettu valotaulu, josta voidaan jatkuvasti seurata näitä päästömitaustuloksia.

Laitoksella syntyvästä kuonasta erotetaan metallit. Kuona ja tuhka stabiloidaan sementillä ja sijoitetaan suljettuun suolakaiivokseen. Syntyvän jätteen kokonaistilavuus on noin 10 % laitokseen syötettävän jättemäärän kokonaistilavuudesta.

Keskustasijainnin vuoksi myös laitoksen ulkoasuun kiinnitettiin erityistä huomiota. Julkisivu, jonka on suunnitellut kansainvälisesti tunnettu Friedensreich Hundertwasser, kuuluu kaupungin tuntomerkkeihin. Laitoksessa on myös äskettäin avattu taidegalleria, jossa järjestetään kotimaisten taiteilijoiden näyttelyitä.

7.7 YHTEENVETO

Esimerkkikaupunkien voimalaratkaisut ovat lähtökohtien eroista johtuen hyvin erilaisia. Voimaloiden suunnitteluun vaikuttaneita maakohtaisia ja alueellisia lähtökohtia ovat olleet erityisesti

- rakentamisajankohta. Ensimmäisiä laitoksia sijoitettaessa ennusteet lämmön ja sähkön tarpeen kasvusta ovat yleensä olleet eri tasolla kuin toteutunut kulutuk-

sen kasvu, jolloin on jouduttu etsimään uusia sijoitusalueita edellisten käydessä riittämättömiksi.

- valtion energiapoliittiset tavoitteet, ja erityisesti polttoaineisiin liittyvät painotukset (biopolttoaineiden käytön lisääminen, maakaasun käyttö), kaukolämmön käytön edistäminen, pyrkimys korkeisiin hyötysuhteisiin ja uusien edistyneiden tekniikoiden suosimiseen
- käytettävissä olevat polttoaineet
- käytettävissä olevat sijoituspaikat
- kansalliset ja alueelliset ympäristöpoliittiset tavoitteet ja ympäristönsuojeluun liittyvät painotukset
- asukkaiden hyväksynnän saavuttaminen, joka on edellyttänyt mm. matalia päästötasoja, päästöjen seuranta, laitosten sopeuttamista ympäristöön ja tiedottamista. Ympäristötietoisuuden kasvu on johtanut toiminnan aikaisen ympäristöhallinnan ja seurannan parantamiseen sekä uusiutuvien energiamuotojen tukemiseen ja kehittämiseen sekä asiakastyytyväisyyden seurantaan. Hyödyntämiskelpoisten jätteiden tuottamisen ja kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisen merkitys on edelleen kasvamassa.

Kansainvälistyminen ja kansainväliset sopimukset ovat monilta osin yhtenäistäneet kansallisia energiapoliittisia tavoitteita ja sen seurauksena myös paikallisten laitosten suunnitteluperusteita. Yleisiä suuntauksia ovat esimerkiksi

- hiilen korvaaminen muilla polttoaineilla, mikäli mahdollista
- energian tuotantotehon nosto ja siirtyminen yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon
- bioenergian ja muiden uusiutuvien energiamuotojen käytön merkityksen painottaminen
- rikki- ja typpipäästöjen rajoittamistekniikoiden käyttö
- pyrkimys jätteiden hyötykäyttöön.

8 TUOTANTOVAIHTOEHTOJEN VERTAILU

Hiilivoiman tuotantotekniikoita kehitetään monella taholla. Tuotantovaihtoehtoja sekä niihin liittyviä prosessi- ja kaasunpuhdistuslaitteistovaihtoehtoja on runsaasti. Myös hiilen tuotanto- ja esikäsitteilytekniikkaa pyritään kehittämään siten, että polttoaine tulevaisuudessa olisi entistä puhtaampaa ja helppokäyttöisempää. Tutkimus- ja kehitystyön laajuus ja monipuolisuus parantaa mahdollisuuksia valita entistä paremmin paikallisten tarpeiden mukaiset tuotantoratkaisut. Toisaalta kuitenkin tuotantotekniikoiden vertailu ja valinta vaikeutuu entisestään vaihtoehtojen lisääntyessä.

8.1 TEKNISET OMINAISUUDET

Valittujen tuotantovaihtoehtojen teknisiä ominaisuuksia vertaillaan taulukossa 4. Vertailtavista ominaisuuksista esitetään tällä hetkellä saavutettavissa olevaksi arvioitu taso. Kehitteillä olevista tekniikoista esitetään myös vuoteen 2010 saavutettavaksi arvioitu hyötysuhde. KTM on arvioinut, että taulukossa mukana olevien tekniikoiden lisäksi myös paineistettu pölypoltto ja yhdistetty kaasutus- ja poltto-kennotekniikka saattavat vuoteen 2015 mennessä olla kehittyneet kaupalliseen mittakaavaan, jolloin niiden sähköntuotannon hyötysuhde on noin 55 % (KTM 1997a).

Monet taulukossa 4 esitetyistä vertailutekijöistä ovat laitoskohtaisia. Laittevalinnoilla, puhdistustekniikan tasoa parantamalla, polttoainelaadun valinnalla ym. voidaan vaikuttaa esimerkiksi saavutettaviin päästötasoihin. Käytännön ratkaisussa saavutettavissa olevat tasot ovatkin suurelta osin optimointikysymys, jossa olisi samaan aikaan pystyttävä ottamaan huomioon tekniikka, ympäristövaikutukset, kustannukset ja yhteiskunnalliset tekijät ja valittava kaikkien näiden kannalta paras kompromissiratkaisu.

Taulukko 4. Tuotantovaihtoehtojen tekniset ominaisuudet ja kehitysarviot

Ominaisuus	Pölypoltto, perinteinen	Pölypoltto, ylikriittinen höyryprosessi	Ilmanpaineinen kierto- leijupoltto	Paineistettu leijupoltto (Topping)	Kaasutus	Maakaasukombi	Kaupunkivoimalan vaatimukset
Sähkön tuotannon hyötysuhde, % (LHV)	38 - 42	43 - 47	38 - 42	40 - 43 (45 - 50)	43 - 50	50 - 58	Korkea
Hyötysuhde yhdistetysä sähkö- ja lämmön tuotannossa, %	88 - 89 %	89 - 90 %	88 - 89 %	88 - 90 %		90 - 91 %	Korkea
Rakennusaste (sähkön ja lämmön tuotantosuhte)	0,6	0,6 - 0,65	0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 1,1	1,1 - 1,2	Yleensä korkea
Minimi/maksimikoko	> 100 MW _{el}	> 100 MW _{el}	> 50 MW _{el}	> 100 MW _{el}	> 250 MW _{el}		100 - 400 MW _{el}
Kehitysvaihe 1997	Kaupallinen	Kaupallinen – demo	Kaupallinen	Pilot-demo	Demo	Kaupallinen	Kaupallinen
Arvioitu kehitysvaihe 2010	Kaupallinen – poistuva	Kaupallinen	Kaupallinen	Kaupallinen	Kaupallinen	Kaupallinen	
Vaatimukset polttoaineelle	Hiili Turve Biopolttoaine < 10 % Ei suuria laatuvahteluita	Hiili Turve Biopolttoaine < 10 % Ei suuria laatuvahteluita	Hiili, jäte, turve, biomassat, seospolttoaineet, myös heikkolaatuiset ja hankalat polttoaineet. Polttoainevaihdot mahdollisia, mikäli suunniteltuja	Hiili, jäte, turve, biomassat, seospolttoaineet, myös heikkolaatuiset ja hankalat. Polttoainevaihdot mahdollisia, mikäli suunniteltuja	Turve, biomassat, hiili, myös heikkolaatuiset polttoaineet	Maakaasu (öljy varapolttoaine)	Helposti varastoitava, mahdollisimman vähän kuljetuksia, pölyämätön, hajuton, riskitön ym.
Vaadittava rakennusaika	42 - 60 kk	42 - 60 kk	42 - 60 kk	42 - 60 kk	42 - 60 kk	24 - 48 kk	
Tilantarve - laitos	1	1 - 1,1	0,8 - 0,9	0,5 - 0,7	2 - 3	< 1	Myös korkeus tärkeä, saatavissa oleva tila rakentamisen aikaisine kulkuväylineen rajoittaa
- varastot	Hiilikenttä tai maanalaiset varastot, mahdollisten seospolttoaineiden varastot					Öljysäiliöt	
Soveltuvuus vanhojen laitosten uusimiseen			Soveltuu, jos kattila uusittava	Hyvä, jos vain kattila uusittava	Soveltuu, 1) jos halutaan lisätehoa; 2) jos kaasu käytetään lisäpolttoaineena	Kaasuturbiinin lisäys höyryvoimalaan mahdollinen	

Taulukko 4. Tuotantovaihtoehtojen tekniset ominaisuudet ja kehitysarviot (jatkuu).

Ominaisuus	Pölypoltto, perinteinen	Pölypoltto, ylikriittinen höyryturbiini	Ilmanpaineinen kiertoleijupoltto	Paineistettu leijupoltto (Topping)	Kaasutus	Maakaasukombi	Kaupunkivoimalan vaatimukset
Päästöjen käsittely: Hiukkaset	Sähkö- tai kuitusuodin		Sähkö- tai kuitusuodin	Sykloni + kuitu- tai sähkösuodin ja keraaminen suodin	Sykloni + keraaminen suodin (+ pesuri)	-	Viranomaisvaatimusten mukainen
Rikki	Rikinpoistolaitos, poisto sulfaattina tai sulfiitti-sulfaattiseoksena		Sorbentti	Sorbentti	Leijukaasutus: Kalkkisorbentti + rikinerotussorbentti	-	
Typpi	Polttotekniikka, SNCR, SCR		SNCR (SCR) >90 % NO _x polttoaineesta	SNCR (SNCR + SCR), >90 % NO _x polttoaineesta		Polttotekniikka, vesiruisutus, SCR	
Päästöjen käsittely - kehitysnäkymät	Kangassuotimet Yhdistetyt poistotekniikat, rikinpoisto alkuaainerikkinä tai rikkihappona, elohopean poisto, jätteistä tuotteita (tuhkat)		Sorbentin käytön tehostaminen Jätteistä tuotteita	Keraamiset suotimet, sorbentin käytön tehostaminen, jätteistä tuotteita	Keraamiset suotimet, puhdistustekniikkaa kehitetään edelleen	Polttoteknisen NO _x -poiston kehittyminen edelleen	
<u>Päästöt ilmaan** polttoainetehoa kohti :</u>							
NO _x , ei katalyyttia	< 70 mg/MJ	< 70 mg/MJ	< 70 mg/MJ	< 70 mg/MJ	< 60 mg/MJ	< 35 mg/MJ	
katalyytti	< 60 mg/MJ	< 60 mg/MJ	20 - 40 mg/MJ	20 - 50 mg/MJ		< 20 mg/MJ?	
SO ₂	< 70 mg/MJ		50 mg/MJ (Ca:S 2-3) <50 mg/MJ (Ca:S>3, tuhkan määrä suuri)	50 mg/MJ (Ca:S 1,5 - 2) 30 mg/MJ (Ca:S 2 -3)	< 20 mg/MJ		
Hiukkaset	< 25 mg/MJ	< 25 mg/MJ	< 25 mg/MJ	< 5 mg/MJ	< 5 mg/MJ	<1 mg/MJ	
Muut epäpuhtaudet:							
N ₂ O	<10 mg/MJ	<10 mg/MJ	20 – 70 mg/MJ	< 20 mg/MJ	?	?	
CO ₂ *** /sähkötehoa kohti	220 - 245 g/MJ	200 - 216 g/MJ	220 - 245 g/MJ	215 - 235 g/MJ (185 - 210 g/MJ)	185 - 216 g/MJ	90 - 105 g/MJ	

Taulukko 4. Tuotantovaihtoehtojen tekniset ominaisuudet ja kehitysarviot (jatkuu).

Ominaisuus	Pölypoltto, perinteinen	Pölypoltto, ylikriittinen höyryturbiini	Ilmanpaineinen kiertoleijupoltto	Paineistettu leijupoltto (Topping)	Kaasutus	Maakaasukombi
<u>Jätteet:</u>						
Tuhkan ominaisuudet	Hyödyntämiskelpoinen (yleensä), jonkin verran liukoisia metalleja		Tuhka sekoittuu rikinpoistojätteeseen	Tuhka sekoittuu rikinpoistojätteeseen	Happikaasutustuhka inertti, lasimainen, hyödyntämiskelpoinen, leiju- ja ilmakkaasutustuhkat vaativat jatkokäsittelyä hiilipitoisuuden vuoksi	-
RP-jäte + tuhka – suhteellinen määrä	1		2 - 2,5	1,5 - 2 (PFBC)*** 1 - 1,5 (PCFB)	-	-
- ominaisuudet	Jätteen ominaisuudet ja hyödynnettävyys menetelmäkohtaisia - märkämenetelmän jäte hyödynnettävissä rakennusteollisuudessa - puolikuivamenetelmän jäte liukoisten suolojen vuoksi heikosti hyödynnettävää ilman lisäkäsittelyjä - alkuainerikille löydettävä käyttökohteita		Alkalinen, vapaa kalkin reagointi hankaloittaa käyttöä Liukoisia sulfaatteja Hyötykäyttö vähäistä, vaatii lisätutkimusta	Vapaan kalkin pitoisuus pieni Liukoisuudet pieniä Hyötykäyttö mahdollista (jatkotutkimukset tarpeen)		-
Kemikaalien käyttö:						
Ca:S (90 % rikinpoisto)	1 - 1,5	1 - 1,5	2 - 3	1,5 - 2 (PFBC)		-
Katalyyttitekniikat	NH ₃	NH ₃		1 - 1,5 (PCFB)		
Riskit	Ammoniakin käyttö typenpoistossa			Paineistus	Paineistus	Kaasuvuodot

* KTM:n hyötysuhde-ennusteet vuodelle 2015: pölypoltto, ylikr. höyryprosessi 51 %, paineistettu leijupoltto 50 %, kaasutus 54 % ja maakaasukombi 60 % (KTM 1997a)

** Päästötasot arvioitu olettaen, että polttoaineena on hiili, jonka laatuvahtelut vaikuttavat myös päästötasoihin. Puhdistustehoon voidaan vaikuttaa myös laitevalinnoilla. Haluttaessa voidaan päästä tiukempiin päästötasoihin, mutta tämä nostaa yleensä kustannuksia ja saattaa vaikuttaa mm. jätemääriin ja jätteiden käsiteltävyyteen.

*** Tekniikalla saavutettavat CO₂-päästötasot on arvioitu olettaen, että kiinteätä polttoainetta käyttävissä laitoksissa polttoaineena on hiili. Laskelmien perustana oleva hiilen CO₂-ominaispäästö on 93 g/MJ ja maakaasun 53 g/MJ.

8.2 PÄÄOMA- JA KÄYTTÖKUSTANNUKSET

Pääomakustannuksiin vaikuttavat mm. sijaintipaikka, vaaditut päästötasot ja kustannusten arviointimenetelmä. Takaisinmaksuaika ja korko vaikuttavat huomattavasti vuosikustannuksiin. Takaisinmaksuaikana on valtiollisten yhtiöiden projekteissa käytetty 30 vuotta ja vuosikorkona (discount rate) 4 - 6 %, yksityisillä takaisinmaksuaika voi olla 20 vuotta ja vuosikorko 8 - 15 %. Kokonaisuutena kustannusarviot ovat luotettavimpia laitostyypeille, joiden rakentamisesta ja käytöstä on jo runsaasti kokemusta. Seuraavissa taulukoissa esitettävät kustannukset perustuvat koti- ja ulkomaisissa lähteissä tehtyihin laskelmiin. Koska saatavissa olevat ulkomaiset kustannusvertailut on pääosin tehty lauhdelaitoksille, taulukoissa on esitetty myös niitä koskevia tietoja.

Kustannukset esitetään seuraavassa suhteellisina, koska kustannustasoon vaikuttavat aina monet laitos- tai maakohtaisesti muuttuvat seikat. Taulukon 5 kustannusarviot on laskettu Ranskaan sijoitettavalle, hiiltä polttoaineena käyttävälle laitokselle vuoden 1997 kustannustasolla. Vertailussa rikinpoistolaitoksella varustetulle pölypolttolaitokselle, jossa on ylikriittinen prosessi, on asetettu kustannustasoksi 100 ja muita laitostyyppejä on verrattu tähän. Tyypipäästöille on vaatimukseksi asetettu katalyyttiteknikalla pölypoltossa saavutettava taso. Kustannusarvioissa ei ollut mukana maakaasulaitosta.

Taulukko 5. Hiiltä polttoaineena käyttävän lauhdevoimalaitoksen rakentamis- ja käyttökustannusten vertailu (Foster Wheeler 1997).

Kustannustekijä	Pölypoltto + rikinpoisto	Ilmanpaineinen leijupoltto	Paineistettu kerrosleijupoltto	Paineistettu kiertoleijupoltto	IGCC	Topping cycle
Rakennuskustannukset	100	90	101 - 104	79 - 86	113 - 117	97 - 106
Pääomakustannukset	100	90	100 - 103	79 - 85	115 - 118	97 - 106
Käyttö- ja ylläpitokustannukset	100	90	126 - 130	113 - 123	151 - 155	133 - 145
Polttoainekustannukset	100	102	104	97	101	94
Sähkön hinta	100	95 - 96	108	95 - 97	114 - 116	104 - 107

Laitoskoko vaikuttaa suhteellisiin, tuotettua energiayksikköä kohti laskettuihin kustannuksiin. Taulukossa 6 on lauhdesähkön tuotantolaitoksille kokoluokissa noin 150 MW sähköä ja 300 MW sähköä tehty kustannusvertailu (Maude 1993). Laskelmissa on oletettu, että laitos sijoitetaan Keski-Eurooppaan ja siinä on rikinpoistolaitos, mutta ei katalyyttista typenpoistoa. Kyseessä on lauhdelaitos. Lisäksi on oletettu, että laitoksen sijoituskohteessa ei ole aikaisemmin ollut energiantuotantolaitosta.

Taulukko 6. Hiilivoimalaitosten arvioitujen investointikustannusten ja sähköntuotantokustannusten vertailu sähköteholtaan noin 150 MW:n ja 300 MW:n lauhdevoimalaitoksille (Maude 1993). Investointikustannukset ja sähköntuotantokustannukset on muutettu suhteellisiksi kustannuksiksi. Lisäksi taulukossa on esitetty joidenkin kustannuserien prosentuaaliset osuudet laitoksen kokonaisinvestointikustannuksista.

Kustannustekijä	Pölypoltto			Ilmanpaineinen leijupoltto		Paineistettu leijupoltto		Topping	IGCC, ilma-kaasutus
	140 MW	280 MW konv.	280 MW ylikr.	140 MW	280 MW	171 MW	360 MW	500 MW	244
Suhteelliset kokonaisinvestointikustannukset /MW sähkötehoa	172	100	108	111	93	99	79	79	94
Sähkön suhteellinen hinta	122	100	109	110	92	98	78	79	93
Investointikustannusten jakautuminen, % investointikustannuksista									
Kattilalaitos, %		29	30		35		23		15
Rikinpoistolaitos, %		10	9						5
Höyry-kaasuturbiini, %		17	19		18		9		15
Veden käsittely ja jäähdytysvesijärjestelmä, %		9	8		9		9		7

Taulukossa 7 esitetään Lehtilän (1995) mahdollisimman paljon kotimaisia tietoja käyttäen tekemät arviot noin vuonna 2000 rakennettavan yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotantolaitoksen kustannuksista. Laskelmissa ovat mukana laituskustannukset kaasunpuhdistuslaitteistot mukaan lukien, mutta ei sijoituspaikkakustannuksia.

Savukaasujen käsittelyn osuus kokonaiskustannuksista on noussut vaatimusten kiristyessä. Vuonna 1996 Tanskassa suunnitellun pölypolttolaitoksen kustannusarviossa kattilalaitoksen osuudeksi arvioitiin 20 - 30 %, savukaasujen käsittelyn 20 - 25 %, höyryturbiinin 10 - 15 %, rakennusten, sijoituspaikan ym. 15 - 20 %, sähkö- ja säätölaitteiden sekä putkistojen 9 - 15 %, suunnittelun 5 - 10 % sekä muiden kustannusten 5 - 7 % kokonaiskustannuksista (Kjaer 1996).

Taulukko 7. Energiantuotantotekniikoiden arvioituja kustannuksia yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa noin vuoden 2000 tasolle laskettuna (Lehtilä 1995).

Laitostyyppi	Sähköteho, MW	Lämpöteho, MW	Inv.kust. milj. mk	Inv.kust, mk/kW	Kiinteät käyttökust (mk/kW)	Muuttuvat käyttökust. (mk/MWh)*
Ilmanpaineinen leijupoltto	98	160	652	2528	38	5,5 + 64 (69,5)
PFBC	90	130	670	3045	72	11,8 + 65 (76,8)
IGCC	90	102	670	3 490	81	10,3 + 64 (74,3)
Maakaasukombi	157	157	667	2 126	28	3,6 + 73 (76,6)

kW = kW(e+h), MWh = MWh(e+h)

* sisältää polttoainekustannukset ja muut muuttuvat kustannukset

9 INTEGROITU YMPÄRISTÖNHALLINTA JA PÄÄTÖKSENTEKO

9.1 JOHDANTO

Yritysten ympäristönsuojelutoimiin vaikuttaa yhteiskunnan oikeudellinen ja taloudellinen ohjaus, joka osaltaan perustuu kansainvälisesti sovittuihin velvoitteisiin. Lisäksi yritysten ympäristönsuojelun tilaan vaikuttavat yritysten vapaaehtoisesti toteuttamat toimet, joiden perustana ovat omistajien, muiden sidosryhmien, kuluttajien sekä suuren yleisön näkemykset.

Kioton ilmastopimuksen mukaisesti EU-maat vähentävät 8 % vuoden 1990 kasvihuonekaasupäästöistä velvoitekauden 2008 - 2012 aikana. Yhdysvaltojen vähennys on 7 ja Japanin 6 %. Nämä vähennystavoitteet on otettava huomioon tulevaisuuden kaupunkivoimalan suunnittelussa. Kiotossa hyväksyttiin myös päästökaupan periaate, jota koskevista säännöistä ja linjauksista sovitaan seuraavassa ilmastokokouksessa vuoden kuluttua Argentiinassa.

Ilmansuojelusopimuksen ja muiden kansainvälisesti sovittujen velvoitteiden ohella Suomen ympäristönsuojelutoimiin vaikuttavat Euroopan Unionin nykyiset ja tulevat direktiivit sekä muut ympäristönsuojelua koskevat linjaukset ja toimintaperiaatteet. Hallinnollisen ohjauksen voimaloiden tulevaisuuteen vaikuttavia näkymiä on käsitelty kohdassa 3.1.1. Kohdassa 3.2.2. on käsitelty ympäristönsuojelun kustannusten arvioimiseen ja taloudelliseen ohjaukseen liittyviä EU:n linjauksia, joilla voi olla vaikutusta myös tulevaisuuden kaupunkivoimalan suunnitteluun.

Yritysten vapaaehtoisten ympäristönsuojelutoimien lähtökohtana ovat omistajien, yrityksen eri sidosryhmien, sen tuotteiden ostajien ja kuluttajien sekä suuren yleisön näkemykset ja mielipiteet. Yritysten ympäristöhallinnassa on jatkossa otettava yhä näkyvämmiin huomioon ympäristöasiat osana yrityskuvaa, ympäristöön liittyvä laatujohtaminen ja laatujohtamiset (ISO 14000, EMAS), ympäristökustannusten kehittyminen ja niiden laskenta eli ympäristötilinpito sekä ympäristöasioiden raportointi. Jatkossa ympäristönhallinta on yhä olennaisempi ja integroidumpi osa myös kaupunkivoimalan suunnittelua, toteutusta ja ohjausta.

Seuraavassa tarkastellaan (1) viranomaisten yritysten ympäristönsuojelulle asettamia velvoitteita ja ympäristönsuojelun talouden ja taloudellisen ohjauksen näkymiä sekä eräitä muita yhteiskunnan toimista ja toimintaperiaatteista seuraavia velvoitteita. Lisäksi arvioidaan (2) yritysten erilaisten vapaaehtoisten ympäristönsuojelua edistävien toimien ja niiden päätöksentekoa tukevien menetelmien kehitysnäkymiä sekä esitetään eräitä näihin liittyviä esimerkkejä energiasektorilta. Ympäristönhallintaan liittyviä menetelmiä ja menettelytapoja selvitetään lyhyesti taulukossa 8.

Taulukko 8. Ympäristöhallinnan menetelmiä (Bailey et al. 1996).

Arviointimenetelmä	Menetelmän kuvaus
Ympäristövaikutusten arviointi	Suunnittelu- ja päätöksentekoprosessi, jossa selvitetään systemaattisesti hankkeen vaikutukset luontoon, rakennettuun ympäristöön ja yhteiskuntaan sekä haitallisten vaikutusten vähentämisvaihtoehdot ja eri osapuolten kannanotot niihin. Arvioinnissa keskeisiä ovat hankkeen vaikutuksia koskevien tietojen kokoaminen, tiedottaminen ja osallistumismenettely sekä hankkeen ja sen vaihtoehtojen vaikutusten ja niiden merkityksen arviointi.
Ympäristöasioiden hallinta	Vapaaehtoinen ympäristöasioiden auditointi- ja tarkastusjärjestelmä (EMAS, EMS), jonka tavoitteena on varmistaa, että yritys toimii ympäristöpolitiikkansa ja -tavoitteidensa mukaisesti. EMAS edellyttää mm. ympäristöpolitiikan laatimista, ympäristöjohtamisjärjestelmän käyttöönottoa, toiminnan auditointia ja julkisen ympäristöselonteon laadintaa.
Teknologia-arviointi	Tietyn tekniikan myönteisten ja kielteisten ympäristö- ja yhteiskunnallisten vaikutusten systemaattinen arviointi.
Elinkaarianalyysi	Tuotteiden, materiaalien, prosessien tai toimintojen elinkaaren aikaisen ympäristökuormitusten ja niiden aiheuttamien vaikutusten arviointi (ja arvottaminen). Materiaali- ja energiataseiden laskennallinen määrittäminen on yleensä olennainen osa elinkaarianalyysia.
Ympäristökustannuslaskenta	Tuotteen tai toiminnan aiheuttamien ympäristöhaittojen taloudellinen arviointi
Ympäristönsuojelun kustannus-hyöty-analyysi	Toimenpiteen, projektin tms. ympäristöön liittyvien hyötyjen ja haittojen taloudellinen arviointi
Ympäristötarkastukset	Säännöllisesti toistuvat tarkastukset, joiden kohteena ovat yrityksen ympäristötoiminta (ympäristön eri osa-alueiden suojeleminen, ympäristöriskit, materiaalien ja energian kulutus, kuljetukset ym.), lakien ja lupamääräysten noudattaminen ja ympäristövastuiden jakautuminen.
Riskinarviointi	Riskin (ei-toivottujen seurausten todennäköisyyden ja vakavuuden) määrittäminen ja riskitason arviointi
Monikriteerinen päätösanalyysi	Päätöksentekijöiden tiettyyn päätösongelmaan liittyvien tavoitteiden ja arvostusten systemaattinen vertailu jonkin tätä varten kehitetyn analyyttisen tekniikan avulla
Delfi-tekniikka	Alan asiantuntijoiden käsityksiin perustuva päätökseen vaikuttavien tekijöiden merkityksen arviointimenetelmä
Skenaarioanalyysi	Ympäristöön vaikuttavien seikkojen systemaattinen selvittäminen vaihtoehtoisten tulevaisuuskuvioiden tai tulevaisuudenpolkujen hahmottamiseksi.
Ympäristömerkit	Tuotteelle myönnettävä todistus siitä, että se täyttää merkin antajan ympäristöä vähän kuormittavalle tuotteelle asettamat kriteerit. Käytössä on useita kansallisia, kansainvälisiä tai erilaisten järjestöjen merkkijärjestelmiä.
Ympäristöindikaattorit	Yksinkertaistettuja luonnon ja rakennetun ympäristön tilaa ja muutoksia kuvaavia fyysisiä tai taloudellisia "mittavälineitä".

9.2 NYKYINEN TILANNE KAUPUNKIEN ENERGIANTUOTANTOLAITOKSISSA

Ympäristöasioiden hoidon tilan arviointia ja ympäristönhallinnan järjestämistä pidetään energiaa tuottavissa yhtiöissä ja voimaloissa tärkeinä, koska sekä asiakkaiden että ympäröivän yhteisön ympäristötietoisuus on voimakkaasti kasvanut. Tämä näkyy esimerkiksi siinä, että asiakkaat pyytävät usein energiantuotannon elinkaaritietoja ja muuta tietoa ympäristöasioiden hoidosta. Myös kysymys “vihreästä sähköstä” on noussut esiin, vaikka laajaa kysyntää ei toistaiseksi ole ollut. Aihetta koskevan keskustelun seurauksena on kuitenkin käynnistynyt ekologisen energiantuotannon kriteereitä koskeva tutkimus.

Ympäristönhallinnan ja ympäristömyötäisen suunnittelun tilanne koetaan vielä sekavaksi, koska kehitteillä on samanaikaisesti useita järjestelmiä, joista osa on juridisesti velvoittavia, osa taas vapaaehtoisia. Jo terminologiaan, menetelmiin, niiden sovellettavuuteen ja käyttökelpoisuuteen perehtyminen vaatii runsaasti aikaa. Menetelmien ja menettelyjen kehittämisessä on myös usein sorruttu liiaksi menetelmän “puhdasoppisuuden” painottamiseen, jolloin sovellettavuus käytäntöön ja yhtymäkohdat muihin menettelyihin ovat jääneet liian vähälle huomiolle.

ISO 14001:n mukaisia ympäristönhallintajärjestelmiä ollaan valmistelemassa tai jo ottamassa käyttöön useissa voimaloissa, muun muassa pääkaupunkiseudulla. Monissa tapauksissa ympäristönhallinta integroidaan aiemmin kehitettyyn ISO 9001 tai vastaavaan laatu-järjestelmään. Henkilökunnan panosta pidetään erityisen tärkeänä järjestelmän luonnissa.

Kaupunkien energiantuotantoyhtiöt ovat myös osallistuneet tutkimuksiin, joissa on arvioitu energiantuotannon ulkoisia kustannuksia (mm. Otterström et al. 1995, Hongisto et al. 1997). Ongelmaksi on koettu mm. perustietojen riittämättömyys. Tämä koskee sekä päästömääriä että erityisesti päästöjen vaikutuksia, joiden perusteella kustannukset pyritään arvioimaan.

Ympäristövaikutusten arviointeja on YVA-lain voimassa ollessa tehty vain yhdestä kaupunkialueelle sijoitetusta yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon suunnitellusta voimalasta. Lisäksi on tehty muutamia lauhdevoimalahankkeiden arviointeja. Ympäristövaikutusten arviointi tulee kuitenkin EU-direktiivin muutosten jälkeen todennäköisesti koskemaan entistä pienempiä laitoksia.

9.3 YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN ARVIOINTI

YVA-laissa menettelyn päätavoitteiksi on määritelty ympäristövaikutusten yhtenäisen arvioinnin edistäminen ja yhtenäinen huomioon ottaminen suunnittelussa ja päätöksenteossa sekä kansalaisten tiedonsaannin ja osallistumismahdollisuuksien lisääminen. Menettelyssä arvioidaan suunnitteluvaiheessa hankkeen vaikutukset luontoon, rakennettuun ympäristöön ja yhteiskuntaan sekä selvitetään vaihtoehdot haittojen rajoittamiseksi ja eri osapuolten näkemykset niistä. Arvioinnissa keskei-

siä seikkoja ovat hankkeen vaikutuksia koskevien tietojen kokoaminen, tiedottaminen ja osallistumismenettely sekä hankkeen ja sen vaihtoehtojen vaikutusten ja niiden merkityksen arviointi.

9.3.1 Nykytilanne

Vuoden 1997 loppuun mennessä on toteutettu seitsemän voimalaitoksen YVA-lain mukainen ympäristövaikutusten arviointi. Lisäksi on tehty voimajohtolinjojen ja kahden voimalan jätteiden sijoitusalueiden ympäristövaikutusten arvioinnit. Arvioinnin teknistä toteutusta ja laitosten päästöjen sekä niiden vaikutusten arviointia on käsitelty melko kattavasti energiantuotantolaitosten ympäristövaikutusten arvioinnista laaditussa oppaassa (Seppälä 1995). Yhteiskunnallisiin vaikutuksiin ja osallistumismenettelyn toteuttamiseen kiinnitetään julkaisussa rajoitetummin huomiota.

Arviointiselostuksista annettujen yhteysviranomaisen lausuntojen perusteella päästöihin ja helposti määriteltäviin teknisiin yksityiskohtiin liittyvät vaatimukset täyttyvät melko hyvin. Enemmän puutteita on jätteiden sijoitettavuuden, mahdollisten "oheisprosessien" ja sosiaalisten vaikutusten arvioinnissa. Lain tavoitteiden koetaan toteutuvan vain osittain. Ongelmallisia alueita ovat erityisesti osallistuminen ja kokonaiskuvan saaminen hankkeen tarpeellisuudesta ja merkityksestä. Lausunnoissa toivotaankin nykyistä laajempaa näkökulmaa hankkeen ja sen vaihtoehtojen arviointiin ja siirtymistä osallistumiseen liittyvien minimivaatimusten täyttämistä aidosti vuorovaikutteiseen menettelyyn.

Hankkeiden merkityksen arviointia osana koko maan energiantuotantojärjestelmää pidettiin tärkeänä, varsinkin kun samanaikaisesti oli käynnissä useita erillisinä toteutettavia, osittain vaihtoehtoisten hankkeiden arviointeja. Ongelmaksi koettiin valtakunnallisten energiantuotantoa koskevien ohjelmien ympäristövaikutusten arvioinnin puuttuminen. Vaikka täydellistä kokonaisuuden arviointia ei yksittäisiltä hankkeilta voida edellyttää, toivottiin useampien sijoituspaikka- ja polttoainevaihtoehtojen käsittelyä sekä perusteellisempaa selvitystä toteuttamatta jätettävistä vaihtoehdoista. Esimerkiksi Imatran kaasuvoimalaitoksen arvioinnissa pidettiin kiinnostavana vaihtoehtoa, jossa vastaava laitos sijoitetaan pääkaupunkiseudulle. Maakaasuvaihtoehdon arviointia pidettiin kaikissa tapauksissa tärkeänä jo pelkästään päästöjen vertailutason saamiseksi. Myös kivihiilen uusien polttotekniikoiden tarkastelua kaivattiin.

Tuotantolaitosprojektin ja siihen liittyvien hankkeiden, kuten voimasiirtolinjojen ja läjitysalueiden, ympäristövaikutusten arvioinnin yhtäaikaista toteuttamista yhteistyössä hankkeesta vastaavien kesken pidettiin tärkeänä hankekokonaisuuden yhteisvaikutusten arvioimiseksi. Myös muiden "oheistoimintojen" (esim. liikennejärjestelyjen) yhteensovittaminen hankkeen kanssa siten, että kokonaishaitat saadaan minimoitua, katsottiin tärkeäksi.

Kokonaisuuden hahmottamista palvelee myös päästöjen ja niiden aiheuttamien vaikutusten asettaminen laajempaan yhteysvertaamalla niitä alueen tai maan

kokonaispäästöihin, arvioimalla niiden vaikutusta kriittiseen kuormaan alueella tai terveydelle haitallisten vaikutusten tasoon. Myös voimalan koko elinkaaren aikaisista vaikutuksista haluttiin arvioita kokonaistarkastelun helpottamiseksi.

Laajempaa näkemystä on useissa kohteissa pyritty tuomaan perustamalla jo ennen YVA-prosessia tai viimeistään YVA-prosessin käynnistyessä suunnittelu- tai ohjausryhmä, jossa on mukana hankkeen ulkopuolisten tahojen edustajia. Seurantarhmää onkin toivottu kaikkiin hankkeisiin. Ulkopuolista näkemystä on haluttu erityisesti merkittävyyden arviointiin. Haastattelu- ja kyselytutkimuksia on pidetty tarpeellisena, mutta niiltä on toivottu parempaa kattavuutta. Liian tiukkojen arviointiaikataulujen todettiin rajoittavan osallistumismahdollisuuksia.

Arviointiselostuksen yksittäisistä kohdista pidettiin puutteellisena erityisesti sosiaalisten vaikutusten arviointia, jonka tarkentamiseksi myös seurantaohjelmiin toivottiin asukaskyselyjen uusintoja sekä erilaisten jätemateriaali- ja -energiavirtojen (tuhkien, lauhdevesien, rakennusaikaisten jätteiden ja maa-ainesten) hyödyntämismahdollisuuksien arviointi. Myös polttoaineiden ja jätteiden kuljetusten vaikutuksia sekä polttoaineiden varastoinnin haittoja pidettiin monissa tapauksissa puutteellisesti selvitettyinä.

Arvioiduista hankkeista ainoastaan Kuopion Energian Kumpusaaren voimalaitoshanke on kaupunkivoimala. Siksi kaupunkikuvallisiin tekijöihin, joita mm. kaupunkialueelle sijoittuvissa tiehankkeissa on pidetty tärkeinä, ei ole juuri kiinnitetty huomiota. Kuopion hankkeen arvioinnissa vaihtoehtoina olivat 140 MW ja 350 MW yhdistetty sähkön ja lämmön tuotantolaitos, nollavaihtoehtona sähkön osto ja lämmöntuotanto öljyvesikattiloissa sekä polttoainevaihtoehdoista ensisijaisena turvetta ja vaihtoehtoisena kivihiltä. Yhteysviranomaisen lausunnossa puutteina pidettiin rakentamisen aikaisten vaikutusten haittojen rajoittamismahdollisuuksien ja maa-ainesten hyötykäyttämismahdollisuuksien, polttoaineen aiheuttamien pölyhaittojen ja polttoaineen varastointiin liittyvien kysymysten puutteellista käsittelyä sekä seurantaohjelman puuttumista. Myös vaikutuksia poikkeustilanteissa, kuten suodinlaitteiden ohitusten aikana, on pidetty tärkeinä lähellä asutusta.

9.3.2 Esimerkkejä muualta

Ympäristövaikutusten arviointia edellyttävä laki on voimassa mm. EU-maissa, Yhdysvalloissa, Kanadassa, Japanissa ja Uudessa Seelannissa. Myös Maailmanpankki vaatii hankkeilta ympäristövaikutusten arviointia. Lain sisältö, YVA-menetelmille asetettavat vaatimukset ja painotukset kuitenkin vaihtelevat. Joissakin maissa prosessi on osallistumisvaatimuksista huolimatta pääasiassa tekninen ympäristökuormitusten ja niiden vaikutusten arviointi, kun taas toisaalla pannaan erittäin paljon painoa yleisen hyväksynnän saamiselle ja sitä edistävälle vuorovaikutusprosesseille. Seuraavassa tarkastellaan YVA-prosessissa merkittäviksi katsottuja, laitoksen ja arvioinnin hyväksyntään vaikuttaneita seikkoja muutamissa esimerkeissä. Lisäksi kohdassa 7.2.3 tarkastellaan lyhyesti Tukholman Värtanin laitokselle YVA-prosessissa asetettuja vaatimuksia.

Nordjyllandsverket, Tanska

Kyseessä on v. 1997 valmistunut sähköteholtaan 400 MW:n hiilen pölypolttolaitos. Laitoksen hyötysuhde on 47 %. Ympäristövaikutusten arviointiprosessi osoitautui huomattavasti hankalammaksi kuin arvioinnista vastuussa ollut aluehallintoviranomainen oli olettanut. Ensimmäinen YVA-raportti hylättiin vuonna 1992 Valtion ympäristönsuojeluneuvoston käsittelyssä. Perussyinä olivat hankkeen vaihtoehtojen ja osallistumismenettelyssä esiin tulleiden asioiden käsittelemättä jättäminen.

Suppeaan laitoksen vaikutuksia ja niiden vähentämismahdollisuuksia käsittelevään menettelyyn oli päädytty, koska energiaministeriö oli jo antanut laitokselle rakennusluvan 1992 ja tämän vuoksi laitosvalintapäätöstä pidettiin tehtynä. Tanskassa YVA-menettely on liitetty kiinteästi aluesuunnitteluun ja arviointi tehdään tavallisesti samalla, kun tehdään alueen käyttötarkoituksen määrittävä maankäyttösuunnitelma. Tässä tapauksessa YVA-laki ei vielä ollut voimassa maankäyttösuunnitelmaa tehtäessä, jolloin jouduttiin poikkeusmenettelyyn, mikä lisäsi epäselvyyttä YVAN tarpeesta ja tasosta. Myös täydennetystä YVA-raportista tehtiin runsaasti huomautuksia, joissa arvosteltiin mm. sitä, että vaihtoehtojen arvioinnissa käytettiin pelkästään hanketta suunnittelevalta sähköyhtiöltä saatua tietoutta ja yhtiön omia arviointimenetelmiä. Osallistumismenettelyssä esiin tulleita asioita pidettiin riittämättömästi selvitettyinä ja hiilen käyttöä polttoaineena kansallisen energiasuunnitelman tavoitteiden vastaisena. Ympäristönsuojeluneuvosto kuitenkin hyväksyi YVA-selostuksen vuonna 1994.

Cedar Bayn leijupolttolaitos, Florida

Cedar Bay on sähköteholtaan 250 MW:n yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotantolaitos, jossa käytetään kierto-leijutekniikkaa. Höyry toimitetaan teollisuuskäyttöön. Laitoksen suunnittelijan ja alueen asukkaiden välille syntyi suunnitteluvaiheessa ongelmia, jotka kärjistyivät ympäristövaikutusten arviointiselostusta käsiteltäessä. Suurinta vastustusta aiheutti hankkeesta vastaavan suunnitelma käyttää vanhoja, suuret päästöt aiheuttavia kattiloita edelleen varakattiloina. Koska tätä ei käsitelty riittävästi tehdyssä YVA-selostuksessa, sitä pidettiin huonosti tehtynä ja harhaanjohtavana. Asukkaiden vastustuksen vuoksi laitoksen rakentaminen viivästyi huomattavasti suunnitellusta aikataulusta. Tämä johti lopulta hankkeen toteuttajan vaihtoon, alkuperäisten suunnitelmien muuttamiseen ja suunniteltuja huomattavasti tiukempiin päästörajoituksiin.

Uuden suunnitelman mukaan vanhat kattilat poistettiin käytöstä ja varakattilaksi asennettiin maakaasukattila. Laitokselle asetettiin tiukat päästöraajat tavanomaisten päästöjen lisäksi myös rikkihapolle, fluorideille, lyijylle, elohopealle ja berylliumille. Koska asukkaat vastustivat pohjaveden käyttöä jäähdytysvetenä, laitokselle rakennettiin suljettu jäähdytysjärjestelmä. Lisäksi käytettiin runsaasti varoja suhdetoimintaan, mm. perustettiin säätiö, joka ostaa erityisen herkkiä ympäristö-

alueita, ostettiin paikallisviranomaisille ilmanlaadunseuranta-auto ja myönnettiin varoja paloaseman rakentamiseen laitoksen lähelle.

Shimizu, Japani

Japanissa ympäristövaikutusten arviointiprosessin suurin ongelma on yleisön hyväksynnän saaminen hankkeille. YVA-prosessi kestää usein 10 - 15 vuotta, mistä varsinainen arviointivaihe vie vain noin kaksi vuotta. Yleisön hyväksyntä on välttämätön, koska paikallis- ja aluehallinnolla on suuret mahdollisuudet vaikuttaa laitosten lupakäsittelyyn. Hyväksyntäprosessi on johtanut siihen, että laitoksia pystytään rakentamaan lähinnä vain maaseutualueille. Lisäksi menettely edellyttää laajaa suhdetoimintakampanjaa ennen varsinaista arviointivaihetta.

Esimerkkinä olevan Shimizun hiilivoimalan tiedotuskampanja aloitettiin vuonna 1984 (McConville 1996). Siihen kuului yli 150 tapaamista asukkaiden ja intressiryhmien kanssa, yli 250 vierailua muihin voimaloihin, esitelmiä, esittelytilaisuuksia ja yhteistoimintaa tiedotusvälineiden kanssa. Vuonna 1990 osa intressiryhmistä vastusti edelleen voimalarakentamista mm. rikki-, typpi-, elohopea- ja fluoripäästöjen, kasvihuonevaikutuksen, tuhkan varastointiin ja sijoittamiseen liittyvien ongelmien sekä jäähdytysveden ja hiilen kuljetusten aiheuttamien vaikutusten vuoksi. Vuonna 1991 kaupunki perusti asiantuntijaryhmän tekemään laitoksen ympäristövaikutusselvityksen. Ryhmä totesi raportissaan, ettei laitos vahingoita alueen ympäristöä, ja kaupunki päätti tukea rakentamista. Tästä huolimatta alueen kuvernööri vastusti vuonna 1992 laitosta maisemallisten haittojen ja kaupungin satamalle aiheutuvien haittojen takia. Päätöstä pidettiin lähinnä poliittisena, mutta laitoksen rakentamista ei voitu aloittaa. Hankkeesta vastaava jatkaa kuitenkin edelleen suhdetoimintakampanjaa, koska vaikuttaa mahdolliselta käynnistää projekti jossakin vaiheessa uudelleen.

9.3.3 YVA-prosessin soveltaminen kaupunkivoimalakohteeseen

Sijoitus kaupunkialueelle edellyttää vuorovaikutteista suunnittelua, jossa luodaan tavanomaista YVA-menettelyä laajemmat kanavat kansalaisten mielipiteiden keräämiseksi ja huomioon ottamiseksi. Yhteydet on luotava siten, että asukkaat tuntevat voivansa aidosti vaikuttaa tärkeiksi kokemiinsa kysymyksiin. Hankkeesta tiedottaminen ja menettelyn käynnistäminen riittävän aikaisessa vaiheessa ovat tärkeitä luottamuksen saavuttamiseksi.

Laaja näkökulma, jota hankkeiden YVA-selostuksiin on yleisesti toivottu, helpottaa voimalahankkeen tarpeellisuuden perustelemista sekä sijoituspaikan ja tuotantovaihtoehdon hyväksyttävyyden arviointia. Tämä sisältää muun muassa hankkeen tarpeellisuuden arvioinnin koko maan ja sijoitusalueen tuotantotarpeisiin verrattuna, hankkeen vertailun energiapoliittisiin ja ympäristötavoitteisiin, myös uusiutuvien energiamuotojen tarkastelun ainakin yleisellä tasolla, vaihtoehtoisten sijoituspaikkojen tarkastelun, mielellään useampien laitospaihtoehtojen tarkastelun ja vaihtoehtojen vertailun myös elinkaaren aikaiset kokonaisvaikutukset huomioon

ottaen. Myös varsinaiseen laitosrakentamiseen mahdollisesti liittyviä hankkeita tulisi käsitellä laitoshankkeen yhteydessä.

Kaupunkialueella yleisesti tärkeiksi katsottavia tekijöitä ovat päästöjen ja meluhaittojen rajoittaminen, riskittömyys, liikenteen aiheuttamien haittojen ja onnettomuusriskien minimointi ja sopeutuminen kaupunkikuvaan. Sivutuotteiden ja energiavirtojen mahdollisimman tehokkaaseen hyödyntämiseen ja hyödyntämismahdollisuuksien arviointiin kiinnitetään nykyisin paljon huomiota. Myös sosiaalisten vaikutusten arviointia ja seurantaa pidetään tärkeinä. Yleisiä päästöjen ja muiden ympäristökuormitusten tavoitetasoja näille voimalaratkaisuille ei kuitenkaan voi määrittää, koska niihin vaikuttavat lainsäädännön vaatimusten lisäksi myös paikalliset tekijät. Tällaisia seikkoja ovat esimerkiksi yleisön arvostukset ja laitoksen rakentajan "julkisuuskuva". Käsitukseen laitoksen rakentajasta vaikuttavat kokemukset aikaisemmasta toiminnasta sekä tapa, jolla suunnittelu- ja YVA-prosessi ja tiedottaminen hoidetaan.

9.4 YMPÄRISTÖNSUOJELUN YHDENTYVÄ OHJAUS

9.4.1 IPPC-direktiivi

IPPC-direktiivin mukainen ympäristönsuojelun ohjauksen ja lainsäädännön yhdentyminen asettaa tulevaisuudessa uusia vaatimuksia myös voimalaitosten ympäristöhallinnalle. Direktiivin mukaan ympäristönsuojelun erillisiin vesi-, ilma- ja jätelupiin perustuvat lupamenettelyt ja ohjaustoimet yhdistetään. Energia- ja ympäristökysymysten hallinta edellyttää tällöin teknillisten järjestelmien integroitua, kokonaisvaltaista systemaattista tarkastelua ja kokonaisuuksien hallintaa. Osat yksityiskohtineen on hallittava edelleen, mutta uutena vaatimuksena korostuu ympäristövaikutusten, päästölähteiden ja tekniikoiden integroitu tarkastelu. Rikki, typpi ja kasvihuonekaasut ovat jatkossa edelleen suojelutoimia edellyttäviä painopisteitä.

IPPC-direktiivin perusteella on voimaleaa suunniteltaessa pyrittävä vertailemaan eri kuormituslähteitä keskenään sekä teknillisesti että taloudellisesti haettaessa kattavia ja kustannustehokkaita ilma-, vesi- ja jätekuormitusta vähentäviä kokonaisratkaisuja. Sovellettavan teknologian arvioinnilla on tärkeä rooli kaupunkivoimalaan liittyvien investointimahdollisuuksien selvittämisessä. EU:ssa eri toimialoille tehtävät BAT-selvitykset antavat yhden lähtökohdan myös voimalaitoksen suunnittelulle. Suuria polttolaitoksia koskeva IPPC-direktiiviin liittyvä BAT-selvitys (ns. BREF-dokumentti) on tarkoitus toteuttaa vuonna 2001. Näitä seikkoja varten on syytä toteuttaa nimenomaan tulevaisuuden kaupunkivoimalan tapaukseen liittyviä erillisselvityksiä jo ennakoivasti.

9.4.2 Ympäristotalous ja taloudellinen ohjaus

EU:n 5. ympäristöohjelman mukaan tavoitteena on tulevaisuudessa siirtyä “oikeisiin hintoihin” sisäistämällä ulkoiset ympäristökustannukset hintajärjestelmään. Tavoitteena on, että taloudellinen toiminta toimisi ympäristövaikutukset sisältävän täyden kustannuskatteen mukaisesti (Resolution of Council, No C 138/16). Ulkoisia kustannuksia arvioivia hankkeita on toteutettu energiasektorilla tai muissa laitoksissa toistaiseksi lähinnä kertaluonteisina tutkimuksina eikä arvioiminen ole rutiininomaista toimintaa vielä lähitulevaisuudessa. Sama koskee ulkoisten kustannusten sisäistämistä hintoihin. Kotimaassa tällaisia selvityksiä on tehty lähinnä SIHTI 2 -tutkimusohjelmassa.

Kuten kohdassa 3.1.2. todettiin, päätöksenteon kannalta ulkoisten kustannusten laskenta on vielä epävarmaa ja edellyttää jatkossa runsaasti sekä menetelmäkehitystä että tutkimusta. Ympäristökustannusten tulevaisuuden haasteena ovat lisäksi esimerkiksi tuotteiden ja palvelujen koko elinkaaren aikaiset kustannusvaikutukset. Esimerkiksi energiavaihtoehtojen tarkastelussa tulee arvioida kustannusten jakautumista voimavaihtoehtojen elinkaaren aikana. Tällaisiin tarkasteluihin liittyvä LCCA (elinkaaren aikaisten kustannusten arviointi, life cycle cost accounting) on toistaiseksi vasta kehittymässä.

Ulkoisten kustannusten tarkastelusta on olemassa sekä Euroopan Unionin aloitteisiin perustuvia että energiayhtiökohtaisia esimerkkejä. ExternE-hankkeessa on pyritty luomaan EU:n jäsenmaille yhteinen metodologia, jolla selvitetään energiasektorilla polttoaineketjujen ulkoisia ympäristökustannuksia käytettäväksi mm. energiapoliittisen päätöksenteon tukena. Menetelmä perustuu saksalaiseen EcoSense-malliin, jolla kuvataan voimalaitoksen savukaasupäästöjen leviämistä ja vaikutuksia EU-alueella. Suomen ExterneE:n soveltamista koskevan tutkimuksen perusteella pääteltiin, että vaikutusten ja ulkoisten kustannusten absoluuttiset arvot ovat toistaiseksi sekä ympäristöongelmien fyysiseen arviointiin että niiden taloudelliseen arvottamiseen liittyvien epävarmuuksien takia epäluotettavia. Sen sijaan energiatuotannon vaihtoehtojen keskinäisessä suhteellisessa vertailussa menetelmää pidetään lupaavana edellyttäen, että niiden haitat ovat samankaltaisia.

SIHTI-tutkimusohjelmassa toteutetuissa ulkoisten kustannusten arviointia koskevissa tutkimuksissa (Otterström 1995, Hongisto et al. 1997) on todettu päästö-vaikutusyhteyden olevan yleensä monimutkainen, jolloin läheskään kaikkia vaikuttavia tekijöitä tunneta edes yksinkertaisimmissa tapauksissa. Tietystä ympäristöhaitasta aiheutuvien kustannusten määrittäminen ei ole yksiselitteistä siinäkään tapauksessa, että päästön ja vaikutuksen yhteys tunnetaan. Tärkeimmät tulokset ovatkin systemaattisen arviointikehikon luominen, aineiston kerääminen ja muokkaaminen päätöksentekoa tukevaan muotoon. Päähuomio olisi tuloksia arvioitaessa kiinnitettävä vaikutusten arviointiin, ei itse markkamääräistämiseen, eikä kustannusestimaatteja ei pitäisi esittää ainoana tuloksena.

Arviointiin liittyviä ongelmia ovat myös tulevan kehityksen ja erityisesti arvostusten muutosten arviointi, vaikutusten merkityksen paikallinen vaihtelu ja paikallis-

ten vaikutusten suhteuttaminen maailmanlaajuisiin. Päätöksenteossa olisi huomioitava myös taloudellisen tehokkuuden päämäärien kanssa ristiriitaiset päämäärät, kuten terveyden, turvallisuuden ja luonnon suojelu, oikeudenmukaisuus, resurssien riittävyys, ja psykologiset tekijät, kuten ihmisten erilaiset riskikäsitteet. Taloudellisin perustein tehty arviointi ei välttämättä pysty ottamaan näitä riittävästi huomioon. Lisäksi yhteismitallistaminen siirtää päätöksentekoa poliittisesti valituilta päätöksentekijöiltä asiantuntijoille, mitä ei yleensä pidetä toivottuna tuloksena.

Yksittäisten energiayhtiöiden ulkoisten kustannusten arvioimishankkeista ehkä tunnetuin on Kanadan energiatuotantoyhtiö Ontario Hydron selvitys. Ulkoisten kustannusten arviointihanke oli Ontario Hydron vuonna 1994 aloitetussa ympäristöohjelmassa varsin keskeisessä asemassa. Ympäristölaskennassa ("Full Cost Accounting") yhtiö pyrki arvioimaan sekä kielteisiä että myönteisiä toimintansa ympäristövaikutuksia. Kilpailukykyisistä Ontario Hydro ei lisää ulkoisia kustannuksia koskevia tietoja sähkön hintoihin.

EU:n pyrkii edistämään ulkoiset kustannukset kattavaa hintasysteemiä mm. kehittämällä markkinavetoisia taloudellisia ohjausinstrumentteja. Näillä tarkoitetaan sekä erilaisia ympäristönsuojelumaksuja ja ympäristöveroja että kuormituslupia koskevaa yritysten välistä kaupankäyntiä. Haittakustannusten sisäistämistä hintoihin taloudellisten ohjausinstrumenttien avulla rajoittavat ulkoisten kustannusten arvioimiseen liittyvät ongelmat. Vaikka EU:n 5. Ympäristöohjelmassa korostetaan vahvasti markkinavetoisten taloudellisten instrumenttien merkitystä, ohjelman väliraportissa 1996 myönnetään, että EU-tasolla näiden instrumenttien kehittämisessä ja soveltamisessa on tapahtunut kovin vähän huolimatta joidenkin jäsenvaltioiden niihin liittyvistä myönteisistä kokemuksista (Progress Report from the Commission, 4). Viime vuosina kiinnostus EU:ssa on kasvanut erityisesti Yhdysvalloissa sovellettavaan yritysten väliseen kuormituslupia koskevaan kaupankäyntiin (emission trading).

Yhdysvalloilla on kokemuksia voimaloiden rikkidioksidipäästöjen vähentämisestä kuormituslupia koskevan yritysten välisen kaupankäynnin avulla. Päästöoikeuksien markkinointijärjestelmä otettiin käyttöön 1970-luvulla ilmasuojelulain toteuttamisen ongelmien seurauksena. Järjestelmää on perusteltu seuraavilla seikoilla: Viranomainen ei voi tuntea kaikkia laitoksen kuormittamisen vähentämiskeinoja; kuormittamisen markkinointi voi olla yritystasolla ja yhteiskunnallisesti kustannuksiltaan pelkkää oikeudellista ohjausta tehokkaampi; menetelmän käyttö edistää innovatiivisten ympäristönsuojelutoimien kehittämistä ja soveltamista. Yhdysvallat ehdottaa järjestelmän soveltamista globaalien kasvihuonepäästöjen tehokkaaksi ohjauskeinoksi valtioiden ja niiden yksityissektorin välillä.

9.5 YRITYSTEN VAPAAEHTOISET TOIMET JA PÄÄTÖKSENTEKOA TUKEVAT MENETELMÄT

Yritysten vapaaehtoisten ympäristönsuojelutoimien lähtökohtana ovat omistajien, yrityksen eri sidosryhmien, sen tuotteiden ostajien ja kuluttajien sekä suuren yleis-

sön näkemykset ja mielipiteet. Ympäristöasiat ovat olleet merkittävä seikka perinteisesti esimerkiksi kemianteollisuudessa, jossa Responsible Care -ohjelmaa on toteutettu jo 1980-luvun lopulta alkaen.

9.5.1 Ympäristöhallintajärjestelmät

Yritysten laadun- ja ympäristöhallintaa on kehitetty aiemmin tavallisesti toisistaan irrallisina. Nykyisin ja tulevaisuudessa laatu- ja ympäristöasiat nähdään yhä selvemmin integroituna yhtenä kokonaisuutena ja kehittämiskohteena. Keskeiset ympäristöhallintaan tarkoitetut laatustandardit ja järjestelmät ovat ISO-14 000 sekä EU:n EMAS.

Useissa energialaitoksissa on joko suunnitteilla tai valmisteilla ympäristöhallinnan, ympäristöjohtamisen ja ympäristötilinpidon järjestelmiä. Joillakin niitä kehitetään osana muuta laatuja järjestelmää, joillakin erillisenä. Tulevaisuudessa ympäristöhallintajärjestelmän uskotaan integroituvan entistä selvemmin yrityksen hallintoon. Todennäköisenä pidetään muun muassa ympäristöhallintajärjestelmän ja laatuja järjestelmän yhdistymistä.

9.5.2 Ympäristömerkit

Energian tuotteistaminen ja sen myötä tuotteiden ympäristökriteerien luominen on tullut ajankohtaiseksi erityisesti energiamarkkinoiden vapauduttua, jolloin markkinoilla pyritään kilpailemaan myös tarjoamalla erityistuotteita. Ympäristökriteerit energialle on luotu mm. Ruotsin kansallisessa Bra miljöverk-järjestelmässä. Kriteereissä, joista on esitetty varsin ristiriitaisia mielipiteitä, painotetaan uusiutuvien energialähteiden käyttöä tuotannossa. Kansainvälisissä ympäristömerkkijärjestelmissä, joita ovat mm. EU:n ympäristömerkki ja pohjoismainen joutsenmerkki, ei toistaiseksi olla laatimassa ympäristökriteereitä energialle. Ekologisuuden kriteereitä koskeva selvitystoiminta on kuitenkin käynnistetty mm. Suomessa energiantuottajajärjestöjen toimesta.

9.5.3 Ympäristötilinpito, laskentatoimi ja investointianalyysit

Ympäristötilinpidon ja ympäristölaskentatoimen kehitys on vielä hyvin alkuvaiheessa. Tulevaisuudessa ympäristökustannukset tullaan ottamaan yhä systemaattisemmin huomioon yrityksen laskentatoimen osana (Tulenheimo 1997). Ympäristökustannusten laskentamenetelmät ovat kehittyneet nopeasti. Menetelmiä ovat mm. toimintolaskenta (activity based cost accounting, ABC), elinkaarikustannuslaskenta (life cycle cost accounting, LCCA), ympäristövaikutukset sisältävä kustannuslaskenta (full life cycle cost assessment, FLCCA), kokonaiskustannusten arviointi investointilaskennassa (total cost assessment, TCA) sekä laajennettu kustannus-hyötyanalyysi (extended cost-benefit analysis, ECBA) (Niskala & Mätäsaho 1997).

9.5.4 Energiakysymysten elinkaariarviointi

Elinkaariarviointi (Life Cycle Analysis, LCA) on tuotteiden, materiaalien, prosessien tai toimintojen ympäristökuormitusten ja -vaikutusten kokonaisvaltaiseen arviointiin käytetty menetelmä. Tuotteen elinkaareissa erotetaan yleensä neljä pää-

vaihetta: 1) raaka-aineiden hankinta, 2) valmistus, 3) käyttö- ja uudelleenkäyttö- ja ylläpitovaihe sekä 4) kierrätys- ja jätehuoltovaihe. Elinkaariarviointi sisältää kolme tehtäväkokonaisuutta:

- I ankkurointi (Goal Definition and Scoping),
- II inventaarioanalyysi (Inventory analysis)
- III vaikutusten arviointi (Impact Assessment, Classification, Characterisation, Valuation).

Elinkaarianalyysi (LCA) on tullut merkittäväksi menetelmäksi esimerkiksi tuotteiden ympäristöön liittyvien ja teknillisten vaihtoehtojen tutkimisessa. Energia sisältyy kaikkiin elinkaariarviointeihin jossakin muodossa, ja on hyvin tyypillistä, että sen osalle lankeaa suurin osa ympäristön kuormituksista. Energialla on tunnistettavissa olevat tuottajat ja välittäjät ja sen ympäristöominaisuuksissa on eri tuottajien välillä eroja. Tätä kautta elinkaariarvioinnilla pystytään erottelemaan ja tuomaan esille eri tuottajien ja tuotantomuotojen ympäristölliset erot.

Sähkömarkkinoiden vapautumisen myötä ympäristönäkökohdat ovat nousseet energiantuotannossa merkittävään asemaan. Asiakkaat hakevat myös ympäristömyötäistä energiaa, jonka määrittelyyn LCA tuo järjestelmällisen tarkastelutavan. Elinkaariarvioinnin inventaari ja muut tulokset ovat monen jatkotarkastelun hyvää lähtökohhta myös tulevaisuuden kaupunkivoimalan tapauksessa. Tuotekohtaiseen tarkasteluun voidaan yhdistää ympäristövaikutus-, kustannus- ja yhteiskunnallisia tarkasteluja, jotka kattavat koko tuotantoketjun. Näistä syistä elinkaariarviointi on varsin keskeinen ympäristökysymysten analysointimenetelmä kaupunkivoimalankin suunnittelun yhteydessä. Esimerkiksi vaihtoehtoisten energialähteiden ja polttoaineiden tuotantotekniikoiden selvittämisessä elinkaariarviointi antaa kaupunkivoimalan kohdalla systemaattisimman tavan ympäristökysymysten selvittämiseen.

9.5.5 Muut päätöksentekoa tukevat menetelmät

Tulevaisuuden kaupunkivoimalan ympäristöhallintaa koskevan suunnittelun ja päätöksenteon tukena voidaan käyttää myös muita menetelmiä. Päätöksenteon tueksi on kehitetty mm. monikriteerianalyysia (MCA), jossa pyritään systemaattisesti ottamaan huomioon eri intressitahojen näkökantoja ympäristöasioista hankkeiden suunnitteluvaiheesta alkaen. Etuna on samoin kuin ulkoisten kustannusten arvioinnissa systemaattisen arviointikehikon luominen ja soveltaminen. Menetelmissä vältetään kuitenkin markkamääräistäminen, johon liittyy vielä paljon epävarmuuksia ja joka koetaan monilta osin vaikeaksi toteuttaa. Muilla perusteilla tehdyssä vertailussa yhteiskunnallisten tekijöiden (terveyden, turvallisuuden, viihtyvyyden, palveluiden laadun) ja arvostusten käsittely saattaa olla helpompaa. Ympäristötekijöitä voidaan verrata myös muihin päätöksenteon osatekijöihin (talouteen, tekniikkaan, yhteiskuntaan) ja lisäksi voidaan verrata myös eri intressiryhmien näkemyksiä.

Päätösanalyysia on Suomessa sovellettu mm. ympäristövaikutusten arviointimenettelyjen yhteydessä. Näissä on kuitenkin käytännön syistä keskitytty rajoitettuihin päättäjryhmiin eikä menetelmän käyttökelpoisuuteen vaikuttavien tekijöiden tutkimiseen ja arviointiin ole ollut tässä yhteydessä paljonkaan mahdollisuuksia. Laajemmalla tasolla kokemuksia päätösanalyysin käytöstä energiapoliittisessa arvioinnissa on TKK:n systeemianalyysin laboratoriollla, jossa menetelmän käyttöä yleisessä ja eri alojen päätöksenteossa on kokeiltu ja tutkittu jo 1980-luvulta lähtien (Miettinen & Hämäläinen 1996). Yksittäisissä tutkimuksissa menetelmää on Suomessa käytetty myös mm. elinkaarianalyysin tulosten arvottamisessa (Mattson 1996), SIHTI-ohjelman tutkimuksissa (Korhonen & Thun 1996) sekä Suomen ympäristökeskuksessa metsäteollisuuden ympäristöohjelman laadintavaiheessa.

Parhaiten monikriteerianalyysi soveltuu tapauksiin, joissa vertailun ja arvottamisen tekevät todelliset päättäjät, kuten esimerkiksi tietyn yksittäisen päätösongelman käsittelyyn tai esimerkiksi poliittista päätöksentekoa avustavaksi menetelmäksi. Delphi-menetelmää (ks. taulukko 9) on käytetty suhteellisen paljon silloin, kun on haluttu saada asiantuntija-arvio esimerkiksi tiettyjen ympäristövaikutusten merkittävyydestä. Kuten yleensä pisteyttävissä vertailumenetelmissä, ongelmana on mm. se, että tulosten käyttäjän on vaikea jatkossa saada selville päätöksenteon kriteereitä. Käytännössä kuitenkin monet haluavat tietää, millä perusteella vertailu on tehty. Tarkemmin määrittelemättömään tai heikosti määriteltyyn asiantuntija-arvioon perustuvat vertailut herättävät helposti epäluuloja.

10 KESTÄVÄLLE KAUPUNKIVOIMALALLE ASETETTAVAT VAATIMUKSET

10.1 TEKNINEN JA TALOUDELLINEN TOIMIVUUS

Tekninen toimivuus ja taloudellinen kannattavuus ovat kaikkien voimalaratkaisujen tärkeitä valintakriteereitä. Tekniikan taloudellinen kannattavuus vaikuttaa myös sen tulevaan luotettavuuteen, koska laitosvalinnat ja siten tuleva kehitystyö painottuvat tuottavimmiksi arvioituihin vaihtoehtoihin. Jo nykyisin ja tulevaisuudessa todennäköisesti yhä enenevässä määrin teknis-taloudelliseen toimivuuteen on pystyttävä yhdistämään ympäristöhaittojen minimointi ja laitoksen yhteiskunnallinen hyväksyttävyys. Kiristynvä kilpailu ja nopeasti muuttuva toimintaympäristö edellyttävät tuotantolaitoksilta myös entistä suurempaa joustavuutta, kuten mahdollisuutta polttoaineiden vaihtoihin ja laitoksen muuntamiseen teknisen kehityksen sekä mahdollisesti kiristyvien tai muuttuvien ympäristövaatimusten mukaisesti.

10.2 YHTEISKUNNAN OHJAUKSEN ASETTAMAT VAATIMUKSET

Yhteiskunnan ohjauksen tärkeimmät energiantuotantoon liittyvät lähitulevaisuuden tavoitteet ovat:

- kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen. Hiilidioksidin lisäksi myös muiden kasvihuonekaasupäästöjen, joita energiantuotannossa ovat mm. typpioksiduuli ja metaani, vähentämiseen tullaan jatkossa kiinnittämään huomiota.
- siirtyminen yhdennettyyn ympäristölupamenettelyyn, jonka seurauksena kokonaisvaikutusten arvioinnin ja vähentämisen merkitys kasvaa. Myös ympäristövaikutusten arvioinnissa (YVA-menettely) laitoksen merkitys osana kokonaisuutta ja koko maan energiantuotantojärjestelmää on entistä tärkeämpi.
- typen ja rikin oksidien päästöjen vähentäminen jatkuu edelleen. Vähennystoimet toteutetaan kuitenkin jatkossa todennäköisimmin yhdennettynä muiden happamoitumiseen, rehevöitymiseen ja alailmakehän otsonia muodostumiseen vaikuttavien päästöjen (SO₂, VOC, NH₃) vähentämiseen. Tämä tarkoittaa sitä, että vähennystavoitteet asetetaan tulevaisuudessa kokonaisvaikutusten ja kriittisten kuormitusten ylitysten perusteella. Kansainvälisillä sopimuksilla tulee olemaan entistä suurempi merkitys.
- jätteiden hyödynnettävyyden parantaminen ja läjitysalueille sijoitettavien jätemäärien vähentäminen
- ympäristökustannusten siirtäminen hintoihin. Tämän toteutuminen pyritään varmistamaan taloudellisia ohjauskeinoja, kuten verotusta, käyttäen. Polttoaineverot ja muut vastaavat kulutusta ohjaavat verot tulevat kasvamaan edelleen. Verotusperusteissa voi kuitenkin tapahtua muutoksia.
- ympäristökuormitusten markkinointijärjestelmän soveltuvuuden selvittäminen.

Energian tuotannon haittojen vähentämisen lisäksi pyritään entistä enemmän energian kulutuksen ohjaukseen ja vähentämiseen mm. taloudellisen ohjauksen ja tiedotuksen avulla sekä suuntaamalla tutkimusta entistä enemmän energiankulutusta vähentäviin tekniikoihin, menetelmiin ja toimintajärjestelmiin.

10.3 SIJAINIYMPÄRISTÖN ASETTAMAT VAATIMUKSET JA NIIDEN ARVIOINTI

Tuleville kaupunkivoimalaratkaisuille ei voida luoda yleistä mallia, koska lähtökohdat ovat aina paikallisia. Paikallisten tekijöiden arviointiin ja selvittämiseen olisikin kiinnitettävä erityistä huomiota sekä ympäristövaikutusten arviointiprosessissa että koko laitossuunnittelun ajan.

Kaupunkiympäristössä olemassa oleva infrastruktuuri asettaa rajoituksia laitoksen sijoitukselle, polttoaineiden kuljetukselle ja varastoinnille ja usein myös laituskoolle. Kaupungeissa tonttimaata on rajoitetusti saatavilla eikä sijoitusalueita muutenkaan voida valita vapaasti, koska mahdolliset sijoituskohteet on määritelty jo kaavoitusvaiheessa. Laitos olisi sijoitettava lämpökuormaan nähden järkevästi. Mikäli mahdollista, olisi pystyttävä käyttämään olemassa olevaa sähkö- ja kaukolämpöverkkoa sekä rakennettuja kuljetusyhteyksiä ja varastoalueita. Lisäksi tiekuljetukset kaupungin läpi olisi pystyttävä pitämään mahdollisimman vähäisinä joko valitsemalla sopiva polttoaine tai sijoittamalla laitos reuna-alueelle.

Asukkaiden hyväksynnän saavuttaminen edellyttää erityisesti lähiympäristölle haitalliseksi koettujen ympäristökuormitusten, kuten pöly-, haju- ja meluhaittojen, minimointia, mahdollisimman riskitöntä laitosta, kuljetusten aiheuttamien haittojen ja onnettomuusriskien minimointia ja laitoksen sopeutumista maisemakuvaan. Ympäristötietoisuuden kasvaessa asukkaat ja muut intressiryhmät kiinnittävät entistä enemmän huomiota myös asioihin, jotka eivät välittömästi näy lähiympäristön laadussa, kuten uusiutuvien energiamuotojen käyttöön, lisäenergian tuotannon tarpeellisuuteen ja energiantuotannon kokonaisvaikutuksiin.

Paikallisten tekijöiden selvittäminen edellyttää hyviä yhteyksiä ympäröivään yhteisöön suunnittelun aikana. Tukena voivat toimia erilaiset yhteistyöryhmät, joissa on mukana sekä laitoksen, viranomaisten, asukkaiden että vapaaehtoisten ryhmien edustajia. Avoin tiedottaminen helpottaa useimmissa tapauksissa ympäristön mielipiteiden selvittämistä ja tuo mahdolliset ristiriidat esiin mahdollisimman varhaisessa vaiheessa.

Koska laitossuunnittelu ja laitoksen käyttö on useiden kymmenien vuosien prosessi, olisi tärkeää pystyä arvioimaan myös tulevaa kehitystä sekä ympäristövaatimusten ja arvojen muuttumista lähimpien vuosikymmenien aikana. Valitun laitostavaihtoehdon pitäisi myös olla mahdollisimman joustavasti muunnettavissa esimerkiksi ympäristövaatimusten, taloudellisten edellytysten tai polttoaineiden saatavuuden sitä vaatiessa.

10.4 VAATIMUSTEN ARVIOINTIIN LIITTYVÄT EPÄVARMUUKSET

Voimalan suunnittelu- ja käyttöaika ulottuu useiden vuosikymmenien päähän. Tulevan kehityksen arviointi on vaikeaa, koska kansainvälinen ja kansallinen energiapolitiikka, toimintaympäristö ja arvot ja asenteet saattavat muuttua huomattavasti. Ympäristöasioiden painotukset voivat muuttua, ja keskustelu voi tuoda esiin uusia ennalta hankalasti ennustettavissa olevia ongelmia. Näistä syistä edellä jo mainittu mahdollisimman suuren joustavuuden säilyttäminen on tärkeää.

Monien erilaisten näkökohtien (talouden, tekniikan, ympäristön, yhteiskunnallisten näkemysten, tulevan kehityksen) yhdistäminen laitossuunnittelussa on vaikeaa ja optimaalisen tason löytäminen tästä syystä hankalaa. Pelkkä yleinen tieto ei riitä paikallisten näkökohtien ja kohdekohtaisten vaatimusten selvittämiseen ja arviointiin. Siksi on tarpeen kehittää menetelmiä ja menettelytapoja, joilla pystytään yhdistämään nämä erilaiset näkökohdat ja tekninen tieto ja arvioimaan kokonaisuutta.

10.5 VAIHTOEHTOJEN VAATIMUSTEN MUKAISUUDEN ARVIOINTI

Raportissa esitettyjen tuotantovaihtoehtojen ominaisuuksia on alustavasti vertailtu taulukossa 5 ja joitakin arvioita kustannustasoista on esitetty taulukoissa 6 ja 7. Tarkempi arviointi vaatii kustannustekijät, valintojen syy- ja seurausvaikutukset sekä kohdekohtaiset tavoitteet huomioon ottavaa selvitystä. Käytettävissä olevat tuotanto- ja ympäristönsuojelutekniset vaihtoehdot ovat kaupunkivoimaloissa suurelta osin samoja kuin energiantuotannossa yleensäkin, samoin myös monet perusvaatimukset. Yhtenä erityispiirteenä on yleensä kaukolämmön tarve. Sijoitus asutuksen keskelle asettaa lisäksi erityisvaatimuksia haitattomuudelle, riskittömyydelle ja yleiselle hyväksyttävyydelle. Tärkeitä kriteereitä ovat teknisen ja taloudellisen toimivuuden lisäksi esimerkiksi korkea hyötysuhde, kasvihuonekaasupäästöt, ympäristöhaittojen minimointi, sivutuotteiden hyötykäyttömahdollisuudet, riskittömyys ja tilantarve.

11 ARVIO TUTKIMUSTARPEISTA

Koska kaupunkivoimaloissa käytetään hyvin samantyyppisiä teknisiä ratkaisuja kuin voimaloissa yleensäkin, ovat tuotanto- ja ympäristönsuojelutekniikkaan ja ympäristön hallintaan liittyvät tutkimustarpeet monilta osin samoja kuin yleensä voimaloissa. Sijainti lähellä tiheää asutusta edellyttää kuitenkin ympäristötekniisesti edistyneitä, mutta mahdollisimman riskittömiä vaihtoehtoja. Myös laitosten ympäristön hallinnan tason on oltava korkea. Siksi erityisten kaupunkivoimaloihin liittyvien tutkimustarpeiden lisäksi myös yleinen laitos- ja ympäristönsuojelutekniikan sekä hallintamenettelyjen kehittäminen on tärkeää.

11.1 TUOTANTOTEKNIIKAT

Tuotantotekniikoiden pääasialliset kehitysalueet liittyvät hyötysuhteen nostoon, siihen liittyvään materiaalien kehitykseen ja ylikriittisten höyryturbiinien käyttöönottoon myös leijutekniikoissa sekä uusien tekniikoiden (paineistetun kierto-leijutekniikan, toppingin, kaasutustekniikoiden) demonstrointiin kaupallisessa mittakaavassa. Muita kehitysalueita ovat sekapoltto (jätteiden ja/tai biomassan käyttö lisäpolttoaineena), johon liittyy myös materiaalien kehitys, sekä kehittyneempien tekniikoiden yksikkökoon kasvattaminen.

Tässä yhteydessä tuotantotekniikoita voidaan käsitellä lähinnä erilaisten järjestelmätarkastelujen osana, jolloin arvioidaan tietyn tekniikan soveltuvuutta kaupunkivoimalaratkaisulle asetettujen tavoitteiden saavuttamiseen.

11.2 PÄÄSTÖJEN JA JÄTTEIDEN KÄSITTELY

Päästöjen käsittelyssä painopiste on siirtynyt ilmaan joutuvien päästöjen rajoittamisesta syntyvien jätteiden hyödyntämismahdollisuuksien parantamiseen ja epäpuhtauksien poistojärjestelmän optimointiin siten, että lopputuloksena on hyödyntämiskelpoinen tuote tai tuotteita sekä mahdollisimman vähän loppusijoitettavia jätteitä.

Päästöjen käsittelyyn liittyviä kehityskohteita ovat

- hiilidioksidipäästöjen vähentäminen. Tärkeimmät vähentämiskeinot ovat hyötysuhteen nosto ja uusiutuvien polttoaineiden käytön kehittäminen. Vähentämistekniikoiden käyttö on mahdollista, mutta vaatii runsaasti sekä tekniikoiden että loppusijoitusmahdollisuuksien kehitystyötä.
- typpioksiduulipäästöjen vähentämismahdollisuuksiin liittyvä tutkimus
- elohopeapäästöjen vähentäminen. Vähentämistekniikoiden kehittämisen yhteydessä on arvioitava myös tekniikan käyttöönoton vaikutukset jätteiden sijoitettavuuteen ja muihin päästöihin.

- pienhiukkaspäästöjen merkityksen ja lisävähennystarpeiden arviointi. Hiukkasten sisältämien yhdisteiden ja todellisten terveys- ja ympäristövaikutusten merkitys tulee korostumaan.
- typenpoistokatalyyttien häiriötekijöiden (katalyyttimyrkkyjen, hiukkasten, lämpötilan) kestävyuden parantaminen tai toimintaa haittaavien tekijöiden eliminointi
- rikinpoiston optimointi erityisesti leijupolttotekniikassa, mutta myös muissa menetelmissä
- yhdistetyt typpi-, rikki- ja hiukkaspäästöjen käsittelytekniikat, tekniikoiden toiminnan optimointi huomioon ottaen vaikutukset muihin päästöihin ja lopputuotteeeseen sekä lopputuotteiden käytettävyyden arviointi
- korkeissa lämpötiloissa toimivan suodatintekniikan jatkokehittäminen ja soveltaminen käytännön mittakaavassa.

Ainakin suurimmilla kaupunkialueilla kiinteitä polttoaineita käyttävän voimalan sivutuotteet olisi pystyttävä hyödyntämään. Pölypolton tuhkien ja puolikuivamenetelmän rikinpoistojätteen käyttöön liittyvää tutkimusta, jossa kehitetään sekä teknisiä käyttömenetelmiä, tuotteiden ominaisuuksia että materiaalien käytettävyyden kriteereitä, on käynnissä suhteellisen paljon. Mahdollisten vaihtoehtoisten tekniikoiden sekä sekajätteiden polton käyttöönoton edellytyksenä on tällöin, että sivutuotteiden käytön edellytykset selvitetään ja tarvittaessa kehitetään tekniset käyttövaihtoehdot käytännön mittakaavassa toimiviksi. Jätteiden ja sivutuotteiden hyötykäyttöön liittyviä kehityskohteita ovat

- leijupolton, paineistetun leijupolton ja kaasutuksen sivutuotteiden hyötykäytön kehittäminen
- sekapolton jätteiden käytettävyyden tutkiminen ja arviointi, polttoainekoostumuksen vaikutukset, hyötykäyttömahdollisuudet ja hyötykäyttöä rajoittavat tekijät
- jätehuollon optimointi tulevaisuudessa - nykyisten ja uusien vaihtoehtoisten päästöjen käsittelymenetelmien kokonaistarkastelut tavoitteena optimaalinen tulos sekä tuotteiden käytön, puhdistuksen, energiankulutuksen että energiantuotannon kannalta.

11.3 INTEGROITU YMPÄRISTÖNHALLINTA JA PÄÄTÖKSENTEKO

Optimaalisen voimalaratkaisun valinta edellyttää useiden erityyppisten kriteerien (talouden, tekniikan, ympäristön, asukastyytyväisyyden, turvallisuuden, käyttövarmuuden jne.) samanaikaista huomioon ottamista ja kriteerien ja niiden osatekijöiden tärkeysjärjestykseen asettamista. Tässä tutkimuksessa on yleisellä tasolla selvitetty käytettävissä olevia tuotantotekniikoita ja päästöjenkäsittelymenetelmiä sekä kustannustasoja. Sekä päästöjen käsittelyssä että tekniikassa voidaan päästä monelle tasolle kohteen asettamien vaatimusten ja hyväksyttävän kustannustason mukaan. Toisaalta valinnat aiheuttavat sekä positiivisia että negatiivisia seurauksia.

naisvaikutuksia. Tällaiseen vaihtoehtojen ja tehtyjen valintojen seurannaisvaikutusten sekä kustannusten tarkasteluun ei esiselvityksessä ole voitu mennä.

Valinta on myös aina arvo- ja arvostuskysymys. Päätöksenteon tukena ja systemaattisen arviointijärjestelmän luomiseksi voidaan käyttää eritasoisia arviointi- ja vertailumenetelmiä. Nämä menetelmät ovat vielä monilta osin kehitysvaiheessa ja niiden hallittu liittäminen osaksi yrityksen päätöksentekojärjestelmää on siksi hankalaa. Asutuksen keskelle sijoitettavissa kaupunkivoimalassa toimivien, mahdollisimman hyvin paikalliset tekijät ja toimintaympäristön vaatimukset huomioon ottaen suunnittelumenetelmien ja ympäristönhallinnan menettelyjen luominen on erityisen tärkeää. Myös IPCC-direktiivi ja sen soveltamiseksi kehitettävä kotimainen lainsäädäntö edellyttävät laitosten ja niiden ympäristövaikutusten tarkastelua kokonaisuutena, mikä taas vaatii prosessien tuntemuksen lisäämistä ja teknis-taloudellisen arviointimetodiikan kehittämistä.

Esimerkkejä jatkotutkimuskohteista ovat

- vaihtoehtojen valinnan ja optimoinnin perustana olevan systemaattisen, ympäristövaikutukset, tekniset vaihtoehdot, kustannukset, tulevan kehityksen, alueelliset ja paikalliset näkökohdat ym. huomioon ottavan vertailumetodiikan kehittäminen.
Metodiikan kehittäminen on laaja tehtävä, joka vaatii sekä erilaisten ympäristötaloudellisten ja päätösanalyttisten arviointimenettelyjen kehittämistä että tekniikoita ja ympäristövaikutuksia koskevan perustietouden laajentamista ja keräämistä. Menettelyjä olisi myös pystyttävä kehittämään siten, että arviointimenettelyt ja käytännön perustieto todella toimivat vuorovaikutteisesti.
- ympäristönhallinnan menetelmien käytettävyyden parantaminen ja menetelmien joustava liittäminen yrityksen hallintajärjestelmään, menetelmien ja työvälineiden kehittäminen käyttäjäystävällisiksi
- pitkän aikavälin kaupunkivoimalaskenaarioiden luominen
- kaupunkivoimalahankkeen tarkastelu osana alueellista ja koko maan energiajärjestelmää; uusiutuvien energiamuotojen hyödyntämismahdollisuudet
- päästökaupan toteuttamisen vaikutukset Suomen energiantuotantoon ja kaupunkien tuotantajärjestelmiin.

KIRJALLISUUS

- ABB Carbon. 1997. Clean coal technology. ABB Carbon. Internet-esitemateriaali.
- Anon 1995a. Das Fernheizkraftwerk Spittelau. Eine Werks- und Funktionsbeschreibung. Fernwärme Wien. 12 s.
- Anon 1995b. Foster Wheeler Energy International. Esite.
- Anon. 1996a. Efficient CHP production at Avedore Power Station. Caddet energy efficiency, Result 227.
- Anon. 1996b. Oil and Gas Journal. International Petroleum Encyclopedia.
- Anon. 1997a. Advanced PCFB Technology on show at McIntosh Unit 4. Modern Power 1997:3, s 17 - 20.
- Anon. 1997b. Avedore2. Esite. SK Power Information Department. 16 s.
- Anon 1997c. Gas turbine world, 1997 handbook.
- Bailey, P., Gough, C., Chadwick, M. & McGranahan, G. 1996. Methods for integrated environmental assessment: Research directions for the European Union. SEI, Stockholm Environment Institute. 33 s.
- Bergmann, H., Chalupnik, R. & Jacobs, J. 1997. Entwicklungsstand von Kombi-Kraftwerken auf Kohlebasis. VGB Kraftwerkstechnik 77:3, s. 166 - 173.
- COGEN Europe. 1996. COGEN Europe 1996 Report.
- Blok, C., Turkenburg, W., Hendriks, C. & Steinberg, M. (ed). 1992. Proceedings of the First International Conference on Carbon Dioxide Removal, Amsterdam 4 - 6 March, 1992. Oxford: Pergamon Press, 826 s.
- Couch, G. 1997. OECD coal-fired power generation - trends in the 1990s. IEA Coal Research, The Clean Coal Centre. 83 s.
- Dismukes, E. 1994. Trace elements control in electrostatic precipitators and fabric filters. Fuel Processing Technology 39, s. 403 - 416.
- Ekman, J. et al. 1996. Cofiring coal and waste. IEA Coal Research, IEACR/90. 68 s.

- Energi 21. 1996. Regeringens energihandlingsplan 1996. Energistyrelsen, Denmark.
- Ergündeler, A., Tang, W., Brereton, C., Lim, C., Grace, J. & Gennrich, T. 1997. Performance of high-temperature fabric filters under gasification and combustion conditions. *Separation and Purification Technology* 11, s. 1 - 16.
- Foster Wheeler. 1997. Julkaisematon raportti.
- Frankenhauser, M. et al. 1993. Organic emissions from co-combustion of mixed plastics with coal in a bubbling fluidized bed boiler. *Chemosphere* 27, s. 309 - 316.
- Hannes, K., Neumann, F., Thielen, W. & Pracht, M. 1997. Kohlenstaub-Druckverbrennung. *VGB Kraftwerkstechnik* 77:5, s. 393 - 400.
- Havukainen, K. 1996. Energian käytön kehitys. Seminaari Energialiiketoimintaa 2000-luvulla, Helsingin Energia. S. 127 – 134.
- Hjalmarsson, A.-K. 1992. Interactions in emissions control for coal-fired plants. London, IEA Coal research, IEACR/47. 81 s.
- Hongisto, M., Soimakallio, H. & Heikkinen, A. 1997. Energiantuotantovaihtoehtojen ulkoiset kustannukset – yhteismitallistava tarkastelu. Julkaisussa: SIHTI 2 - Energia- ja ympäristöteknologia. Tutkimusohjelman vuosikirja 1996. Projektiesittelyt. Espoo: VTT Symposium 170. S. 29 – 47.
- Hämälä, S. 1995. Tutkimus kivihiilen pölypoltosta saatavan lentotuhkan laadun parantamiseksi ja hyötykäytön lisäämiseksi. Julkaisussa: SIHTI 2 - Energia- ja ympäristöteknologia. Tutkimusohjelman vuosikirja 1995. Projektiesittelyt. Espoo: VTT Symposium 169. S. 415 – 420.
- Karamanos, P. 1995. Industrial ecology: new opportunities for the private sector. *UNEP Industry and Environment*, October - December, s. 38 – 40.
- Kjaer, S. 1996. Status and future of advanced pf boiler plants. *Energy Conversion Management* 37: 6 - 8, s. 897 - 902.
- Korhonen, M. & Thun, R. (toim.) 1997. SIHTI 2, Energia- ja ympäristöteknologia, Tutkimusohjelman vuosikirja 1996, projektiesittelyt. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Symposium 170. 346 s. + liitt. 6 s.
- Kosola, M., Laikari, H. & Miettinen, P. 1996. Ympäristötalous - ajankohtaisia tutkimus- ja kehittämistehtäviä. Helsinki: Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristö 3. 79 s.

KTM 1997a. Energiatalous 2025. Skenaariotarkasteluja. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Julkaisuja 3/1997. 95 s.

KTM 1997b. Suomen energiatalous. Taustat ja toimintaympäristö. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Julkaisuja 8/1997. 126 s.

KTM 1997c. Suomen energiastategia. Valtioneuvoston energiapoliittinen selonteko. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Julkaisuja 5/1997. 56 s.

Lehtilä, A. 1995. Uusien energiatekniikoiden ja päästönvähennyksen potentiaali Suomessa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita 1697. 73 s. + liitt. 8 s.

Mattsson, P. 1996. Öljytuotteiden ekotaseen arvottaminen. Ympäristövaikutusten arvottaminen ympäristöpoliittisessa päätöksenteossa. Seminaari 9.9.1996. Suomen ympäristökeskus, ympäristöministeriö, kauppa- ja teollisuusministeriö.

Maude, C. 1993. Advanced power generation - a comparative study of design options for coal. IEA Coal Research, IEACR 55. 90 s.

Mayer-Schwinning, G. et al. 1995. Zeolithe zur Dioxin/Furan- und Schwermetallabscheidung. Staub - Reinhaltung der Luft 55, s. 183 -188.

McConville, A. 1996. New coal facilities - overcoming the obstacles. International Energy Agency IEA, Perspectives IEAPER/26.

Miettinen, P. & Hämäläinen, R. (toim.). 1996. Ympäristön arvottaminen - Taloustieteelliset ja monitavoitteiset menetelmät. Helsinki University of Technology. Systems Analysis Laboratory, Research reports B 19.

Mortensen, H. 1996. Combined Heat and Power Projects in Greater Copenhagen. In: District Heating in Denmark. URL-osoite <http://www.energy.rochester.edu/dk/dea/dh/>.

Niskala, M. & Mätäsaho, R. 1997. Ympäristölaskentatoimi. Ekonomia-sarja.

Noppenau, H. 1996. Das SK-Power -Multibrennstoff-Konzept. VGB Kraftwerkstechnik 76:6, s. 498 - 501.

Nordin, S. & Dahl, A. 1993. Experience from the first year of commercial operation of the Värtan PFBC plant. VGB Kraftwerkstechnik 73:4, s. 335 - 338.

Okawa, H. et al. 1996. Dioxin reduction by sulfur component addition. Chemosphere 32:1, s. 151 - 157.

Otterström, T., Gynther, L., Rissanen, H., Hämekoski, K., Estlander, A. & Kosonen, M. 1995. Energiantuotannon ulkoisten kustannusten arviointi pääkaupunkiseudulla. Loppuraportti. Helsinki: Energia-Ekono Oy, Maa ja Vesi Oy, YTV, Pääkaupunkiseudun energialaitokset. 117 s.

Pakkanen, T., Aarnio, P., Ruuskanen, J., Lappi, M. & Rantanen, L. 1997. Hengittävien hiukkasten kokojakauma, koostumus ja lähteet pääkaupunkiseudulla. Julkaisussa: SIHTI 2. Energia- ja ympäristöteknologia. Tutkimusohjelman vuosikirja 1996. Projektiesittelyt. Espoo: VTT Symposium 170. S. 71 - 82.

Progress Report from the Commission on the Implementation of the European Community Programme of Policy and Action in Relation to the Environment and Sustainable Development "Towards Sustainability", Brussels, 10.1.1996. COM(95) final.

Raunemaa, T., Yli-Tuomi, T. & Jalkanen, L. 1997. Suomen pienhiukkaskuormitus: taseiden arviointi lähderyhmittäin. Julkaisussa: SIHTI 2. Energia- ja ympäristöteknologia. Tutkimusohjelman vuosikirja 1996. Projektiesittelyt. Espoo: VTT Symposium 170. S. 83 - 92.

Resolution of Council and the Representatives of the Governments of the Member States Meeting with the Council of 1 February 1993 on a Community programme of policy and action in relation to environment and sustainable development (93/C 138/01).

Ruuskanen, J. 1997. Jätteenpolton tutkimus. Seurantaryhmä 6. Liekki 2 Tiedotuslehti 1/1997. 35 s.

Salokoski, P. & Äijälä, M. 1996. Kasvihuonekaasupäästöjä vähentävien energiatekniikoiden tilanne ja kehitysnäkymät Suomessa. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 19/1996. 70 s.

Sallinen, P. 1996. Energiaverokaavailut heikentävät maakaasun asemaa. Energia-uutiset 4/1996, s. 3 - 4.

Sarkkinen, S. 1997. EU:n happamoitusstrategia vaatisi ilmansuojelun tehostamista. Ilmansuojelu 3.97, s. 8.

Seppälä, R. 1995. Energiantuotantolaitosten ympäristövaikutusten arviointi. Kauppa- ja teollisuusministeriö, Tutkimuksia 86/1995.

Setzman, E., Brännström-Norberg, B.-M., Rosen-Lindholm, S. & Sundell, P. 1993. Miljökonsekvensbeskrivning "Från vaggan till graven - fallstudie VEGA". Vattenfall AB. Tutkimusraportti. 108 s. + liitt. 21 s.

Sloss, L. 1995. Mercury emissions and effects - the role of coal. London: IEA Coal Research. 39 s.

Sloss, L. 1996. Residues from advanced coal-use technologies. IEA Coal Research. IEA Perspectives IEAPER/30. 40 s.

Soud, H. & Fukasawa, K. 1996. Developments in NO_x abatement and control. IEA Coal Research, IEACR/89. 69 s.

Stockholm Energi. 1996. Markanaden Special med Tema Miljö. 23 s.

Takeshita, M. 1995. Air Pollution Control Costs for Coal Fired Power Stations. United Kingdom. International Energy Agency, IEA Coal Research, IEAPER/17. 38 s.

Timonen, K. 1997. Kaupunki-ilman terveysvaikutusten epidemiologiaa. Ilmansuojelupäivät 19. - 20.8.1997. Lappeenranta. Luentolyhennelmä. 2 s.

Tulenheimo, V. 1997. Ympäristölaskennan menetelmien soveltuvuus energiayhtiöiden päätöksenteon apuvälineiksi. Julkaisussa: Energiayhtiöiden ympäristölas-kenta ja -raportointi. Espoo: VTT Tiedotteita 1857. S. 40 – 72.

Ympäristöministeriö 1997. IPPC-suunnittelutyöryhmän mietintö. 44 s.