



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Voimalaitos- ja polttotekniikka**

**KEB-40000**

**Energiatekniikan perusteet**

**Risto Raiko**

**Katriina Kirvelä**

**Henrik Tolvanen**

**Anna Pääkkönen**

**Luentomoniste**

## SISÄLLYSLUETTELO

1	SUOMEN ENERGIAHUOLTO .....	1
1.1	Energian kulutus.....	3
1.1.1	Energian kokonaiskulutus .....	3
1.1.2	Sähkönkulutus .....	6
1.1.3	Energiansäästö .....	7
1.2	Primäärienergiälähteet.....	8
1.2.1	Tuontipolttoaineet .....	8
1.2.2	Kotimaiset energialähteet.....	11
1.2.3	Energian saatavuus Suomen kannalta .....	14
1.3	Energiantuotanto .....	15
1.3.1	Yleistä .....	15
1.3.2	Energiantuotannon kustannukset .....	17
1.4	Energia ja ympäristö.....	20
1.4.1	Kasvihuonekaasujen päästöt .....	20
1.4.2	Happamoittavien kaasujen päästöt.....	24
1.4.3	Muut päästöt.....	26
1.4.4	Kansainväliset tavoitteet ja sopimukset .....	27
1.5	Tulevaisuuden näkymiä.....	28
1.5.1	Suomi suhteessa kansainväliseen energiasektoriin .....	28
1.5.2	Energiatekniikoiden tuleva kehitys .....	31
2	LÄMPÖVOIMAKONEIDEN TERMODYNAAMISET PERUSTEET.....	33
2.1	Termodynaaminen systeemi.....	33
2.2	Termodynaaminen tila ja tilasuureet .....	34
2.2.1	Ekstensiivi- ja intensiivisuureet .....	34
2.2.2	Tilanyhtälö .....	35
2.3	Termodynamiikan pääsäännöt.....	36
2.3.1	I pääsääntö.....	36
2.3.2	II pääsääntö .....	36
2.4	Tärkeimpiä termodynaamisia funktioita .....	38
2.4.1	Sisäenergia .....	38
2.4.2	Entalpia .....	39
2.4.3	Ominaislämpö .....	40
2.4.4	Entalpian ja sisäenergian muutosten laskeminen.....	41
2.5	Termodynamiikan työaineet.....	43
2.5.1	Ideaalikaasut.....	43
2.5.2	Reaalikaasut .....	47
2.5.3	Vesihöyry .....	48
2.6	Piirrosmerkit.....	52
2.7	Avoimen systeemin yhtälöt.....	54

	2.7.1	Paisunta turbiinissa .....	57
	2.7.2	Kompressori .....	58
	2.7.3	Kuristus .....	58
3		<b>POLTTOTEKNIIKAN PERUSTEET .....</b>	<b>60</b>
	3.1	Palaminen .....	60
	3.2	Muodostumis- ja tuntuva entalpia .....	62
	3.3	Polttoaineen lämpöarvo .....	64
	3.4	Adiabaattinen palamislämpötila / dissosiaatio .....	67
	3.5	Syttymis-/palamisrajat .....	68
	3.6	Palamisreaktioiden tasapaino .....	68
	3.7	Palamisen kinetiikkaa ja palamisnopeus .....	69
	3.8	Sekoittuminen palamisreaktioissa .....	70
	3.9	Liekin lämpötila .....	71
	3.10	Ilmakerroin .....	72
	3.11	Hiilimonoksidi CO .....	73
4		<b>KIERTOPROSESSIT .....</b>	<b>76</b>
	4.1	Kiertoprosesseja, joissa väliaine on kaasu .....	77
	4.1.1	Carnot –kiertoprosessi .....	77
	4.1.2	Polttomoottoriprosessit .....	79
	4.1.3	Kaasuturbiini –prosessit .....	83
	4.1.4	Stirling-prosessi (”kuumailmakone”) .....	86
	4.1.5	Kiertoprosessien vertailua .....	88
	4.2	Kiertoprosesseja höyryille .....	88
	4.2.1	Yleistä .....	88
	4.2.2	Clausius - Rankine –prosessi (höyryvoimaprosessi) .....	89
	4.2.3	Käänteinen Clausius - Rankine –prosessi (kylmähöyryprosessi) ..	92
5		<b>HÖYRYPROSESSI .....</b>	<b>94</b>
	5.1	Muutamia tavallisia prosesseja h,s-piirroksessa .....	94
	5.1.1	Paisunta turbiinissa .....	94
	5.1.2	Lauhtuminen .....	95
	5.1.3	Syöttövesipumppu .....	95
	5.1.4	Veden esilämmitys ja höyrykattila .....	96
	5.1.5	Kuristus .....	96
	5.2	Höyryprosessin hyötysuhde .....	97
	5.3	Hyötysuhteen parantaminen .....	99
	5.3.1	Tulistus .....	100
	5.3.2	Välitulistus .....	100
	5.3.3	Syöttöveden esilämmitys .....	101
	5.4	Höyryvoimalaitoksen komponentit .....	105
	5.4.1	Syöttövesipumppu .....	105
	5.4.2	Syöttöveden esilämmittimet .....	106

5.4.3	Turbiini.....	108
5.4.4	Lauhdutin .....	109
5.4.5	Ilman esilämmitin .....	111
5.4.6	Savukaasupuhallin .....	112
5.4.7	Savukaasun puhdistus kiintoaineista.....	113
5.4.8	Tuorehöyryn lämpötilan säätö .....	113
5.5	Höyrykattilat.....	113
5.5.1	Eri tyyppisiä höyrykattiloita.....	115
5.5.2	Polttotavat .....	117
5.5.3	Kattilalaskut .....	120
5.5.4	Polttoaineen käsittely .....	122
5.6	Eri tyyppisiä höyryvoimalaitoksia .....	125
5.6.1	Lauhdevoimalaitos .....	125
5.6.2	Lämmitysvoimalaitos.....	127
5.6.3	Teollisuuden vastapainevoimalaitos .....	131
6	<b>KAUKOLÄMPÖ JA RAKENNUSTEN LÄMMITYS</b> .....	133
6.1	Yleistä.....	133
6.2	Kaukolämmön tuottaminen .....	133
6.2.1	Hankintalähteet .....	133
6.2.2	Tarvittava lämpömäärä .....	133
6.3	Kaukolämmön siirtoverkko.....	137
6.4	Rakennusten energiankulutus .....	141
7	<b>YDINENERGIA</b> .....	144
7.1	Reaktoritekniikan perusteet.....	144
7.1.1	Fissio .....	144
7.1.2	Ydinreaktorin periaate.....	146
7.2	Reaktortyytit.....	146
7.2.1	Painevesireaktori .....	148
7.2.2	Kiehtusvesireaktori .....	151
7.3	Ydinpolttoaine.....	153
7.3.1	Valmistus ja käyttö.....	153
7.3.2	Loppusijoitus.....	154
7.4	Ydinvoiman turvallisuus .....	156
7.4.1	Reaktorin suojausjärjestelmät .....	157
7.4.2	Säteilyn vaikutukset ihmiseen.....	158
7.4.3	Riskin suuruuden arvioinnista.....	159
7.5	Käsitteitä.....	160
8	<b>KAASUTURBIINI</b> .....	164
8.1	Kaasuturbiinin toimintaperiaate .....	164
8.2	Kaasuturbiinin prosessiarvojen laskeminen .....	167
8.3	Kaasuturbiinikombivoimalaitos .....	173

	8.3.1	Yleistä .....	173
	8.3.2	Kombivoimalaitoksen $\Phi P$ –karakteristika .....	176
9		<b>POLTTOMOOTTORIT</b> .....	177
	9.1	Otto –moottori .....	178
	9.2	Diesel –moottori .....	179
	9.2.1	Polttoaineen ruiskutus .....	181
	9.2.2	Kvalitatiivinen vertailu .....	182
	9.3	Moottorien tärkeitä tunnuslukuja .....	182
	9.3.1	Moottorin teho ja hyötysuhde .....	182
	9.3.2	Ominaiskulutus .....	183
	9.3.3	Keskipaine .....	184
	9.3.4	Männän keskinopeus .....	185
	9.3.5	Moottorin suorituskäyrä .....	186
	9.4	Ahtaminen .....	187
	9.5	Moottorivoimalaitos .....	188
10		<b>UUSIUTUVA ENERGIA</b> .....	192
	10.1	Aurinkoenergia .....	193
	10.2	Tuulienergia .....	195
	10.3	Bioenergia .....	201
	10.3.1	Metsäteollisuuden sivutuotteet ja kierrätyspuu .....	203
	10.3.2	Biokaasu .....	203
11		<b>ENERGIANTUOTANNOSTA SYNTYVÄT ILMANSAASTEET JA NIIDEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET</b> .....	205
	11.1	Rikki- ja typpipäästöt .....	205
	11.2	Pienpartikkelit .....	209
	11.2	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet .....	211
	11.3	Päästöjen vaikutukset ihmiseen .....	211
	11.4	Vaikutukset kasvillisuuteen .....	212
	11.5	Vaikutukset ilmastoon .....	213
12		<b>VOIMALAITOSTEN PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN</b> .....	214
	12.1	Märkä puhdistusprosessi (pesuri) .....	214
	12.2	Puolikuiva savukaasujen puhdistus .....	216
	12.3	Kuiva savukaasujen puhdistus .....	217
	12.4	Rikinpoisto .....	218
	12.4.1	Rikkitrioksidin muodostuminen poltossa .....	220
	12.4.2	Rikkidioksidipäästöjen vähentäminen .....	220
	12.4.3	Rikinpoisto tulipesässä .....	221
	12.4.4	Hapettavat olosuhteet .....	221
	12.5	Typen oksidien puhdistus .....	223
	12.5.1	Matala yli-ilma .....	224
	12.5.2	Ilman vaiheistus .....	224

12.5.3 Savukaasujen kierrätys .....	225
12.5.4 Vähennetty ilman esilämmitys .....	225
12.5.5 Polttoainevaiheistus (jälkipoltt) .....	225
12.5.6 Low-NO <sub>x</sub> -poltin .....	226
12.5.7 Sekundäärimenetelmät .....	227
12.6 Pienhiukkasten puhdistus.....	231
12.6.1 Sykloni .....	232
12.6.2 Syklonin mitoitus .....	233
12.6.3 Sähkösuodattimet .....	237
12.6.4 Kuitusuodattimet .....	238
12.6.5 Märkäpesurit.....	240
12.7 Primäärienergiatarpeen alentaminen .....	242
12.8 Teollisuuspäästödirektiivin vaikutukset Suomessa .....	242
13 ILMANSAASTEIDEN LEVIÄMINEN ILMAKEHÄSSÄ .....	244
13.1 Mallityypit .....	244
13.1.1 Laatikkomallit .....	244
13.1.2 Gaussin malli.....	250
13.1.3 Sovelluksia .....	260
13.1.4 Monisolumallit .....	264
13.2 Savupatsaan nousu.....	266
LÄHTEET.....	269
LIITTEET .....	271

# 1 SUOMEN ENERGIAHUOLTO

Energian saatavuus ja käyttö ovat edellytyksiä jokapäiväiselle elämälle ja hyvinvoinnille pohjoisilla leveysasteillamme. Energiahuollon perustehtävä on tyydyttää ihmisen ja yhteiskunnan toiminnan synnyttämät käyttöenergian tarpeet. Energiahuollon kehittäminen ei ole itsetarkoitus, vaan sen tulee palvella yhteiskunnallisten hyvinvointitavoitteiden saavuttamista ja tukea omalta osaltaan kestäväen kehityksen mukaisia ratkaisuja.

Suomen energiahuollon kehittämisessä on otettava huomioon seuraavat kolme peruslähtökohtaa: luonnonolosuhteet (kylmä ilmanala ja luonnonvarat), kansantalouden rakenne ja sen kehittämistavoitteet sekä ympäristönsuojelutavoitteet. Kylmän ilmaston johdosta rakennusten lämmitystarve korostuu energiahuollossa. Teollisuustuotantomme kehittyminen on perustunut merkittävässä määrin omien luonnonvarojemme tarjoamien mahdollisuuksien hyväksikäyttöön. Samoin energiahuollossa luonnollinen lähtökohta on ollut omien energiavarojen hyödyntäminen.

Suomen nykyinen energianhankintajärjestelmä on monipuolinen ja useita energialähteitä hyödyntävä. Kehitystä on ohjannut ensisijaisesti eri energiamuotojen saatavuus sekä taloudellisuus, mutta myös ympäristönäkökohdat ovat edistäneet mm. kaupunkien kaukolämmityksen käyttöönottoa. Monipuolinen hankintajärjestelmä antaa mahdollisuuden sopeutua suhteellisen joustavasti muuttuviin saatavuus- ja ympäristörajoituksiin. Suomen energian hankinta on pitkään tulevaisuudessakin rakenteeltaan suuressa määrin nykyisen kaltainen, sillä nopeat muutokset johtaisivat hyvin suuriin kustannuksiin. Suunnitelmallisen energiastrategian avulla voidaan tavoitteeksi asetettuja muutoksia nopeuttaa vain rajoitetusti, mutta mahdollisuudet vaikuttaa kestäväen kehityksen periaatteiden toteutumiseen energijärjestelmän luontaisen uusiutumistahdin puitteissa ovat merkittävät.

Energiahuollolle asetettavat määrälliset vaatimukset perustuvat kansantalouden rakenteeseen ja toimintavolyymiin. Kun maan rakennuskannan kokonaistilavuus kasvaa, tarvitaan enemmän lämmitysenergiaa. Teollisuustuotteiden kulutuksen ja viennin lisääntyessä niiden valmistus ja kuljetus kasvattavat energiankulutusta. Kotitalouksien varustetason noustessa sähkökäyttöisten koneiden lisääntyminen johtaa sähkönkulutuksen kasvuun. Energian kokonaistarve määräytyy väestömäärän, elintason ja kulutustottumusten, taajama- ja haja-asutusalueilla sijaitsevan rakennuskannan sekä teollisuuden ja palveluiden rakenteen perusteella. Niinpä kansantalouden toimintavolyymia parhaiten kuvaavalla bruttokansantuotteella ja energiankulutuksella onkin vahva riippuvuussuhde. Kansantalouden kehittämistavoitteet, jotka sinänsä tulee määritellä kestäväen kehityksen periaatteiden mukaisesti, muodostavat samalla peruslähtökohdan energiahuollon kehittämiselle.

Väestömäärän lisääntymiseen ja elintason nousuun liittyvän kulutuskasvun myötä ympäristölle aiheutettu kuormitus on noussut uhkaamaan luonnon kestävyyskykyä. Tästä aiheutuvat rajoitukset on otettava huomioon energiahuollon ratkaisuihin.

Luonnonolosuhteiden asettamat vaatimukset ja tarjoamat mahdollisuudet, kansantalouden kehittämistavoitteet sekä ympäristönsuojelutavoitteet muodostavat reunaehdot Suomen energiahuollon tulevaisuudensuunnittelulle kestävä kehityksen periaatteiden mukaisesti. Koska energiahuolto muodostaa osan koko kansantaloudesta ja kytkeytyy läheisesti ympäristötalouteen, energiasuunnittelussa tulee käyttää hyväksi kaikki energiatalouden tarjoamat keinot kokonaistavoitteiden saavuttamiseksi. Tärkeintä ei ole energiankulutuksen määrä, vaan sen tuottamisen aiheuttama ympäristökuormitus ja kustannus.

Energian saantivarmuuden turvaamiseksi energiantuotannon rakenteen on oltava riittävän monipuolinen ja kullakin tärkeällä primäärienergiälähteellä on oltava enemmän kuin yksi hankintakanava. Energiahuollon omavaraisuutta lisäämällä parannetaan saantivarmuutta ja vähennetään ulkomaanvaluuttamenoja.

Energianhankintakustannusten suuruus vaikuttaa koko kansantalouteen. Erikoisesti energiaintensiivisen teollisuuden kilpailukyvyille energian hinnalla on suuri merkitys. Energiakustannusten kasvun vaikutus ei välttämättä rajoittuisi siihen, että kansantalouden koko kakusta menisi suurempi siivu energiaan, vaan kilpailukyvyyn ja markkinaosuuksien menettämisen kautta jaettavana oleva kakku saattaisi samalla pienentyäkin. Teollisuutemme kansainväliset kilpailuedellytykset ovat suurempien kuljetuskustannusten johdosta useimpia kilpailijamaita huonommat. Varsinkin silloin, kun muiden tuotantopanosten hintatasossa ei ole eroa, kilpailukyky on saavutettava paremmalla teknistaloudellisella osaamisella niin varsinaisen tuotantoprosessin kuin energiantuotannon osalta.

Täysin haitatonta energiantuotantomenetelmää ei ole olemassa. Kestävään kehitykseen pyrittäessä energiataloudelliset valinnat on tehtävä yhteensovittamalla optimaalisesti kansantalouden ja ympäristönsuojelun asettamat vaatimukset. Parhaan ratkaisun löytämiseksi on varottava etukäteen tekemästä kategorisia valintoja tai vaihtoehtojen pois-sulkemisia.



## 1.1 Energian kulutus

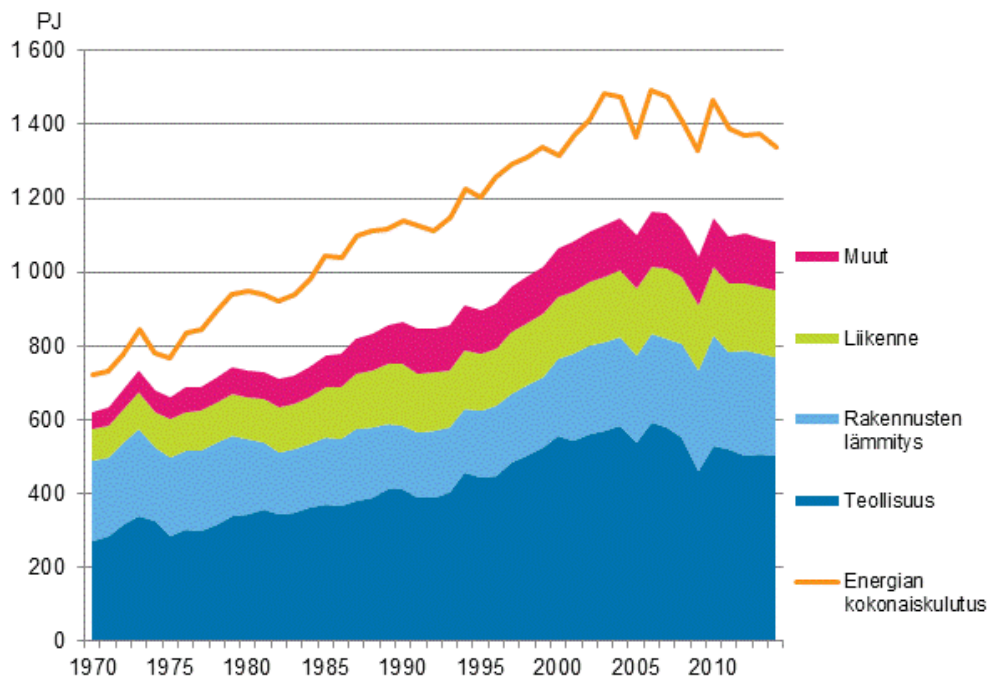
### 1.1.1 Energian kokonaiskulutus

Suomessa energian käyttö asukasta kohden on maailman korkeimpia johtuen ensisijaisesti teollisuuden energiaintensiivisyydestä, mutta myös kylmästä ilmastosta, pitkistä välimatkoista, harvasta asutuksesta sekä korkeasta elintasosta. Vuonna 2013 primäärienergian kokonaiskulutus oli noin 386 TWh (terawattituntia) ja se jakautui loppukäytön mukaan luokiteltuna seuraavasti: (Motiva)

- teollisuus	46 %
- liikenne	16 %
- rakennusten lämmitys	25 %
- koti- ja maatalous, palvelut ja muut	12 %

Teollisuuden energiankäyttö ylsi lähes puoleen kaikesta loppukulutuksesta. Suurin energiankulutuksen toimiala oli metsäteollisuus. Rakennusten lämmitys vei noin neljäsosan loppukulutuksesta. Vuonna 2012 rakennusten energiankulutuksesta 87 % meni rakennusten lämmittämiseen. Kotitalouksien kuluttamasta energiasta 29 % oli kaukolämpöä, 34 % sähköä (sisältää sähkölämmityksen sähkönkulutuksen) ja puun osuus oli 26 %. Muita lähteitä olivat kevyt polttoöljy, lämpöpumput, maakaasu ja hiili.

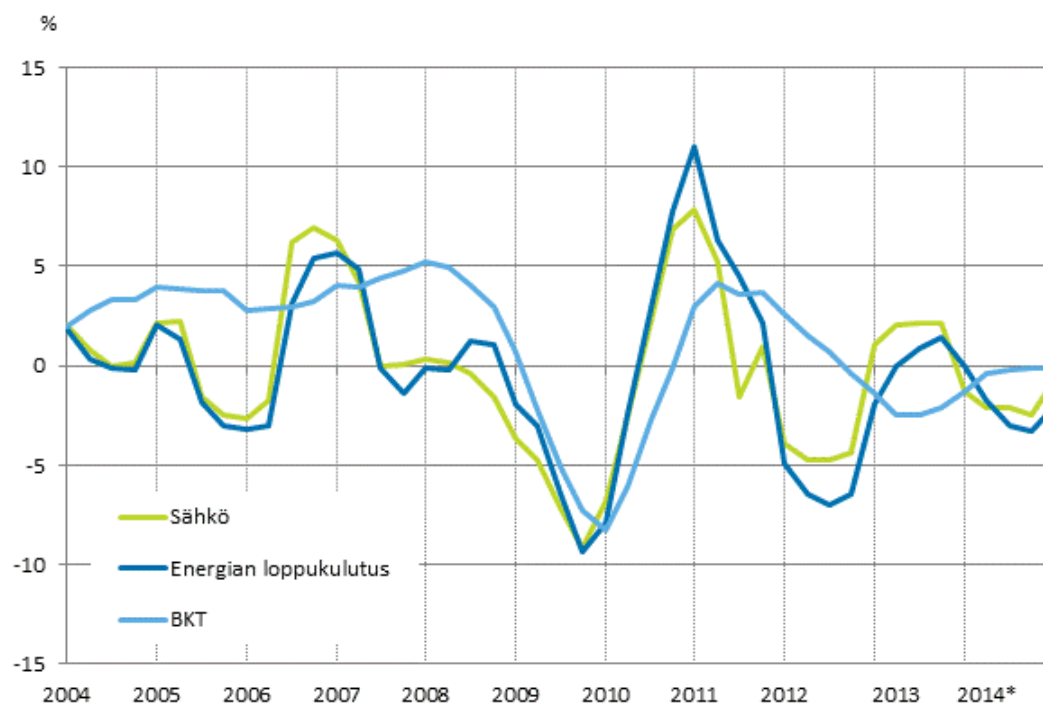
Suomen primäärienergian kokonaiskulutus (Kuva 1.1) on kasvanut tasaisesti viimeisten vuosikymmenien aikana; ainoastaan energiakriisit ja vuoden 2008 taloustaantuma ovat aiheuttaneet lyhytaikaisia laskuja.



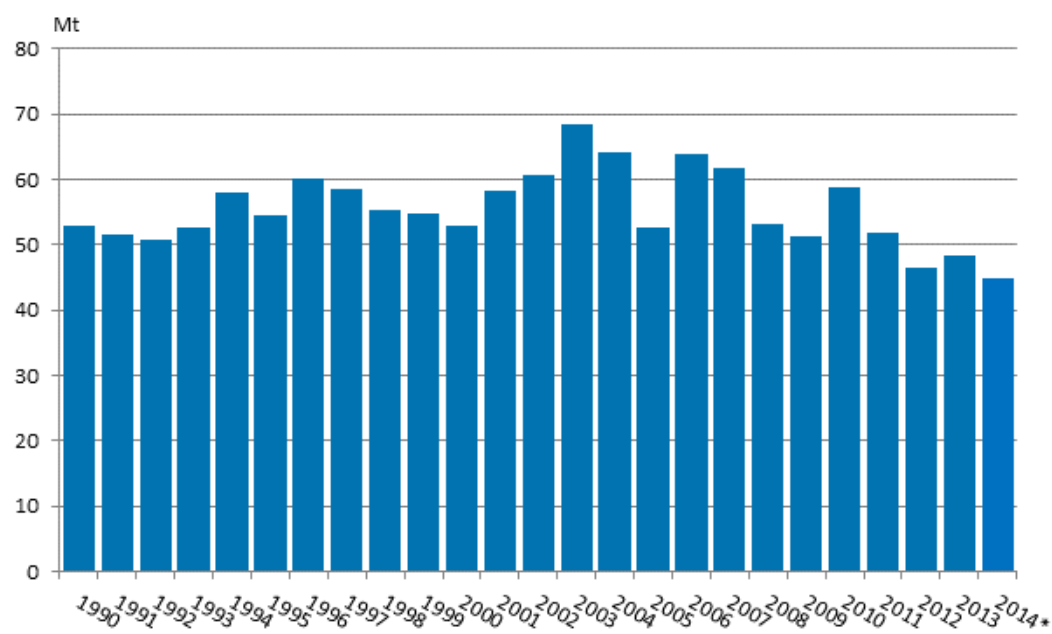
Kuva 1.1. Primäärienergian kokonaiskulutuksen jakautuminen vuosina 1970-2014 sektoreittain (tilastokeskus).

Huomattavaa Kuvassa 1.1 on 1970-luvulta lähtien jatkunut voimakas primäärienergiankulutuksen kasvu. Se on johtunut pääosin Suomen kasvavasta teollisuustuotannosta. Lisäksi häviöiden suuruus on kasvanut sähköntuotannon häviöiden myötä. 2000-luvulla energiankulutusta on hillinnyt esimerkiksi vuonna 2005 metsäteollisuuden työselkkaus sekä harvinaisen lämmin sää. Vuoden 2008 taantuma vaikutti ennen kaikkea metsäteollisuuden energiankulutukseen.

Kuvissa 1.2. ja 1.3. esitetään Suomen kokonaisenergian ja sähköenergian sekä bruttokansantuotteen välinen riippuvuus sekä fossiilisten polttoaineiden käytön CO<sub>2</sub>-päästöt.



Kuva 1.2. Bruttokansantuotteen ja energian kulutuksen muutokset (Tilastokeskus).



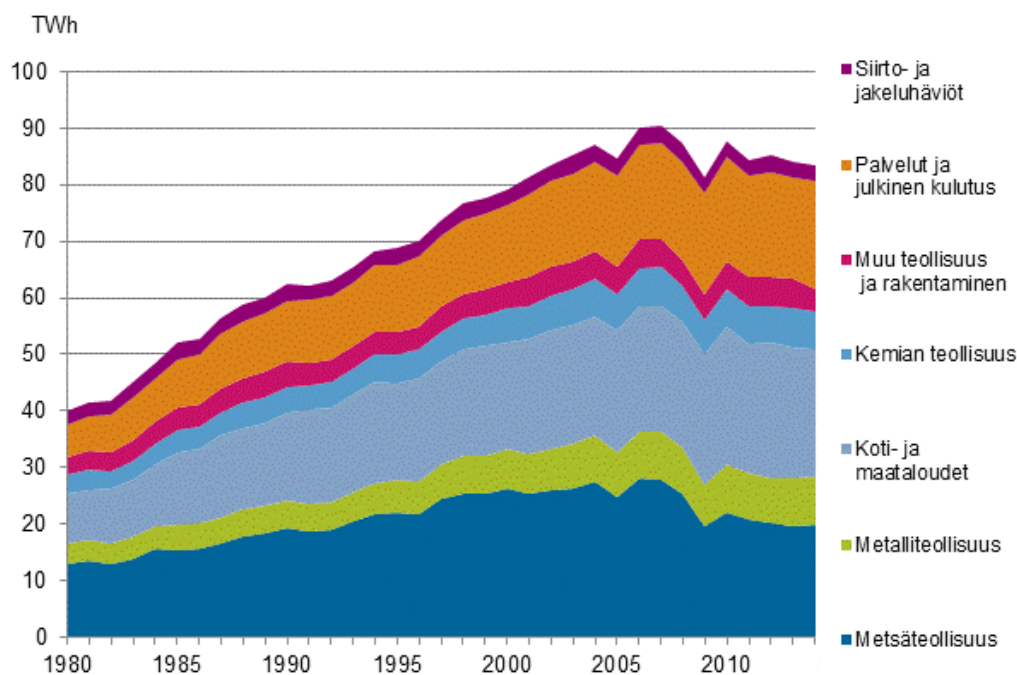
Kuva 1.3. Fossiilisten polttoaineiden käytön hiilidioksidipäästöt miljoonina tonneina (tilastokeskus).

Kuvasta 1.2 nähdään, että energian merkitys bruttokansantuotteelle on erittäin ratkaiseva. Erityisesti Suomen kaltaisessa maassa, jossa ilmasto on kylmä, kuljetusyhteydet ovat pitkät maan harvasta asutuksesta johtuen ja myös tuotannon rakenne on raaka-ainepohjasta johtuen hyvin energiavaltaista, energian merkitys on aivan keskeinen bruttokansantuotteelle. Tämä näkyy hyvin oheisista kuvioista, joissa on kuvattu bruttokansantuotteen ja energian loppukulutuksen välistä suhdetta sekä sähkön kokonaiskulutusta Suomessa. Energia on täysin välttämätöntä nykyisen kaltaisen elintason ylläpitämiselle Suomessa. Myös kaikki kasvunäkymät lähtevät siitä, että energian kulutus jatkokoskakin yhä vain kasvaa. Ei ole näköpiirissä sellaista taloudellista kasvua, joka saataisiin aikaan ilman jonkin asteista energian käytön lisäystä. Pikemminkin yhteys taloudellisen kasvun ja energian käytön välillä on jokseenkin yhden suhteessa yhteen, tuotanto kasvaa yhtä paljon kuin kasvaa energiankin käyttö. (Risto Suominen, Suomen Yrittäjät)

Kuvasta 1.3 nähdään, että Suomen hiilidioksidipäästöt ovat laskeneet. Tämä johtuu pitkälti supistuneesta teollisuustuotannosta, ei niinkään parantuneesta energiatehokkuudesta tai puhtaammista energialähteistä.

### **1.1.2 Sähkönkulutus**

1980-luvulta nykypäivään sähkönkulutus on noin kaksinkertaistunut (Kuva 1.4.). Kehitys 2000-luvun alkuun asti on ollut lähes lineaarista sähkönkulutuksen kasvua, kunnes taloudellinen lama pysäytti kasvun 2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen puolivälin jälkeen. Sähkönkulutus on kasvanut selvästi bruttokansantuotetta nopeammin. Aikavälillä 1970 - 1990 koko kansantaloutemme keskimääräinen sähköintensiteetti kasvoi noin 50 %. Sähkön tarpeen voimakas kasvu selittyy ennen kaikkea teollisuuden toimintavolyymien sekä sähköintensiteetin kasvusta. Lisäksi osa lämmitykseen tuotettavasta energiasta on tuotettu enenemässä määrin sähköllä. Sähkönsäästö on luonnollisesti vähentänyt jonkin verran näiden kahden efektin yhteistä kasvuaikutusta. Lisäksi vuonna 2008 alkanut taloustaantuma ja Suomen teollisuuden meneillään oleva rakennemuutos ovat vaikuttaneet sähkönkulutukseen vähentävästi.



Kuva 1.4. Sähkönkäyttö kulutussektoreittain 1980–2014 (perusskenaario) (tilastokeskus)

Sähkön käyttö kokonaisuudessaan oli vuonna 2014 83,3 TWh. 78 % eli 65,3 TWh oli kotimaista tuotantoa, loput tuontisähköä Pohjoismaista, Venäjältä ja Virosta. 30 % kotimaisesta tuotannosta tuotettiin uusiutuvilla energialähteillä.

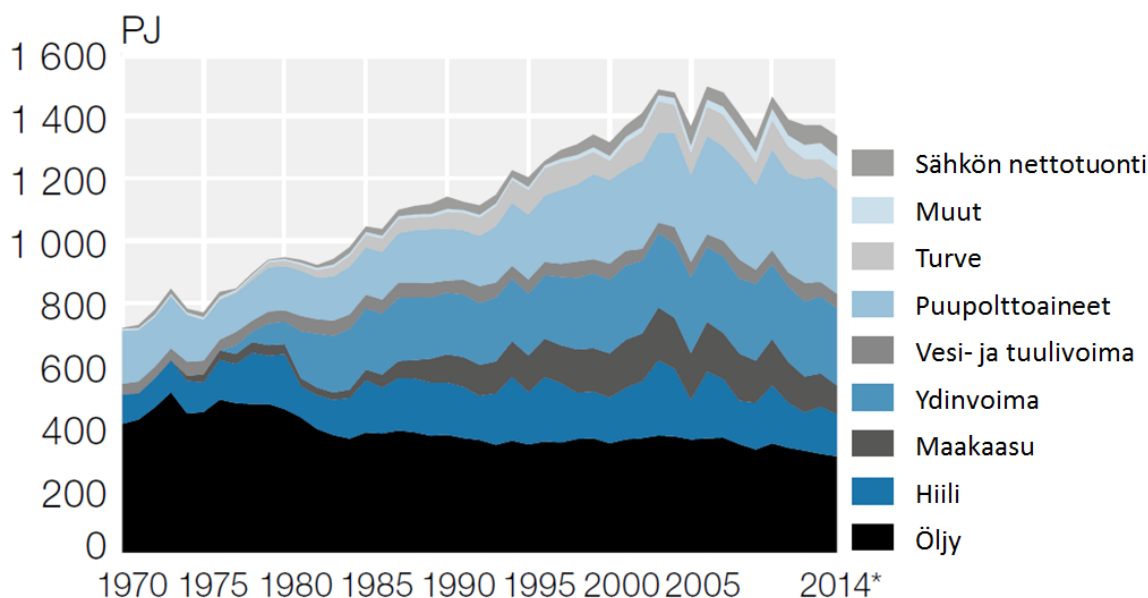
### 1.1.3 Energiansäästö

Käyttökohteeseen yksilöidyllä energiansäästöllä ja energiankäytön tehostamisella tarkoitetaan tuotteen tai muun suoritteen aikaansaamiseen tarvittavan energiamäärän eli ominaiskulutuksen alentamista teknisin parannuksin tai kulutustottumuksia muuttamalla. Tuote- tai toimintakohtaiset energian ominaiskulutukset ovat selvästi alentuneet lähes kaikilla kulutussektoreilla 1970- ja 1980-luvuilta. Esimerkiksi Suomen metsäteollisuuden ominaiskulutusluvut ovat parhaimmasta päästä kansainvälisessä vertailussa. Samoin rakennusten lämmitysenergiaa suhteutettuna astepäivinä ilmaistuun lämmitystarpeeseen käytetään Suomessa selvästi vähemmän kuin useissa muissa maissa.

Kulutustottumuksia muuttamalla ja tarpeettoman energiankäytön vähentämisellä säävutettava energiansäästö sekä energiankäytön tehostaminen kuuluvat luonnollisena osana kestäväen kehityksen mukaiseen energiatalouteen. Yhtä lailla on karsittava kuitenkin myös välillistä energiankulutusta, koska suurin osa ihmisen kokonaisenergiankäytöstä muodostuu hänen käyttämiensä tuotteiden ja palveluiden aikaansaamiseen tarvittavasta energiasta.

## 1.2 Primäärienergiälähteet

Ulkomaisia energialähteitä ovat maahan tuodut fossiiliset polttoaineet (öljy, hiili ja maakaasu), ydinvoiman tuotannossa tarvittava uraani sekä tuontisähkö. Kotimaisia primäärienergiälähteitä taas ovat vesivoima, teollisuuden prosesseissa sivutuotteina syntyvät erilaiset polttoaineet sekä polttopuu ja -turve. Pienessä mittakaavassa kotimaisia energialähteitä ovat myös tuulivoima ja aurinkoenergia. Ulkomaiset primäärienergiälähteet muodostavat nykyään noin kaksi kolmasosaa energian kokonaiskulutuksesta. Osuudet vaihtelevat hieman vuodesta toiseen riippuen vesivoiman saatavuudesta sekä teollisuuden käyttöasteesta. Koko 1990-luvun kotimaisten primäärienergiälähteiden käyttö lisääntyi vuodessa 3-4 prosenttiyksikköä. (Energia Suomessa 1999, 61.) Kuvassa 1.5 esitetään kokonaiskulutus energialähteittäin vuosina 1970-2014 yhteismitalliseksi muutettuna, laatuna PJ.



Kuva 1.5. Energian kokonaiskulutus Suomessa energialähteittäin (Tilastokeskus).

### 1.2.1 Tuontipolttoaineet

Tuontipolttoaineita Suomen energian hankinnassa ovat öljy, maakaasu, hiili ja ydinenergia sekä tuontisähkö.

Tärkein primäärienergian lähde on 1960-luvun puolivälistä lähtien ollut öljy. Öljytuotteiden käyttöä vähensi kuitenkin öljykriisi 1970-luvulla. Ennustetaan, että öljyn käyttö sähkön ja lämmön tuotantoon tulee edelleen vähenemään hinnan, rikinpoistokustannusten sekä jatkuvaa saatavuutta koskevien epäilyjen vuoksi. Öljynjalostamoiden jäteöljyn käyttö vähäpäästöisten kaasutusvoimalaitosten polttoaineena voi kuitenkin

kin tulla kysymykseen. 1950-luvun loppupuolelle asti kaikki öljytuotteet tuotiin maahan valmiiksi jalostettuna, mutta nykyään Neste kykenee jalostamaan kaikki Suomessa tarvittavat öljypohjaiset polttoaineet. Moottoribensiini ja dieselöljy käytetään pääosin liikennesektorilla, polttoöljyt puolestaan kiinteistöjen lämmityksessä ja voimalaitoksissa.

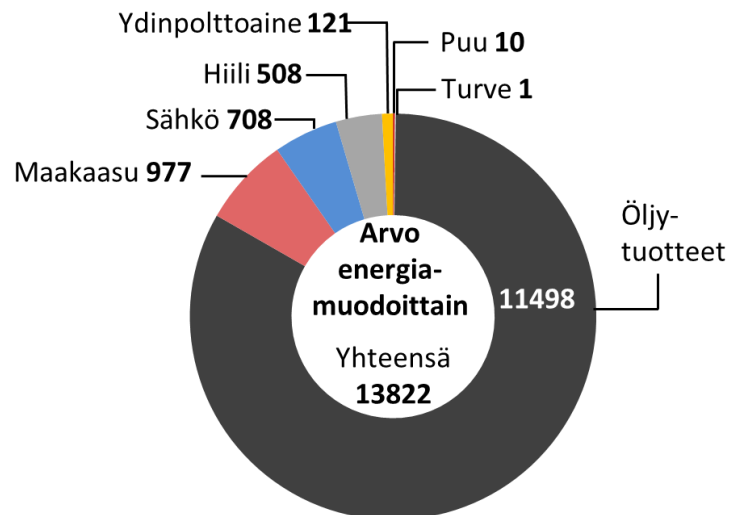
Hiilen osuus ulkomaisista primäärienergiälähteistä on vaihdellut öljyn ja hiilen saatavuuden ja niiden hintasuhteiden mukaan. Hiilen osalta saatavuus- ja hintaepävarmuudet ovat muita polttoaineita vähäisemmät. Kun savukaasujen puhdistustekniikka on kehittynyt hyvin nopeasti, on hiilen ongelmana lähinnä poltettaessa syntyvän hiilidioksidin vaikutus ilmaston lämpenemiseen. Toisaalta tämä ongelma voi jo yksinään estää hiilen käytön lisääntymisen ja jopa rajoittaa olemassa olevien hiiltä polttavien voimalaitosten käyttöä. (Energia Suomessa 1999, 63).

Maakaasua on tuotu Suomeen vuodesta 1974 lähtien. Kaasu tulee Suomeen Venäjältä Länsi-Siperiasta putkea pitkin. Fossiilisista polttoaineista maakaasu on ympäristön kannalta muita puhtaampi. Sekä rikki-, typpi- että hiilidioksidipäästöt ovat maakaasulla pienemmät kuin öljyllä ja hiilellä. Maakaasun käytön lisäämisen ongelmina ovat siirtokapasiteetti, toimitusten varmuus ja hinta. Maakaasua tuotiin vuonna 1992 Venäjältä n. 3 mrd m<sup>3</sup> ja nyt kulutus lähentelee 5 mrd m<sup>3</sup>:iä. Maakaasun käyttöpotentiaalia on Etelä- ja Lounais-Suomessa kaikkiaan n. 7 mrd m<sup>3</sup> vuodessa.

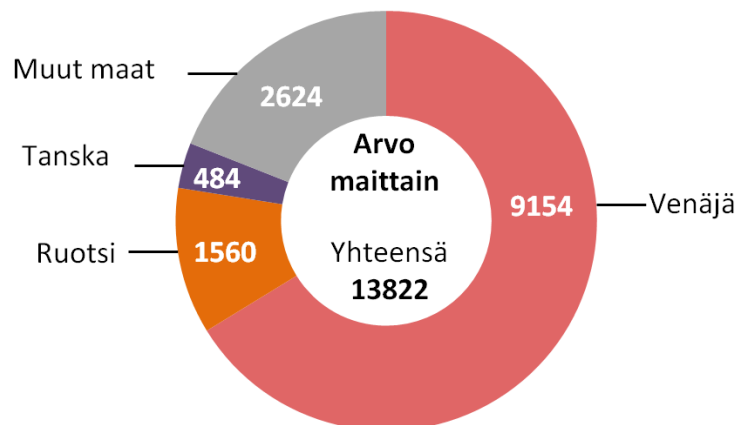
Uusin Suomessa käyttöön otettu ulkomainen primäärienergian lähde on ydinvoima. Sen osuus energian kokonaiskulutuksesta on ollut 1980-luvun puolivälistä nykyhetkeen asti 17-19 %. Valittavana olevista energialähteistä ydinenergia on monessa suhteessa muita edullisempi. Sillä ei ole savukaasupäästöjä lainkaan. Riittävän suuressa mittakaavassa (1000 ... 1600 MW) toteutettuna se on saatujen hintatarjousten mukaan kustannuksiltaan muita edullisempi. Tähänastiset käyttökokemukset Suomen ydinvoimalaitoksista ovat maailman parhaita. Keväällä 2002 Suomeen Olkiluotoon päätettiin rakentaa uusi 1600 MW:n painevesityyppinen ydinvoimalaitos. Sen valmistusmisaikajankohta on siirtynyt 2010-luvun loppuun. Lisäksi sen rakentamiskustannukset noussevat yli 9 miljardin alkuperäisen 3 miljardin sijaan. Laitoksen tekninen käyttöikä on 60 vuotta.

Nykyisten suunnitelmien mukaan Fennovoima rakentaa Pyhäjoen Hanhikiven niemen laitospaikalle yhden lämpöteholtaan 3220 megawatin ja sähköteholtaan noin 1200 megawatin ydinvoimalaitosyksiköt sekä sen toimintaan tarvittavat muut ydinlaitokset. Hanhikivi 1 -ydinvoimalaitoksen laitostoimitussopimuksen osapuolet ovat Fennovoima ja Rosatom-konserniin kuuluva RAOS Project Oy. Sovitun aikataulun mukaan voimala tuottaa sähköä vuonna 2024. Yksikön suunniteltu toiminta-aika on 60 vuotta. (Fennovoima)

Suuri osa Suomen tuontienergiasta tulee Venäjältä. Pääosa tuoduista polttoaineista on öljyä. Tästä suuri osa menee jalostuksen kautta myyntiin, joten nettoenergialasku pienenee sen mukaisesti. Seuraavissa Kuvissa 1.6 ja 1.7 on esitetty Suomeen tuotavien polttoaineiden hintaa sekä tuontienergian alkuperämaita vuonna 2013.



Kuva 1.6. Polttoaineiden tuonti Suomeen ja niiden arvo vuonna 2013. (Helsingin Sanomat, 24.9.2014)



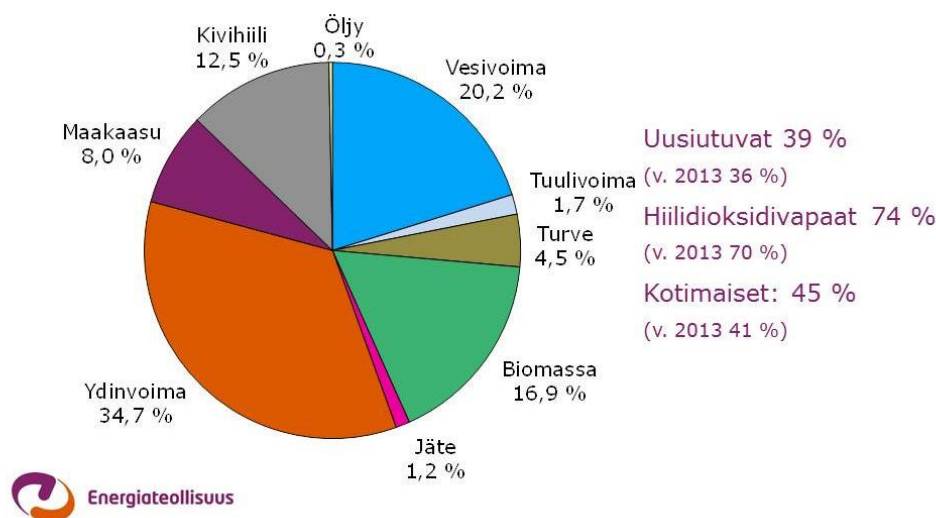
Kuva 1.7. Suomen tuontienergian alkuperämaat vuonna 2013. (Helsingin Sanomat, 24.9.2014)

Parin viime vuosikymmenen kuluessa on kriisiherkän ja pitkän ajan riittävydeltään ongelmallisen öljyn suhteellinen osuus energianhankinnassa alentunut merkittävästi samalla, kun käyttöön on otettu uusia energianlähteitä, kuten ydinvoima, maakaasu ja turve.



## 1.2.2 Kotimaiset energialähteet

Kotimaiset energialähteet, joista tärkeimmät ovat vesivoima, teollisuuden prosesseissa syntyneet polttoaineet sekä puu ja turve, kattavat nykyisin noin kolmanneksen Suomen primäärienergian tarpeesta. Tuulivoima ja aurinkoenergia edustavat uusiutuvia energialähteitä, joiden teoreettiset varat ovat suuret, mutta joiden hyödyntämistä rajoittaa niiden kalleus. Eri energialähteiden osuudet sähköntuotannosta on esitetty kuvassa 1.8. Kuvaan on merkitty myös kotimaisen energian suhteellinen osuus.



Kuva 1.8. Sähköntuotanto energialähteittäin.

Suurin osa kotimaisesta sähköntuotannosta katetaan vesi- ja biovoimalla.

Vesivoima on 1960-luvulta ollut olennainen kotimainen primäärienergianlähde. Suurin ja edullisin osa vesivoimasta on jo valjastettu sähköntuotantoon, mutta käyttämätöntä potentiaalia on vielä jossain määrin jäljellä. Nykyään Suomen vesivoimakapasiteetti oli noin 3100 MW ja vesivoiman osuus sähköntuotannosta vaihtelee Suomessa vuosittain 10-20 % välillä riippuen vesitilanteesta. Vesivoiman suojelun piiriin kuulumaton lisärakennuspotentiaali rajajoet mukaanlukien kattaisi viisi prosenttia nykyisestä sähköntarpeesta; ilman rajajokia vain kaksi prosenttia.

Vesivoiman yhteydessä olevilla varastoaltailta saavutettava sähköntuotannon säätö- ja varastointimahdollisuus lisää vesivoiman arvoa sähköjärjestelmässä. Vesivarastoilla voidaan myös välttää kalliiden polttoaineiden käyttöä sähkönkulutushuippujen aikana. Lisäämällä nykyistä varastoallaskapasiteettia saavutettaisiin säästöä polttoaineiden käytössä. Erikoisesti tuulivoiman käyttöönoton kannalta lisävarastointikapasiteetti olisi tarpeen. Varastoaltaiden rakentamista vaikeuttavat paikalliset ympäristövaikutukset.

Kuitenkin globaaliselta kannalta vesivoima on ehdottomasti puhtain laajamittaisessa käytössä oleva sähköntuotantokeino, koska se ei aiheuta minkäänlaisia päästöjä ilma-kehään.

Metsäteollisuuden sivutuotteet ovat tällä hetkellä suurin kotimainen energianlähde. Selluloosan keittoprosessissa syntyvää musta- ja sulfiittilipeää ryhdyttiin käyttämään polttoaineena 1950-luvun puolivälissä. Kyse oli hyvin merkittävästä energiataloudellisesta ja myös ympäristötaloudellisesta ratkaisusta, koska kaikki selluprosessissa ja suuri osa paperinvalmistuksessa tarvittavasta lämmöstä saatiin tuotettua tällä tavalla. Sulfiittilipeän käyttö polttoaineena väheni sitä mukaa kuin sulfiittisellun tuotanto kutistui, ja se loppui kokonaan 1990-luvun puolivälissä. Mustalipeän polton osuus Suomen kokonaisenergiantuotannosta on noin 7 %. Mustalipeää voidaan käyttää luonnollisesti vain niin paljon kuin sitä selluloosan keittoprosessissa syntyy, joten käyttö kasvaa samassa suhteessa kuin selluloosan valmistuskin kasvaa. Sitä ei myöskään toistaiseksi siirretä muualle käytettäväksi, vaan se poltetaan sellutehtaalla. Parhaillaan tutkitaan polttoaineiden valmistamista mustalipeästä.

Suomi on maailman johtava maa metsäenergian hyödyntämisessä. Suomi on myös edelläkävijä puunkorjuun ja polttoteknologian kehittämisessä. Metsäenergiajakeita on monia. Metsäteollisuuden puunkäytön ja tuotannon yhteydessä syntyy energijakeita, joista merkittävimmät ovat sellunkeiton sivutuote mustalipeä, puun kuori ja sahanpuru. Nämä on jo melko pitkään hyödynnetty täysimääräisesti energialähteinä, valtaosin teollisuuden omissa voimalaitoksissa ja lämpökattiloissa tuottamaan sähköä, prosessihöyryä ja lämpöä. Näiden lisäksi metsästä saadaan energiakäyttöön metsähaketta. Suomessa ei kasvateta varsinaisia energiapuumetsiä. Metsähaketta tuotetaan pääosin päätehakkuiden sivutuotteista latvuksista, oksista ja kannoista sekä metsänhoidollisten harvennushakkuiden pienpuusta. Metsähakkeen käyttö on voimakkaassa kasvussa.

Puun perinteisin energiakäyttö on kotitalouksien ja muiden kiinteistöjen lämmityksen pienkäyttöä. Puun lämmityskäyttö on yleistynyt erityisesti sähkölämmitykselle rinnakkaisena lämmitystapana. Sen sijaan puun käyttö kiinteistöjen yksinomaisena lämmitystapana on vuosikymmenten kuluessa vähentynyt merkittävästi kaukolämmön ja sähkölämmityksen kasvatettua osuuttaan. Yhtenä lämmitysovelluksena on puupellettien hyödyntäminen. Suomessa pellettejä ei ole laajamittaisesti käytetty kaukolämmön tai sähkön tuotannossa.

Myös kierrätyspuu on merkittävä energijae. Puutuotteet ja –rakenteet voidaan elinkaarensa lopuksi hyödyntää energiana. Metsäenergian lisäksi bioenergiaa voidaan saada pelloilta. Suomessa on kasvatettu energijakeena ruokohelpeä, jota voidaan hyödyntää voimalaitoksissa ja lämmityskattiloissa. Peltoviljelyn tuotteita voidaan myös hyödyntää energiana sellaisenaan tai jalostaa niistä biokaasua tai bioöljyjä.

Bioenergian osuus koko Suomen energiankäytöstä on noin viidennes. Kaukolämmön ja siihen liittyvän sähkön yhteistuotannon polttoaineista bioenergian osuus oli vuonna 2014 noin 31 %. Sähköntuotannosta bioenergian osuus oli 13 % vuonna 2014. (energia.fi)

Maamme turvevarat ovat suuret, ja niiden hyödyntämiseen perustuvaa tekniikkaa alettiin määrätietoisesti kehittää 1970-luvun öljykriisien seurauksena energihuollon oma-varaisuusasteen nostamiseksi. Turpeen riittävyys ei nykyisten käyttösuunnitelmien valossa muodostu ongelmaksi moneen kymmeneen vuoteen. Turpeen käyttöä rajoittavat sen tuotantoon ja polttamiseen liittyvät ympäristövaikutukset, joiden kuitenkin oletetaan vähenevän turpeen hyödyntämisteknologian kehittyessä. Turve luokitellaan hitaasti uusiutuvaksi biopolttoaineeksi 2000-3000 vuotta kestävän uudistumisen takia. Optimistisimmat polttoturpeen käyttöarviot päätyvät noin 10 prosenttiin energian kokonaiskulutuksesta vuoden 2000 jälkeen. Turvevaramme ovat maailman viidenneksi suurimmat. Suomen soiden kokonaispinta-alasta on varattu turvetuotantoon noin yksi prosentti. Energiaturpeen osuus Suomen vuotuisesta energian kokonaiskulutuksesta on vaihdellut viime vuosina 6 – 7 % välillä.

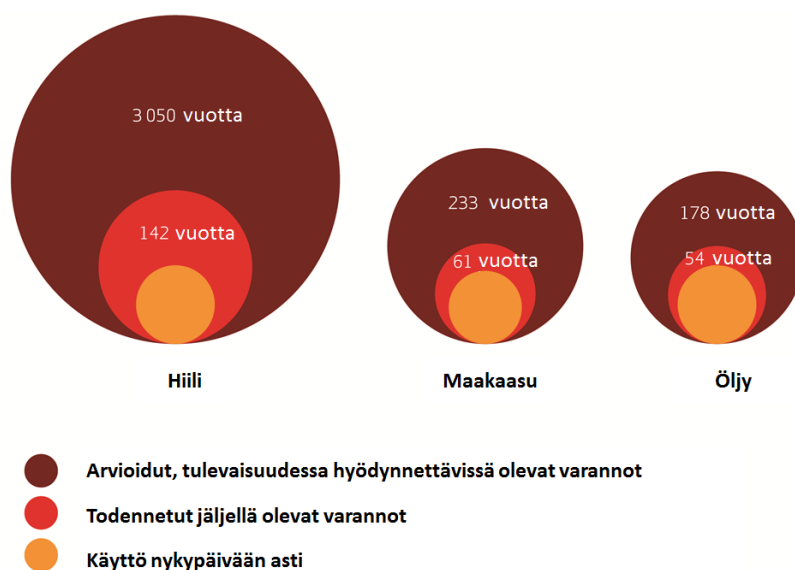
Tuulivoiman rakentaminen alkoi Suomessa kokeilumielessä 1980-luvun lopulla. Vuoden 2000 lopulla tuulivoimaa oli rakennettu n. 50 MW. Vuoden 2013 lopussa Suomessa oli 211 voimalaa, joiden yhteenlaskettu teho on 448 megawattia. Vuonna 2013 tuulivoimalla tuotettiin sähköä 777 GWh. Tuulivoimalat tuottivat yhteensä 0,9 prosenttia Suomen sähkönkulutuksesta.

Tuuliolosuhteiden perusteella parhaat edellytykset tuulivoiman tuotannolle ovat rannikolla ja saaristossa. Maankäyttörajoitukset huomioonottaen tuulivoiman tekniseksi potentiaaliksi meillä on arvioitu vajaan 6 TWh sähköä vuodessa, josta saariston osuus olisi noin neljännes. Lisäksi Lapin tunturialueilla on tuulisuutensa ansiosta suuri tekninen tuulivoimapotentiaali, joskin arktiset olosuhteet asettavat tuuligeneraattoreille omia erikoisvaatimuksiaan. Myös Suomen merialueilla on huomattava teoreettinen tuulipotentiaali, joka voisi soveltua sähköntuotantoon off-shore-tekniikalla. Todellinen hyödyntäminen edellyttää kuitenkin vielä huomattavaa tutkimus- ja kehitystyötä. Tuulivoimalla tuotetun sähkön arvoa alentavat tuulisuuden muutoksista aiheutuvat tuotannon ajalliset vaihtelut, minkä johdosta tuulivoima vaatii rinnalleen muuta säätö- ja varatehokapasiteettia. Tuulivoiman osuuden jäädessä selvästi alle viiden prosentin koko sähköjärjestelmän vuosienergiasta säätö- ja varatehon aiheuttamat lisäkustannukset pysyvät vielä kohtuullisina. Tuulivoiman käytön yleistymistä rajoittaa sen kalleus. Edullisimman tuulivoimapotentiaalın sähköntuotantokustannus on arvioitu noin kaksinkertaiseksi verrattuna nykyisiin käytettyihin sähköntuotantomuotoihin. Suomessa käynnissä olevat tuulipuistohankkeet tulevat antamaan tarpeellista luotettavaa käyttökokeemus- ja kustannustietoa. Tuulivoiman haitat ovat paikallisia: ympäristön asukkaiden asenne, ääniefektit, mahdolliset häiriöt radioliikenteelle sekä linnuille aiheutetut riskit.

Aurinkosähkö on kilpailukykyistä Suomessa vain pienissä erikoissovelluksissa, mutta valtakunnallisessa energiataseessa sillä ei ole merkitystä. Rakennusten lämmitykseen tarkoitettujen aurinkolämpöjärjestelmien investointikustannukset ovat suuret, koska järjestelmä edellyttää kausivarastointia. Sen lämmöntuottokustannukset ovat nykyisin selvästi suuremmat kuin tavanomaisten lämmitysratkaisujen.

### 1.2.3 Energian saatavuus Suomen kannalta

Jo ennen vuoden 1973 ensimmäistä öljykriisiä oli eri tahoilla havahduttu huomaamaan, että maailman energiavarat ovat rajalliset ja hupenemassa kovaa vauhtia. Kuluneina vuosina on huoli energiavarojen riittävyydestä häipynyt hämmästyttävässä mitassa jälleen taka-alalle, vaikka kyky tuottaa toivotussa määrin öljyä ja maakaasua on pysyväisluonteisesti uhattuna jo 30-40 vuoden sisällä. Kuvassa 1.9 on esitetty International Energy Agency:n (IEA) laatima arvio fossiilisten polttoaineiden riittävyydestä nykykulutuksella. Lisäksi kuvassa on esitetty vaikeammin hyödynnettävissä olevat varannot, joita arvioidaan tulevaisuudessa pystyttävän käyttämään.



Lähde: IEA World Energy Outlook 2013

Kuva 1.9. Fossiilisten polttoaineiden riittävyysarviot vuosina nykyisellä kulutustasolla.

Lähinnä ehtymistä on öljy. Öljy vaikuttaa ennen kaikkea liikennepolttoaineena tavaroiden liikkuvuuteen ja matkustamiseen. Tosin viime vuosina öljyresursseja on löydetty huomattavia määriä lisää esimerkiksi Etelä-Amerikan öljyhiekkana. Hiili on fossiilista polttoaineista nykytietämyksellä riittoisin, mutta toisaalta myös saastuttavin.

Näiden tietojen tarkastelu osoittaa, että joskus vuoden 2050 tienoilla ja todennäköisesti aikaisemminkin on energiatalouden perustuttava monella tavoin eri lähtökohtiin kuin

tällä hetkellä. Itse asiassa ei monia tällä vuosikymmenellä rakennettavia pitkäikäisiä energiantuotantolaitoksia voida enää tulevaisuudessa korvata samoihin energialähteisiin perustuvilla uusilla laitoksilla, eikä niitä kaikkia voida ehkä edes käyttää teknillisen käyttöikänsä loppuun saakka.

Yhteenvetona edellä mainituista resurssiarviosta näemme, että jo meidän elinaikana energiantuotannon rungon on uudistuttava. Vain harvoilla energialähteillä näyttää olevan tulevaisuudessakaan mahdollisuuksia täyttää kaikki pitkäaikaisen keskeisen energialähteen perusvaatimukset: riittoisuus, soveltuvuus kaikenlaisiin käyttökohteisiin (välittömästi tai välillisesti) ja vähäiset ympäristöhaitat.

Suomen raakaenergian saannille globaalisten energiavarojen riittävyys ei aiheuta ongelmia lähimpien vuosikymmenien aikana, mutta primäärienergian hankinnan suuren tuontiriippuvuuden (lähes 70 %) johdosta energian saatavuus on periaatteessa altis kansainvälisten kriisitilanteiden aiheuttamille toimitushäiriöille. Energiahuollon toimintavarmuuden takaamiseksi omavaraisuusaste pyritään edelleenkin pitämään vähintään 30 %:ssa. Kotimaiset energialähteet muodostavat tärkeän varmuusreservin, joiden lisäkäytöllä voidaan myös korvata puutteellaisia tuontipolttoaineita häiriötilanteissa.

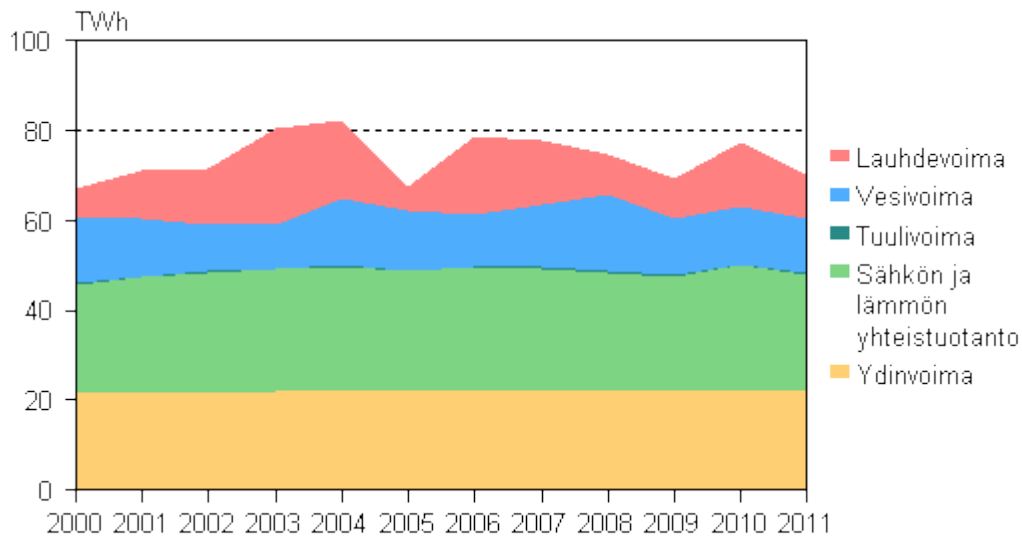
Suomen energiahuollon monipuolisuus sekä öljyn, kivihiiilen ja uraanipolttoaineen hankinnan hajautus useisiin lähteisiin parantaa energian saantivarmuutta. Kuitenkin maakaasun saannissa olemme nykyisin yksinomaan Venäjältä tulevan putken varassa. Kaasun toimitushäiriöihin on varauduttu varastoimalla kevyttä ja raskasta polttoöljyä. Muillekin tuontipolttoaineelle on määritelty velvoitevarastot, joita saadaan käyttää vakavissa saatavuushäiriötilanteissa kauppa- ja teollisuusministeriön luvalla. Kaasun käytön lisäämisen edellytys on useampaan hankintalähteeseen perustuvat toimitukset. Ydinpolttoaineen hinta ja määrä polttoaineen energiasisältöön verrattuna on alhainen, minkä johdosta sen varastointi on helppoa eikä sido suuria pääomia. Sen vuoksi ydinvoimalaitosten toiminta ei ole herkkä lyhyille häiriöille uraanin saatavuudessa.

## **1.3 Energiantuotanto**

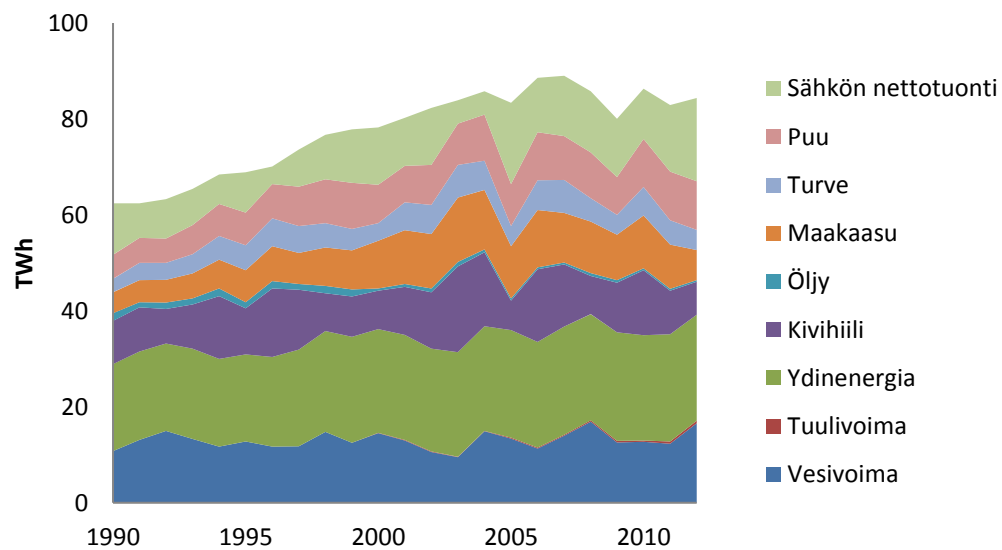
### **1.3.1 Yleistä**

Energian suuri taloudellinen merkitys on Suomessa johtanut energiataloudellisesti tehokkaan sähkön ja lämmön yhteistuotannon sekä ympäristönsuojelullisesti edullisen kaukolämmityksen kansainvälisesti poikkeuksellisen laajaan käyttöön sekä teollisuudessa että yhdyskunnassa. Kaikki merkittävimmät lämpökuormat ovat jo yhteistuotannon piirissä, mistä johtuen yhteistuotantoa voidaan laajentaa vain rajoitetusti uusiin kohteisiin. Monissa kohteissa odotetaan uuden tekniikan kuitenkin antavan tulevaisuudessa mahdollisuuksia sähkön osuuden huomattavaan kasvattamiseen.

Vuonna 2011 sähkön tuotannosta oli ydinvoimaa 26,5 %, sähkön ja lämmön yhteistuotantoa (CHP) 30,2 % vesivoimaa 14,6 %, lauhdusvoimaa 11,6 %, tuulivoimaa 0,6 % ja sähkön nettotuontia 16,5 %. Yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon osuus on maailman korkein. Kuvassa 1.10. esitetään sähkön tuotantomuotojen osuuksien kehittyminen viime vuosikymmenenä ja kuvassa 1.11 on sama kehitys esitetty energialähteittäin vuosina 1990-2012.



Kuva 1.10. Sähkön tuotanto tuotantomuodoittain 2000-2011 (Tilastokeskus).



Kuva 1.11. Sähkön hankinta energialähteittäin Suomessa 1990-2012. (Tilastokeskus)

Tuotannon rakenteessa tapahtuu muutoksia hyvin hitaasti. Niitä voi periaatteessa aiheuttaa uusien voimalaitosten käyttöönotto, vanhojen poisto käytöstä tai merkittävä tuonnin lisäys. Uutta kapasiteettia ei tule vuosittain, koska kyse on poikkeuksellisen suurista investoinneista. Käytännöllisesti katsoen vesivoiman lisärakentaminen on pysähtynyt, joten lisää vesivoimaa saadaan vain vanhojen laitosten koneistoja uusimalla tai rakentamalla jo luvan saaneita yksiköitä. Teollisuuden vastapainevoiman tuotantokapasiteetti on kasvanut varsin vähän, mutta tuotanto on siitä huolimatta lisääntynyt jopa keskimääräistä enemmän. Kaukolämpölaitoksia ei ole viime vuosina rakennettu, mutta siitä huolimatta laitosten sähköntuotanto on kasvanut varsin nopeasti. Ydinvoiman kapasiteetti on pysynyt lähes samana, vuosina 1997-1998 kapasiteetti kasvoi noin 350 MW uudistustöiden vuoksi. Kapasiteetti kasvaa huomattavasti (1600 MW) kun Olkiluoto 3 valmistuu. Tavanomaista lauhdutusvoimaa on kaiken aikaa rakennettu lisää. (Energia Suomessa)

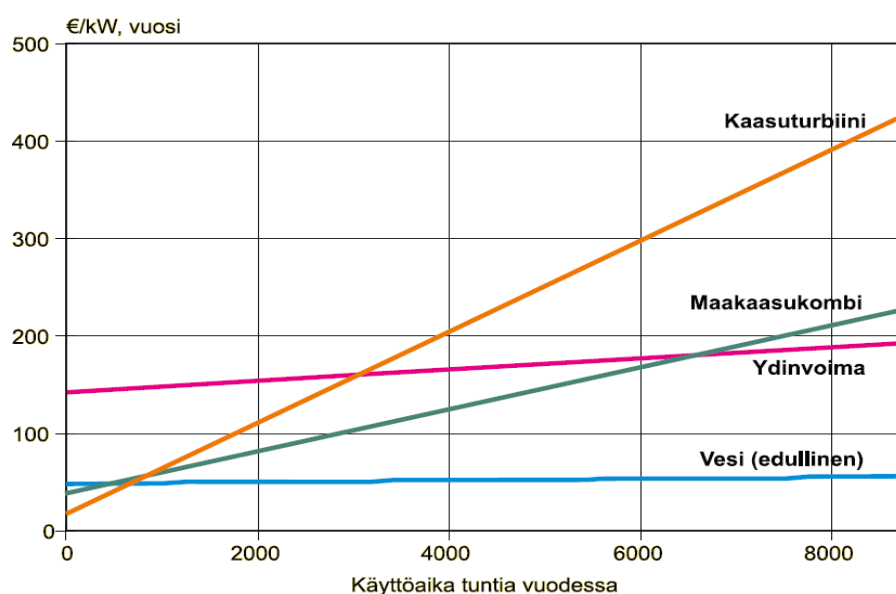
### 1.3.2 Energiantuotannon kustannukset

Energia-alalle on ominaista investointien suuruus ja pitkävaikutteisuus, joten kustannuslaskennassa korostuu pääomakustannusten käsittelyn merkitys. Kustannuksien käsittely edellyttää niiden jakamista eriluonteisiin kustannuksiin. Esimerkiksi kustannukset voidaan jakaa kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin. Kiinteillä kustannuksilla tarkoitetaan kustannuksia, joiden suuruus ei riipu tuotannon määrästä. Muuttuvat kustannukset puolestaan ovat likimäärin verrannolliset tuotannon määrään. Pääomakustannukset muodostavat suurimman osan energiantuotantolaitosten kiinteistä kustannuksista. Muut kiinteät kustannukset koostuvat pääosin kiinteistä käyttökuluista, joita ovat käyttöhenkilökunnan palkkakustannukset, vuosihuollot, vakuutukset, jne. Muuttuvat kustannukset syntyvät laitoksen varsinaisesta käytöstä energiantuotannossa. Suurin kuluera on yleensä polttoainekustannus, johon vaikuttavat laitoksen hyötysuhde ja polttoaineen hinta. Muita muuttuvia kustannuseriä ovat kaikki tuotantoon verrannolliset kunnossapidon kulut. (Energia Suomessa) Taulukossa 1.1. on esitetty erilaisten perusvoimalaitosten tyypillisiä ominaiskustannuksia.

Taulukko 1.1. Uusien perusvoimalaitosten tyypillisiä ominaiskustannuksia (Vakkilainen et al.).

yksikköteho [MW]	investointi [M€]	ominaisinvestointi [€/kW]	Kiint. Kust. [€/MWh]	polttoaine kust. [€/MWh]
1650	6250	3790	10,94	5,14
850	875	1030	7,37	51,11
500	870	1740	10,71	35,82
150	295	1970	10,49	25,5
150	310	2070	6,89	45
50	68	1360	8,85	0

Kuvassa 1.12 on esimerkkinä esitetty muutamien eri voimalaitostyyppien vuosikustannuksia. Pitkän huipun käyttöajan laitoksessa (eli jos tehoa tarvitaan esim. yli 6500 h vuodessa) kannattaa hyötysuhteiden hyväksi siten uhrata rahaa, jotta polttoainekustannukset saataisiin laskemaan. Jos huipunkäyttöaika on pieni, esim. alle 900 h vuodessa ei polttoainekustannuksilla ole niin suurta merkitystä. Järkevää on siis tällaisessa tapauksessa rakentaa pääomakustannuksiltaan edullinen, mutta käyttökustannuksiltaan kalliimpi laitos. Kuvasta huomataan, että lyhyellä huipunkäyttöajalla näin ollen edullisin tuotantovaihtoehto on kaasuturbiini. Kun tehoa tarvitaan yli 6500 h vuodessa on ydinvoima maakaasua edullisempi.



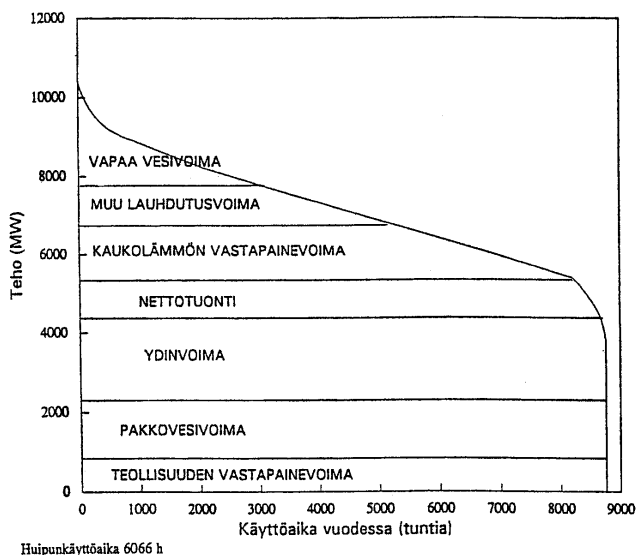
Kuva 1.12. Eri voimalaitostyyppien tyypillisiä vuosikustannuksia vuoden 2000 hintatasossa huipunkäyttöajan funktiona. Vesivoima ei vastaa Suomen olosuhteita, vaan edullista korkeaan putouk korkeuteen perustuvaa voimalaa (Energia Suomessa, 2004).

Energiantarve vaihtelee mm. vuodenajan, viikonpäivän ja kellonajan mukaan. Tästä johtuen kaikkia tuotantolaitoksia ei voida käyttää jatkuvasti, vaan niiden käyttöasteiden on pakko vaihdella. Koska pääomavalttaisten laitosten tuottaman energian kustannus riippuu voimakkaasti käyttöasteesta, on yleensä edullista rakentaa tällaisia laitoksia kattamaan läpi vuoden jatkuva perustuotanto, sähkön osalta ns. pohjakuormasähkö. Näitä laitoksia täydentämään tarvitaan keskikuormalaitoksia, joiden kustannukset ovat suhteellisen edullisia 3000 – 5000 tunnin käyttöajoilla, sekä huippuvoimalaitoksia tyydyttämään kuormitushuiput.



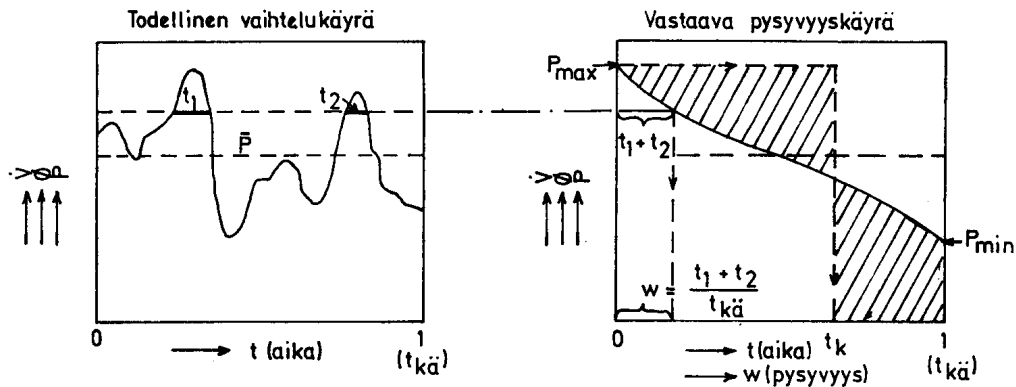
Kuvassa 1.12 on kunkin tuotantotavan osuus kuvattu pysyvyyskäyrän avulla. Tuotannon koostumus määräytyy ns. ajojärjestyksen mukaan siten, että ensimmäiseksi varmistuu sellaisen kapasiteetin käyttö, joka ei juurikaan lisää kustannuksia. Tällaista on säännöstelemätön vesivoima sekä tuulivoima tuulisuuden mukaan. Muut tuotantomuodot tulevat pääsääntöisesti mukaan alkaen muuttuvilta kustannuksiltaan edullisimmista, eli pohjakuormalaitoksista huippuvoimalaitoksiin. Järjestys on täten ydinvoima, yhteistuotannon sähköntuotanto, lauhdutusvoima polttoainekustannusten mukaisessa järjestyksessä ja viimeisenä kaasuturbiinit ja säännösteltävä vesivoima. (Energia Suomessa)

Pysyvyyskäyrällä ilmaistaan siis kuinka paljon mitäkin käyttöaika esiintyy. Käyrä ilmaisee kuinka monen tunnin ajan vuoden kuluessa kysyntä on ollut vähintään tietyn suuruinen. Kuvan 1.13 pysyvyyskäyrässä esimerkiksi 5000 tunnin aikaa vastaava teho on n. 6800 MW. Se ilmaisee, että teho oli 5000 tunnin aikana yli 6800 MW ja sitä pienempi loppujen 3760 tunnin aikana (vuodessa tunteja yht. 8760). Pysyvyyskäyrän muodostuminen todellisesta sähkönkulutuksen vaihtelukäyrästä ilmenee kuvassa 1.13.



Kuva 1.13. Suomen sähkönhankinnan pysyvyyskäyrä 1992. (Vuosienergia 62,9 TWh, huipputeho 10370 MW.)

Huipun käyttöaika puolestaan tarkoittaa sitä ajanjaksoa, jonka kuluessa pysyvyyskäyrän tarkasteluajanjakson kokonaisenergiämäärä saadaan tuotettua toimittaessa huipputeholla.



Kuva 1.14. Pysyvyyskäyrän muodostaminen.

Olellisinta sähköntarpeen vaihteluiden yhteydessä on ymmärtää, että valtaosa energian kysynnästä muodostuu läpi vuoden jatkuvasta kuormasta, mutta toisinaan tarvitaan runsaasti lisätehoa paljon lyhytkestoisemman energiatarpeen tyydyttämiseen.

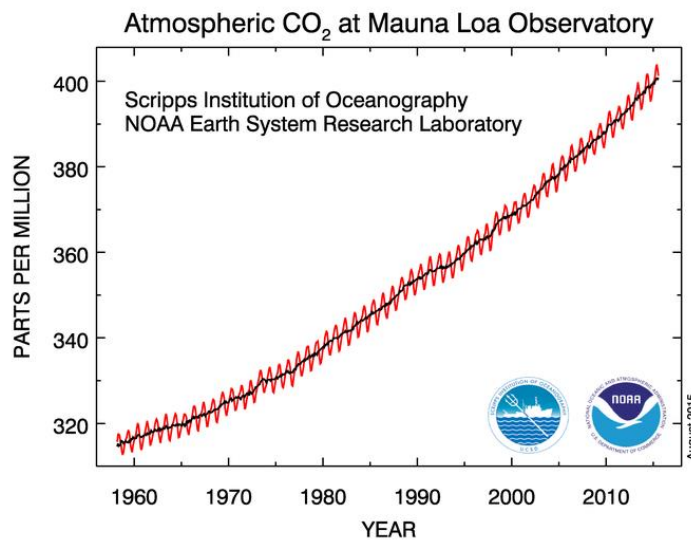
## 1.4 Energia ja ympäristö

Energian tuotannon merkittävimmät vaikutukset ympäristöön aiheutuvat nykyisen käsityksen mukaan ilmaan tapahtuvista päästöistä. Energian tuotannon paikallisen mittakaavan ympäristövaikutukset on pääosin jo saatu rajoitettua alhaiselle tasolle. Poikkeuksena on lähinnä liikenne, jolla on merkittävä vaikutus suurten kaupunkien ilman laatuun. Myös alueellisen mittakaavan ympäristövaikutuksia, lähinnä happamoitumista, on jo rajoitettu merkittävästi sekä Euroopassa että Pohjois-Amerikassa. Maailman mittakaavassa tapahtuvan kasvihuoneilmiön rajoittaminen on se sijaan vasta aivan alullaan. Kasvihuoneilmiön hallinta tulee muuttamaan maailman energijärjestelmää hyvin paljon.

### 1.4.1 Kasvihuonekaasujen päästöt

Tärkeimmät ilmakehässä luonnostaan esiintyvät kasvihuonekaasut ovat vesihöyry ( $\text{H}_2\text{O}$ ), hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ), metaani ( $\text{CH}_4$ ), dityppioksidi ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ja otsoni ( $\text{O}_3$ ). Ilmakehän valta- ja apukaasut typpi ja happi eivät aiheuta kasvihuoneilmiötä. Kasvihuonekaasuilla molekyylin rakenne on sellainen, että ne kykenevät imemään lämpösäteilyä tietyillä aallonpituuksilla. Kasvihuonekaasumolekyylit pystyvät muuttamaan saamansa energian uudelleen säteilyksi, jolloin osa säteilyn energiasta palaa takaisin maan pintaa lämmittämään ja osa karkaa avaruuteen. Ilmakehän alimmissa kerroksissa voimakkain kasvihuonekaasu on vesihöyry, joka yksinään selittää luonnollisen kasvihuoneilmiön aiheuttamasta maapallon lämmityksestä yli puolet. Hyvänä kakkosena seuraa hiilidioksidi.

Vesihöyryn määrään ilmakehässä ihmisen toiminta ei suoraan juuri vaikuta, vaan vaikutus aiheutuu epäsuorasti muiden kasvihuonekaasujen pitoisuuden vaikutuksen kautta. Hiilidioksidin pitoisuus on noussut teollistumista edeltävän ajan suunnilleen 280 ppm:stä (ppm = tilavuuden miljoonasosa) jo noin 390 ppm:ään. Nousua on siis lähes 40 %. Hiilidioksidipitoisuuden kasvu jatkuu edelleen koko ajan, keskimäärin noin 2 ppm:n verran vuodessa. Kuvassa 1.15 on esitetty Havaijilla sijaitsevan Mauna Loan mittausasemalla mitatut hiilidioksidipitoisuudet 1960-luvulta alkaen. Nykytietämyksen mukaan nousu johtuu ihmisen toiminnasta.



Kuva 1.15 Hiilidioksidipitoisuuden kehitys 1960-2010-luvuilla  
[http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo\\_full](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo_full)

Metaani on ihmisen tuottamista kasvihuonekaasuista hiilidioksidin jälkeen toiseksi suurin ilmakehän lämmittäjä. Metaania syntyy siellä, missä eloperäistä ainesta hajoaa hapettomissa oloissa: riisipelloilla, märehtijöitten (mm. lehmien) suolistossa ja kaatopaikoilla sekä luonnossa kosteikoilla, soilla ja vesistöjen pohjakerroksissa. Suuruusluokkaa 2/3 metaanin päästöistä on ihmiskunnan aikaansaannosta ja loput 1/3 luonnollista perua, joskin arviot vaihtelevat melko paljon tutkimuksesta toiseen. Maakaasu koostuu valtaosaltaan metaanista, joten metaania karkaa ilmakehään kaasuputkien vuotaessa. Myös hiilikaivoksista vapautuu metaania. Lisäksi metaania muodostuu puuta poltettaessa, varsinkin jos puu on märkää ja sitä poltetaan kituliaalla ja savuttavalla liekillä.

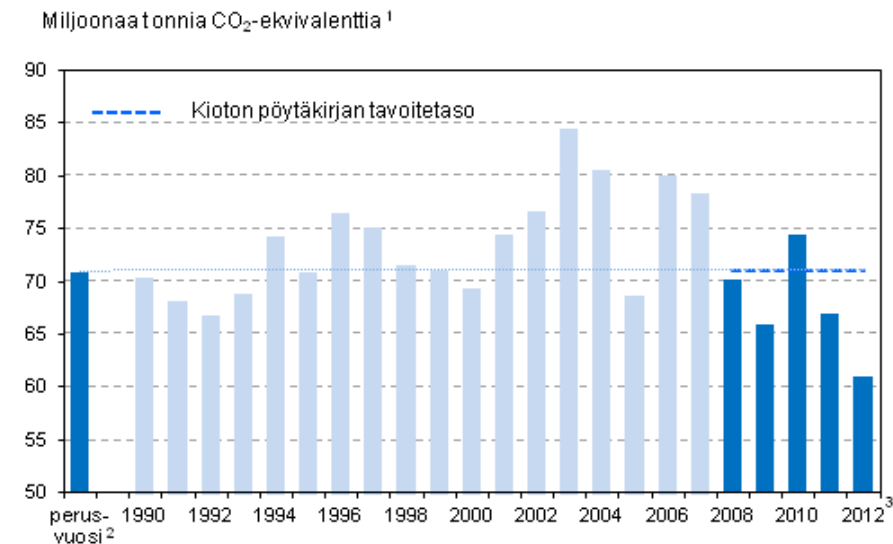
Ilmakehässä metaani hajoaa auringonvalosta energiansa saavissa kemiallisissa reaktioissa vedeksi ja hiilidioksidiksi. Reaktio käy monen välivaiheen kautta. Hiilidioksidipäästöjen vaikutusaikaan verrattuna metaanin elinikä ilmakehässä on suhteellisen lyhyt, noin 12 vuotta.

Valtaosa ilmakehän otsonista sijaitsee varsin korkealla keski-ilmakehässä, stratosfäärissä. Siellä otsonin määrä on vähentynyt lähinnä halogenoitujen hiilivetyjen, erityisesti freonien, aiheuttaman otsonikadon seurauksena. Tämä on vaikuttanut aavistuksen verran kasvihuoneilmiötä heikentävästi eli ilmasto viilentävästi. Otsonikato on ollut erityisen voimakasta Etelämantereella keväisin. Alailmakehässä eli troposfäärissä otsonia syntyy, kun mm. autojen pakokaasujen typen oksidit, hiilimonoksidi ja hiilivedyt reagoivat auringon valossa ilman hapen kanssa. Otsonia syntyy myös luonnonkasveista peräisin olevien hiilivetyjen reaktioissa ja metaanin hapettuessa. Otsoni on kaasuna lyhytikäinen, joten sen pitoisuudet ilmakehässä vaihtelevat suuresti paikasta toiseen.

Dityppioksidia eli typpioksiduulia tai ilokaasua (N<sub>2</sub>O) muodostuu maaperässä nitraattien (mm. typpilannoitteiden) hajotessa. Ihmiskunnan toimet, erityisesti maatalouden harjoittaminen, tuottavat runsaan kolmasosan kaikista dityppioksidin päästöistä. Loput 2/3 dityppioksidista on peräisin luonnosta, lähinnä maaperän ja merien mikrobitoiminnan seurauksena. Dityppioksidimolekyylit hajoavat ilmakehässä auringon korkeaan energian ultravioletisäteilyn vaikutuksesta. Tämä hajoamisreaktio on mahdollinen ainoastaan ilmakehän ylemmissä kerroksissa. Siksi dityppioksidin elinikä ilmakehässä, n. 110 vuotta, on paljon pitempi kuin esimerkiksi metaanin.

CFC- yhdisteillä tarkoitetaan kloorifluorihiihivetyjä. Ne aiheuttavat lähes kokonaan loput kasvihuoneilmästä. Niitä on käytetty aerosolien ponnekaasuina, jäähditysaineina, vaahtomuovien tuotannossa, kuivapesussa, rasvanpoistossa ja laboratorioanalyysissä. Vuoden 1995 alusta lähtien CFC-yhdisteitä on voitu käyttää vain laboratorioanalyysiin ja lääketieteellisiin tuotteisiin (astmasuihkeisiin). Olemassa olevia CFC-yhdisteitä sisältäviä jäähdityslaitteita saa yhä käyttää, mutta niiden huoltoon saa käyttää vain kierätettyjä CFC-yhdisteitä.

Energiantuotannon osuus ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvusta on vajaat 50 %. Liikenne ja metsien tuhoaminen aiheuttavat kumpikin noin 25 % kasvusta. Suomen kasvihuonekaasupäästöt vuonna 2012 olivat noin 61,4 miljoonaa tonnia CO<sub>2</sub>-ekvivalenttina. Tämä alittaa Kioton pöytäkirjan tavoitetason 14 %:lla. Kuvassa 1.16 on esitetty Suomen kasvihuonekaasupäästöjen kehitys vuosina 1990 – 2012.

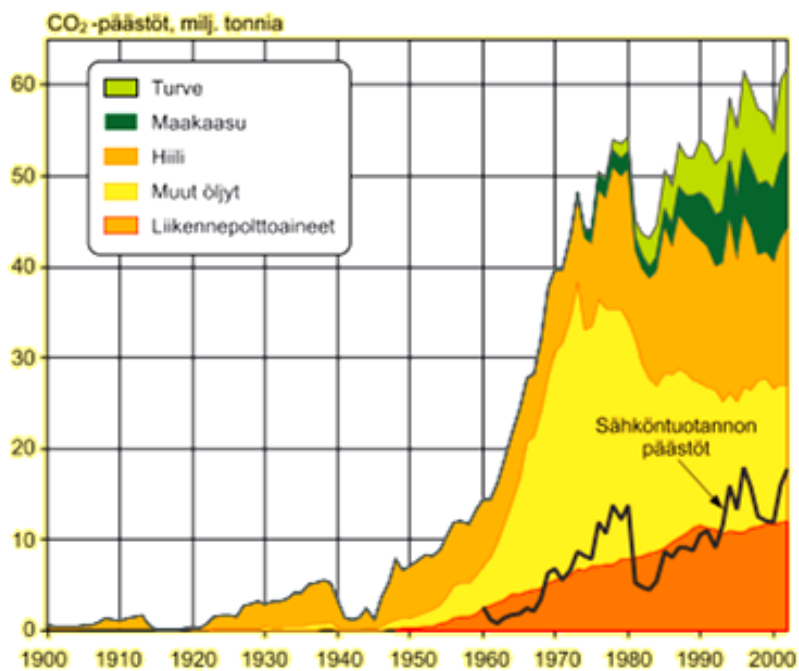


<sup>1</sup> CO<sub>2</sub>-ekvivalentti yhteismitallistaa eri kaasujen lämmitysvaikutuksen, esim. 1 t N<sub>2</sub>O vastaa 310 t CO<sub>2</sub>

<sup>2</sup> Suomen Kiotoon pöytäkirjan perusvuosi on 1990, paitsi F-kaasujen (HFC, PFC ja SF<sub>6</sub>) osalta 1995. Suomen sallittu päästömäärä (=tavoitetaso) Kiotoon pöytäkirjan velvoitekaudelle 2008 - 2012 perustuu tarkastettuun sallittuun päästömäärän raportointiin

<sup>3</sup> Ennakkotieto

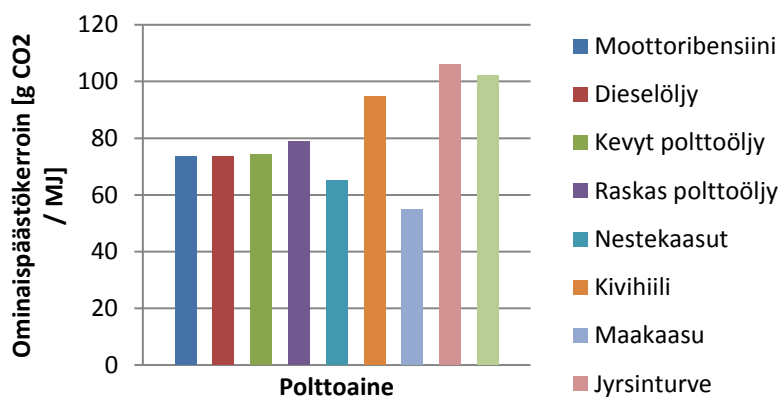
Kuva 1.12. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990-2012 (Tilastokeskus)



Kuva 1.13. Hiilidioksidipäästöt polttoaineittain sekä sähköntuotannon osuus kokonaipäästöistä. (Energia Suomessa, 2004)

Kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC) arvion mukaan kasvihuonekaasujen pitoisuuden kaksinkertaistuminen ilmakehässä aiheuttaa maapallon keskilämpötilassa 1,5 - 4,5 °C kasvun. Nykyisen kasvihuonekaasujen pitoisuuden kasvunopeuden mukaan pitoisuus tulee kaksinkertaistumaan vuoteen 2030 mennessä, mikäli päästöjä ei ruveta alentamaan. Kasvihuoneilmion seurauksena on arvioitu ilmaston lämpenemisen nostavan keskilämpötilaa eniten kylmillä alueilla talviaikana. Mallilaskelmien perusteella on arvioitu hiilidioksidipitoisuuden kaksinkertaistumisen nostavan Suomessa talviajan keskilämpötilaa 8 - 14 °C. Kesällä nousu jäisi pariin asteeseen. Vuotuisten sademäärien ennustetaan tällöin kasvavan meillä 10 - 20 %. Ilmastomuutokset vaikuttavat Suomen energiatalouteen nousevan keskilämpötilan aiheuttamana pienentyvänä lämmitysenergiatarpeena ja lisääntyneistä sateista aiheutuvana lisääntyvänä vesivoiman saantina. Kasvihuoneilmiö aiheuttaa todennäköisesti muutoksia Suomen metsien kasvuun, puulajien kasvualueisiin, tuholaiskantaan sekä puuvarantoon.

Kasvihuoneilmiön etenemistä voidaan Suomessa hidastaa lyhyellä aikavälillä käyttämällä vähemmän hiilidioksidipäästöjä aiheuttavia polttoaineita, kuten maakaasua tai biomassapolttoaineita. Lisäksi päästö pienenee nostamalla energiantuotantoprosessien hyötysuhdetta ja säästämällä energiaa. Täysin hiilidioksidipäästöjä aiheuttamattomia energiantuotantomuotoja ovat meillä vesi- ja ydinvoima. Kuvassa 1.18. on esitelty fossiilisten polttoaineiden aiheuttamat hiilidioksidipäästöt.



Kuva 1.14. Fossiilisten polttoaineiden ominaishiilidioksidipäästöjä.

## 1.4.2 Happamoittavien kaasujen päästöt

Happamoitumisella tarkoitetaan ympäristön, kuten vesistön tai metsämaan, pH:n pysyvää alenemista. Energian tuotanto, teollisuus ja liikenne tuottavat happamoittavia rikkioksidia (SO<sub>2</sub>) ja typenoksidia (NO<sub>x</sub>) päästöjä. Samoin pääosin maataloudesta peräisin olevilla ammoniakkipäästöillä (NH<sub>3</sub>) on happamoittava vaikutus. Ilmakehässä päästöt

muuntuvat suurelta osalta sulfaatti-, nitraatti- ja ammonium-muotoon. Laskeuma tapahtuu joko märkänä laskeumana sateen mukana tai kuivana laskeumana, eli hiukkasten tarttuessa kasvillisuuteen tai maahan. Ekosysteemeille on arvioitu ns. kriittinen kuormitus, eli sellainen laskeuman arvo, jota pienemmillä arvoilla pitkällä aikavälillä ei aiheudu merkittäviä haitallisia vaikutuksia.

Rikkioksidipäästöjen rikki on peräisin polttoaineen sisältämästä rikistä ja teollisuuden päästöjen tapauksessa raaka-aineiden tai prosessikemikaalien sisältämästä rikistä. Tärkeimmät rikkidioksidipäästöjä aiheuttavat polttoaineet ovat kivihiili, raskas polttoöljy ja turve. Suurin osa rikistä on savukaasuissa ja pieni osa jää poltossa syntyvään tuhkaan. Rikkidioksidipäästöjä voidaan vähentää sekä teknisin keinoin että rakenteellisin muutoksien lisäämällä sellaisen tuotannon osuutta, josta ei aiheudu lainkaan tai vain vähän rikkipäästöjä. Teknisillä keinoilla rikkidioksidipäästöjä voidaan vähentää alentamalla polttoaineiden rikkipitoisuutta sekä sitomalla rikkiä polttoprosessin aikana tai polton jälkeen savukaasujen puhdistuksessa. Käytetyimpiä menetelmiä ovat kalkin syöttö polttoprosessiin sekä erilliset savukaasujen puhdistukseen tarkoitetut rikinpoistolaitokset. Ns. märkämenetelmää käyttävät rikinpoistolaitokset tuottavat melko puhdasta kipsiä, jota hyödynnetään rakennuslevyteollisuudessa korvaamassa luonnonkipsiä. Suomen rikkidioksidipäästöt ovat vähentyneet huomattavasti 1980-luvulta lähtien. Suomi on sitoutunut kansainvälisesti vähentämään rikkipäästöjään. Typenoksidipäästöjen tyyppi on polttoaineen sisältämää typpeä ja ilman typpeä, joka hapettuu polttoprosessissa. Typen oksidien muodostuminen riippuu vain osittain käytetystä polttoaineesta. Ennen kaikkea typpipäästöt riippuvat käytettävästä polttotekniikasta. Merkittävimmät päästölähteet ovat hiili-, turve ja sekapolttokattilat. Typpioksideista suurin osa on kuitenkin peräisin liikenteestä. Typenoksidien vähentäminen on vaikeampaa kuin rikkipäästöjen. Kivihiili-, turve- ja puupolttolainetta käyttävissä kattiloissa syntyvien typenoksidien määrää on pienennetty pääasiassa polttoteknisin keinoin, esimerkiksi vaiheistamalla polttoaineen tai polttoilman syöttöä kattilaan sekä kierrättämällä savukaasuja takaisin kattilaan. Typen oksidien pitoisuuksia voidaan vähentää myös SCR-menetelmällä (Selective Catalytic Reduction). SCR-menetelmä sisältää katalysaattorin, johon ruiskutetaan ammoniakkaa. Ammoniakki reagoi typen oksidien kanssa katalysaattorin pinnalla, jolloin syntyy alkuainetyppä ja vettä. Katalyytti on yhdiste, joka nopeuttaa reaktiota, mutta ei kulu reaktiossa. SCR-menetelmällä pystytään poistamaan yli 80 % savukaasujen sisältämistä typen oksideista.

Suomelle on tärkeää vaikuttaa päästöjen vähenemiseen erityisesti lähialueilla ja muualla Euroopassa, koska päästöjen kaukokulkeumalla on eniten merkitystä Suomen happamoittavaan laskeumaan.

### 1.4.3 Muut päästöt

Muista energiantuotannon päästöistä merkittävin on ilmaan savukaasujen mukana kulkeutuva hiukaspäästö, joka on lähes pelkästään polttoaineen tuhkaa. Palamattoman polttoaineen mukana voi olla voimakkaasti karsinogeenisiä ja mutageenisia hiilivetyjä kiinnittyneenä hiilihiukkasiin. Suurvoimaloissa hiukaspäästöjen talteenotto tapahtuu tyypillisesti sähkösuotimella erotusasteen ollessa yleensä yli 99,5 %. Haitallisimpia komponentteja voimalaitosten lentotuhkassa ovat raskasmetallit, sillä ne rikastuvat pääasiassa lentotuhkan pienimpiin komponentteihin, jotka puolestaan erottuvat huonoimmin savukaasun puhdistimissa.

Kiinteitä fossiilisia polttoaineita käyttävien voimalaitosten tuottamaa tuhkaa käytetään meillä maanrakennukseen tai teollisuuden raaka-aineeksi. Noin puolet tuhkasta kuitenkin sijoitetaan kaatopaikoille. Rikinpoistosta syntyvää lopputuotetta voidaan käyttää rakennusteollisuuden levyjen raaka-aineena. Osa rikinpoistomenetelmistä tuottaa kuitenkin hyötykäyttöön kelpaamatonta kaatopaikkajätettä.

Lauhdutusvoimalaitokset aiheuttavat vesistöihin merkittävän hukkalämpöpäästön. Sen vaikutukset jäävät kuitenkin pieniksi ja varsin paikallisiksi. Suurin toistaiseksi havaittu haitta lauhdutusvesistä aiheutuu paikallisiin jääolosuhteisiin. Lämmenneen veden on havaittu myös hieman kohottavan vesistön hapen kulutusta.

Viime vuosina on keskusteltu myös häkä- ja hiilivetypäästöjen ympäristövaikutuksista. Palamattomia hiilivetypäästöjä syntyy erityisesti pienimittakaavaisessa kiinteän polttoaineen poltossa. Palamattomien polton päästöjen määrän on havaittu usein lisääntyvän siirryttäessä käyttämään polttoteknisiä typpioksidien vähentämismenetelmiä. Tunnetuimmat erittäin haitalliset polton hiilivetypäästöt ovat polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH). Ne tiedetään hyvin mutageenisiksi ja karsinogeenisiksi yhdisteiksi. Hiilivedyt aiheuttavat yhdessä typen oksidien kanssa myös troposfäärin otsonipitoisuuden kasvua.

Energiantuotannon radioaktiiviset päästöt ovat normaalitoiminnassa häviävän pienet verrattuna luonnon normaaliin taustasäteilyyn. Suomessa ihmisten keskimääräinen taustasäteilystä saama vuotuinen säteilyannos on noin 2 mSv. Suomessa ydinvoimalaitosten lupaehtojen mukainen sallittu päästöraja ei saa aiheuttaa ympäristön asukkaille suurempaa vuosiannosta kuin 0,1 mSv. Käytännössä esiintyneet suurimmat ydinvoimalaitosten ympäristön asukkaiden voimalaitoksesta saamat vuotuisannokset ovat olleet alle 0,005 mSv.



#### 1.4.4 Kansainväliset tavoitteet ja sopimukset

Suomi on sitoutunut kehittyneiden maiden tapaan monin kansainvälisin sopimuksin alentamaan energiantuotannosta ilmaan joutuvia päästöjään yhdessä sovittujen aikataulujen mukaisesti. Ilmansaasteiden on havaittu olevan myötävaikuttamassa tai aiheuttavan mm. maaperän happamoitumista ja myrkyttymistä, kasvihuoneilmiötä, ilmakehän tropos- ja stratosfäärin otsonihäiriöitä, metsä- ja kasvistovaurioita, terveyshaittoja, ympäristön likaantumista, rakenteiden korroosiota ja tuhoutumista jne. Ilmansaasteiden nopean leviämisen ja kaukokulkeutumisen takia niiden vähentämisessä keskeinen rooli on kansainvälisellä yhteistyöllä ja sopimuksilla. Aikaisemmin energiapoliittisessa päätöksenteossa keskeisimmät tekijät olivat kustannukset sekä energihuollon varmuus. Nykyisin näiden rinnalle ovat nousseet yhtä tärkeänä myös energiantuotannon ympäristövaikutukset. Rikki- ja typpioksidipäästöjen vaikutukset tuntuvat merkittävimmin päästökohteen lähialueilla, joten päästöjen vähentämisessä kansainvälinen yhteistyö kannattaa suunnata naapurimaihin. Sen sijaan kasvihuonekaasut leviävät tasaisesti koko maapallon ilmakehään, joten niiden osalta yhteistyötä pitää tehdä maailmanlaajuisesti.

Merkittävimmän kasvihuoneilmiötä edistävän kaasun hiilidioksidin osalta vahvistettiin kesällä 1992 Rio de Janeiron ympäristökokouksessa, että päästöt olisi jäädettävä vuoteen 2000 mennessä vuoden 1990 tasolle. Pitkän aikavälin tavoitteena pidetään hiilidioksidipäästöjen alentamista vuoteen 2025 mennessä 20 % vuoden 1990 tasosta. Rio de Janeiron ilmasopimus kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämiseksi sai Kioton osapuolikokouksen pöytäkirjassa kesäkuussa 1997 konkreettiset tavoitteet. Vain teollisuusmaille määrättiin päästöjen vähentämisen tavoitteita. Eri maille ne ovat erilaisia, keskimäärin ne merkitsevät 5,2 prosentin vähennystä velvoitekauteen 2008-2012 mennessä verrattuna vuoden 1990 tasoon. Kehitysmaille ei vielä määrätty tavoitteita, mutta kehitysmaat osallistuvat aktiivisesti jatkoneuvotteluihin. EU-maat ottivat tavoitteekseen vähentää keskimäärin 8 prosenttia vuoden 1990 määrästä. EU:n eräänä käytännön toimenpiteenä alentaa kasvihuonekaasupäästöjä on vuonna 2005 aloitettu päästökauppa, joka hinnoittelee kasvihuonekaasupäästön. Menettely muuttaa nopeasti eri polttoaineiden hintasuhteita.

Vuonna 1985 Helsingissä allekirjoitetussa sopimuksessa 21 YK:n Euroopan talousjärjestön maata lupautui alentamaan rikkipäästöjään 30 % vuoteen 1993 mennessä vuoden 1980 tasosta. Suomi kuitenkin asetti omaksi alentamistavoitteekseen eräiden muiden maiden tapaan 50 %. Vuonna 1991 valtioneuvosto teki periaatepäätöksen alentaa edelleen rikkipäästöjä vuoteen 2000 mennessä yhteensä 80 % vuoden 1980 tasosta. Sofiassa 1988 allekirjoitetussa sopimuksessa 25 maata sitoutui jäädettämään typpioksidipäästönsä vuoden 1987 tasolle vuoteen 1995 mennessä. Samassa yhteydessä Suomi eräiden muiden maiden kanssa allekirjoitti julistuksen typpioksidipäästöjen alentamisesta 30 %

vuoteen 1998 mennessä 1980-luvun alkupuolen tasosta. Vuonna 2008 EU asetti Suomelle seuraavat velvoitteet:

- vuoteen 2020 mennessä on uusiutuvan energian osuuden oltava 38 %
- liikennepolttoaineista on tällöin 10 % tuotettava uusiutuvasta energiasta
- liikenteen, asumisen, rakentamisen ja maatalouden on alennettava päästöjä 16 % vuoteen 2020 mennessä

Ydinenergian käytön osalta Suomi on solminut lukuisia kansainvälisiä sopimuksia, jotka koskevat mm. ydinaseiden leviämisen estämistä, Kansainvälisen Atomienergiajärjestön valvontaa, ydinonnettomuuden pikaista ilmoittamista sekä ydinvoimalaitosten vahingonkorvausvastuuta. Ympäristövaikutusten arviointimenettelyä (YVA) koskeva laki velvoittaa tehtäväksi merkittävistä energiahankkeista ympäristövaikutusten arvioinnin.

## 1.5 Tulevaisuuden näkymiä

### 1.5.1 Suomi suhteessa kansainväliseen energiasektoriin

Energiantarve riippuu ensisijaisesti kansantalouden määrällisestä ja rakenteellisesta kehityksestä, sillä sitä kautta määräytyvät volyymit kaikille energiaa käyttäville toiminnoille. Energiaennusteen lähtötietoina tarvitaan lisäksi ominaisenergiakulutusten vastainen kehitys sekä arvio kuluttajien valinnoista vaihtoehtoisten käyttöenergiamuotojen välillä, kuten esimerkiksi sähkön polttoaineita korvaavasta käytöstä. Myös energian hinnalla on vaikutusta energian kysyntään. Energiantarpeen muutokset ovat hidashiikkisiä, koska energian käyttökohteet ovat pääosin pitkäikäisiä ja investointivaltaisia rakennuksia, teollisuuslaitoksia, koneita ja laitteita. Niinpä talouselämän yllätykselliset hetkelliset muutokset eivät aiheuta vastaavan suuruista energiankulutuksen muutosta. Kansantalouden toiminnan nykytila energiantarpeineen sekä lähihistorian kehitystrendit muodostavat peruslähtökohdan energian kysyntäennusteelle.

Suomen pitkän aikavälin tavoitteena on hiilineutraali yhteiskunta. Tämä on erityinen haaste energia-alalle, sillä Suomen kasvihuonekaasupäästöistä noin 80 % syntyy energian tuotannosta ja kulutuksesta, kun siihen lasketaan mukaan liikenteen käyttämä energia.

Kasvihuonekaasupäästöjen pienentämisestä aiheutuisi Suomelle kustannuksia, mikäli kattavaa ilmastopöytäkirjasta ei saada aikaiseksi. Suomen teollisuuden tuotantorakenteen vuoksi kasvihuonekaasujen pienentämisestä aiheutuvat kustannukset kansantaloudelle saattaisivat olla mittavat, varsinkin jos päästöjen vähentämisen kannalta keskeisimmät

teknologiat eivät edisty toivotulla tavalla ja tärkeimmät EU:n ulkopuoliset kilpailijamaat eivät samassa määrin sitoudu kasvihuonekaasujen vähentämiseen. Päästövähennystavoitteen kustannukset syntyisivät lähinnä energian tuotannon, käytettyjen raaka-aineiden ja liikenteen kustannusten noususta.

Eri maiden välillä epätasapuolinen kustannusten nousu aiheuttaisi hiilivuodon riskin, joka toteutuessaan tarkoittaisi tuotannon siirtymistä edullisemman kustannustason maihin. Kustannusten nousulla sekä investointien ja tuotannon vähenemisellä olisi negatiivisia vaikutuksia Suomen teollisuudelle ja kansantaloudelle kokonaisuudessaan.

Jos kattava kansainvälinen ilmastopimus saadaan sovittua, niin kustannukset Suomelle jäisivät huomattavasti pienemmiksi. Positiivisena puolena tiukoista ilmastotavoitteista voi mainita uuden teknologian (cleantech) kehittymisen ja sen vientimahdollisuuksien paranemisen, energiansäästön, energian tuontiriippuvuuden vähenemisen, vaikutukset ilmanlaatuun sekä ilmastomuutoksen hidastumisesta seuraavat positiiviset vaikutukset.

Suomi on erittäin riippuvainen energiasta ja sen kulutus henkeä kohti on korkea. Korkea energiankulutus johtuu muun muassa korkeasta elintasosta, kylmästä ilmastosta, suuresta valaistustarpeesta, energiaintensiivisen teollisuuden merkittävästä osuudesta kansantaloudessa ja pitkistä etäisyyksistä. Energian suuresta merkityksestä johtuen sen tehokkaaseen käyttöön on Suomessa perinteisesti kiinnitetty paljon huomiota. Olemme energiatehokkuudessa ja energiateknologian kehittämisessä monella alalla maailman kärkimaiden joukossa. Kansantaloudellisesti on merkittävää, että Suomen energiaomavaraisuus on matala, koska esimerkiksi kaikki perinteiset fossiiliset polttoaineet tuodaan maahan.

Suomen ja EU:n energiapolitiikalla on kolme kärkeä: toimitusvarmuudesta huolehtiminen kaikissa olosuhteissa, yhteiskunnan kilpailukyvyyn tukeminen ja ympäristön ja ilmaston vaaliminen.

Liuskekaasun nopeasti kasvanut tuotanto Yhdysvalloissa on muutamassa vuodessa muuttanut globaaleja energiamarkkinoita. Liuskekaasu on halpuutensa takia korvannut kivihiihtä energiantuotannossa, ja siksi Yhdysvallat on pystynyt samaan aikaan alentamaan sekä energian hintaa että päästöjä. Toisaalta Yhdysvallat on myös parantanut energiatehokkuutta ja investoinut uusiutuvaan energiaan. Kivihiihtä alentunut hinta on puolestaan lisännyt sen käyttöä Euroopassa, varsinkin kun päästöoikeuden hinta on ollut alhainen. Myös epätavanomaisen öljyn ja maakaasun sivutuotteena saatavien neste-kaasujen tuotanto kasvaa nopeasti.

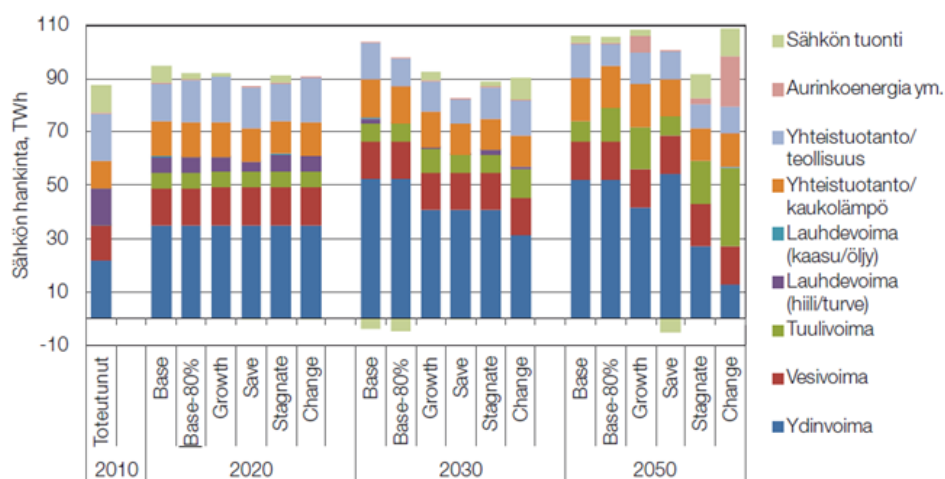
Kansainvälinen energiajärjestö IEA arvioi, että öljyn tuotantohuippu ei tule vastaan 2035 mennessä (joskin perinteisen öljyn tuotantohuippu saavutettiin ilmeisesti viime vuosikymmenen lopulla). Keskustelu siitä, onko energiapolitiikan perustana yleisesti

oleva ajatusmalli fossiilisten polttoaineiden jatkuvasta kallistumisesta oikea, on jo alkanut. Arvioidaan, että lähivuosikymmeninä ne säilyttävät kilpailukykynsä, mutta alueelliset ja polttoainekohtaiset erot ovat suuria. Perusskenaariossa IEA arvioi fossiilisten polttoaineiden kulutuksen nousevan 24 % vuosien 2011 ja 2035 välillä. Niiden osuus maailman kokonaisenergiasta kuitenkin laskee 82 %:sta 76 %:iin. (Työ- ja Elinekeino-ministeriö)

Seuraavassa skenaariotarkastelussa käytetään keskeisenä taustamateriaalina Low Carbon Finland 2050 platform -tutkimushanketta (myöhemmin Low Carbon Finland -hanke), jonka valmistelusta vastasivat Teknologian tutkimuskeskus VTT, Geologian tutkimuskeskus, Metsäntutkimuslaitos ja Valtion taloudellinen tutkimuskeskus. Hankkeessa tuotettiin skenaarioita vaihtoehtoisista kehityspoluista vähähiiliselle yhteiskunnalle vuoteen 2050 asti. Low Carbon Finland -hankkeessa muodostettiin neljä vaihtoehtoista vähähiiliskenaariota:

1. Jatkuva kasvu
2. Pysähdys
3. Säästö
4. Muutos.

Kuvassa 1.19 on esitetty Suomen sähkönhankinnan rakenne Low Carbon Finland -skenaarioissa, TWh.



Kuva 1.15. Suomen sähkönhankinnan rakenne Low Carbon Finland -skenaarioissa, TWh.

Tarkastellut skenaariot poikkeavat kuitenkin sähkönhankintarakenteeltaan toisistaan merkittävästi vuonna 2050 (kuva 4). Muutosskenaarion oletuksena on voimakas teknologinen murros, jonka vuoksi tuulivoiman ja aurinkosähkön osuus olisi huomattava suuri. Nämä tuotantomuodot kattaisivat 44 % (48 TWh) sähkönkulutuksesta. Ydinvoiman tuotantoa olisi vain yksi suuri laitosyksikkö jäljellä. Myös jatkuva kasvu -skenaariossa tuulivoiman ja aurinkosähkön osuus olisi merkittävä eli noin viidennes. Säästö- ja pysähdyskenaariossa aurinkosähkö ei yleistyisi merkittävästi, mutta tuulivoiman rakentaminen etenisi tähän mennessä asetettujen tavoitteiden mukaisesti (säästö) tai nykyisiä tavoitteita huomattavasti pidemmälle (pysähdys). (Energia- ja ilmastotiekartta 2050)

### 1.5.2 Energiatekniikoiden tuleva kehitys

Perinteinen höyryvoimalaitos on parhaillaan voimakkaasti kehittymässä ja sen seurauksena laitoksen sähkön tuotannon hyötysuhde nousee tasolle yli 45 %. Syynä tähän on lähinnä parantuneiden materiaalien ja valmistustekniikoiden mahdollistama höyryn arvojen merkittävä nousu. Normaalipaineinen poltto (pöly- sekä leijupolttot) oli vielä 1990-luvulla kilpailukykyisintä voimalaitosten kattilatekniikassa. Vasta lähivuosina tulevat paineistetut poltto- ja kaasutustekniikat syrjäyttämään sen.

Kaasuturbiinien kehitys tulee jatkumaan merkittävänä lähivuosisikymmenet ja vuosituhanen vaihteen jälkeen käyttöön tulevat uudet keraamiset materiaalit mahdollistavat merkittävän kaasuturbiinien hyötysuhteen nousun. Tämä tulee lisäämään uusien kiinteän polttoaineen kaasutukseen perustuvien voimalaitostyyppien kilpailukykyä merkittävästi. Kaasutustekniikat tulevat kaupalliselle tasolle voimalaitosmittakaavassa kivihiilellä ja biopolttaineilla noin kymmenen vuoden kuluessa.

Tuulivoima on nykyisin kaupallisella tasolla jo pienoismittakaavan paikallisessa sähkön tuotannossa ja sen arvioidaan saavuttavan kunnolla kaupallisen asteen myös voimalaitosmittakaavassa (yli 10 MW tehoiset tuulipuistot) lähivuosien kuluessa.

Polttokennojen kehitys tulee jatkumaan nykyisistä fosforihappokennoista sulakarbonaattikennojen kautta kiinteäoksidikennoihin, joiden odotetaan olevan kaupallisella asteella noin 2020. Vetyteknologioiden kehitys tulee jatkumaan voimakkaana. Niiden tarve on riippuvainen päästöjä aiheuttamattomien energiantuotantomuotojen kehityksestä (aurinkosähkö, tuulivoima, ydintekniikat).

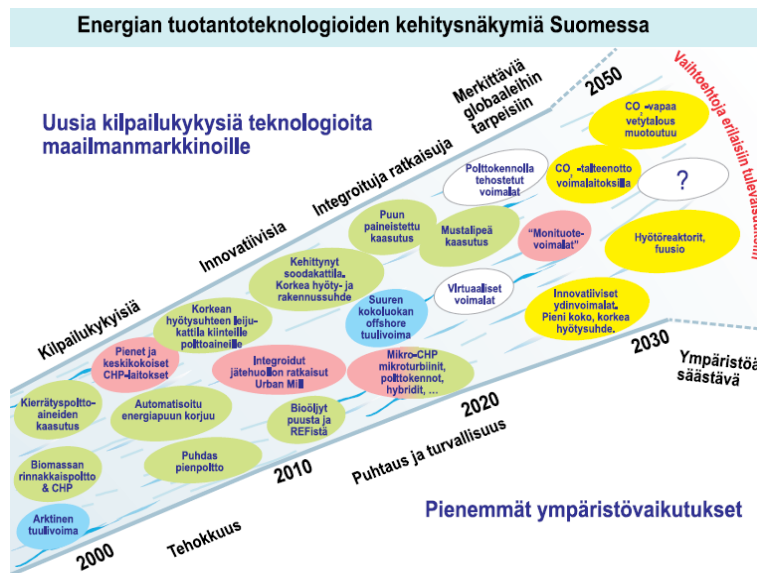
Fossiilisten polttoaineiden käyttöä voidaan ilman päästöjä jatkaa siirtymällä uusiutuvien polttoaineiden käyttöön tai poistamalla CO<sub>2</sub> polton savukaasuista. Nämä tekniikat tullevat kaupalliselle asteelle vuoteen 2020 mennessä. Ongelmana niiden yhteydessä on sopivien CO<sub>2</sub>:n loppusijoituskohteiden puute. Pohjoismainen teollisuus on perinteisesti hyvin energiaintensiivistä. Suurimpana yksittäisenä energiaa käyttävänä teollisuus-

den alana on sementtiteollisuus, joka vastasi 27 % Pohjoismaisesta teollisesta energiankulutuksesta vuonna 2010. Toinen suuri energiaintensiivinen teollisuuden ala on paperi ja selluteollisuus. Teollisuuden hiilineutraalius on haasteellinen tavoite saavuttaa. Energiatohokkuudella ja uusiutuvilla energiantuotantomuodoilla voidaan kattaa osa tavoitteesta. Yksi mahdollisuus on ottaa prosesseissa syntynyt hiilidioksidi talteen.

Hiilidioksidin talteenottoa sekä siihen liittyvää hyötykäyttöä tai loppusijoitusta on kehitetty jo vuosikymmenten ajan. Talteenottoon ja loppusijoitukseen liittyy kuitenkin vielä huomattavia teknisiä ja taloudellisia sekä osin myös ympäristöllisiä haasteita. Maailmalla on meneillään useita hiilidioksidin talteenoton pilottihankkeita voimalaitoksissa. EU:n tavoitteena on saada demonstrointilaitoksia käyntiin viimeistään vuonna 2015. Teknologian uskotaan olevan voimalaitosten osalta kaupallisesti saatavilla noin vuonna 2030.

Fissioydinvoiman osalta viime vuosituhannen voimaloiden kaltaiset mutta turvajärjestelyiltään kehittyneet uuden polven LWR-ydinvoimalat ovat merkittävin kaupalliset ydinvoimantuotannon vaihtoehto. Näissä reaktorin turvajärjestelmät perustuvat pelkääntään ilman ulkoista apuenergiaa toimiviin ns. passiivisiin turvajärjestelmiin. Korkealämpötila (HTR)-reaktorien ja hyötöreaktorien kehitys riippuu voimakkaasti yleisestä suhtautumisesta ydinvoimaan kehittyneiden maiden energiantuotannossa. Fuusioydinvoiman kehitystyö kaupalliselle asteelle vienee vielä ainakin 40...50 vuotta. Vuoden 2020 paikkeilla valmistuu Ranskaan tutkimuskäyttöön 600 MW:n fuusioydinvoimala.

Seuraavassa kuvassa on esitelty Suomessa kehitteillä olevia energiateknologiaideoita.



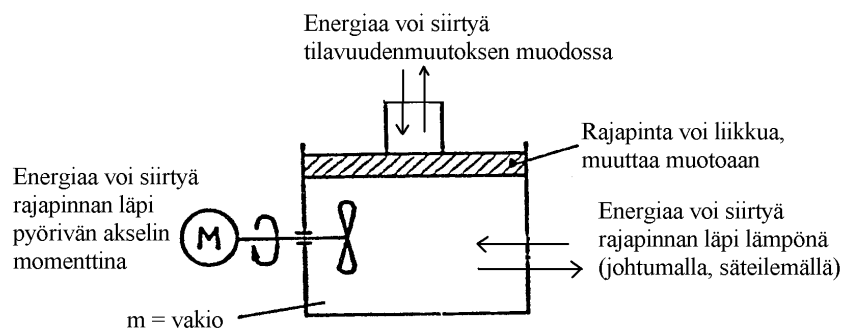
Kuva 1.16 Suomessa kehitteillä olevia energiateknologiaideoita. (Energy visions 2030)

## 2 LÄMPÖVOIMAKONEIDEN TERMODYNAAMIS- SET PERUSTEET

### 2.1 Termodynaaminen systeemi

Termodynaaminen systeemi määritellään joko tiettyinä määrinä tutkittavaa ainetta tai tiettyinä avaruudellisena tilavuutena, jonka käyttäytymistä halutaan tarkastella. Systeemin ulkopuolista massaa tai avaruudellista tilaa kutsutaan systeemin ympäristöksi. Todellinen tai kuvitteellinen pinta, joka erottaa systeemin ympäristöstään on nimeltään kontrollipinta.

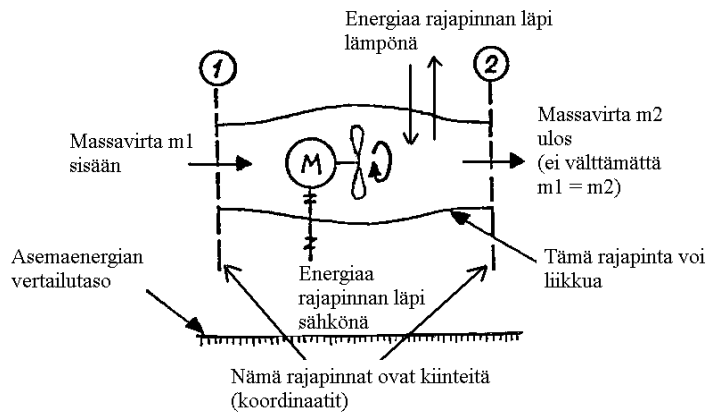
Systeemi voi olla avoin tai suljettu, riippuen siitä tutkitaanko tiettyä massaa vai avaruudellista tilaa. Suljettu systeemi koostuu tietyistä määrästä massaa, eikä massaa voi liikkua sen kontrollipinnan yli. Suljetun systeemin tilavuus voi sen sijaan muuttua. Energiaa voi siirtyä rajapinnan yli joko lämpönä tai työnä.



Kuva 2.1. Suljettu systeemi.

Jos systeemin ja ympäristön välillä ei siirry energiaa, kutsutaan systeemiä eristetyksi. Jos taas lämpöä ei voi siirtyä, on kyseessä lämpöeristetty eli adiabaattinen systeemi.

Avoin systeemi tai kontrollitilavuus on tarkoin määritelty avaruudellinen alue. Yleensä sen muodostaa jokin laite, joka mahdollistaa massavirran liikkeen. Esimerkkinä avoimesta systeemistä on kompressori tai turbiini. Kontrollipinnan yli voi liikkua massan lisäksi energiaa, joko lämpöä tai työtä.



Kuva 2.2. Avoin systeemi.

Avoimiin ja suljettuihin systeemeihin sovellettavat tarkastelutavat eroavat toisistaan. Siksi onkin tärkeää erottaa onko kyseessä avoin vai suljettu systeemi ennen kuin aloitetaan analysoimaan sitä. (Cengel & Boles, 1998, 8 – 9.)

## 2.2 Termodynaaminen tila ja tilasuureet

Systeemin tilaa kuvaavat sen havaittavat makroskooppiset ominaisuudet. Tila tunnetaan täydellisesti, jos kaikkien ominaisuuksien arvot tunnetaan. Kun jonkun tai joidenkin suureiden arvot muuttuvat, systeemin tila muuttuu. Muutoksen suoritustapaa nimitetään prosessiksi.

### 2.2.1 Ekstensiivi- ja intensiivisuureet

Ekstensiivisuureiksi sanotaan suureita, jotka riippuvat systeemin koosta. Termodynaamisissa systeemeissä tällaisia suureita ovat esimerkiksi systeemin tilavuus, massa ja ainemäärä. Kun ekstensiivisuure jaetaan massalla, puhutaan ominaisuureista. Ekstensiiviset suureet merkitään yleensä isolla kirjaimella (esim.  $V$  = tilavuus) ja vastaavat ominaisuureet pienellä kirjaimella ( $v$  = ominaistilavuus). Liitteenä 1 on ominaisuureita eri mittajärjestelmissä, sekä lisäksi muitakin hyödyllisiä muuntotaulukoita. Kun ekstensiivisuure jaetaan ainemäärällä, saadun intensiivisuureen nimeen liitetään etuliite mooli- tai moolinen. Näin saatu moolisuure merkitään alaindeksillä  $m$  (esim.  $v_m$  = moolitilavuus).

Intensiivisuureet ovat systeemin koosta riippumattomia. Esimerkiksi lämpötila ja paine ovat intensiivisuureita. Myös edellä mainitut ominais- sekä moolisuureet ovat myös intensiivisuureita.



## 2.2.2 Tilanyhtälö

Tutkittaessa termodynaamisten systeemien tiloja on havaittu, että kaikki suureet eivät ole riippumattomia, koska kaikki suureet eivät voi saada samanaikaisesti mielivaltaisesti valittuja arvoja. Tällä tavalla toisiinsa kytkettyjä suureita sanotaan systeemin tilasuureiksi. Teknillisen termodynamiikan systeemien tilan kuvaamiseksi riittää kaksi riippumatonta tilasuureta, jonka jälkeen muut tilasuureet on yksikäsitteisesti määrätty. Tasapainotilassa vain yksi ainoa arvoyhdistelmä on mahdollinen. Muutos kahden tasapainotilan välillä on tiestä riippumaton.

Jos systeemissä on yhtä ainoata puhdasta ainetta, sen termodynaaminen tila määräytyy täysin kolmen tilasuureen avulla. Nämä kolme tilasuureta ovat paine, lämpötila ja tilavuus (ominaistilavuus). Yhtä faasia olevan aineen kaksi tarvittavaa tilasuureta voidaan valita paineesta, lämpötilasta tai tilavuudesta (ominaistilavuudesta).

Tilanyhtälön yleinen muoto on

$$f(p, T, V) = 0 \quad (2.2)$$

jossa  $p$  on paine,  $T$  on lämpötila [K] ja  $V$  on tilavuus.

Yleisiä kaasujen teoreettisia tarkasteluja varten käytetään ideaalikaasun tilanyhtälöä. Todellisten aineiden tilanyhtälöt ovat monimutkaisempia riippuvuuksia. Ideaalikaasun tilanyhtälö on

$$pV = NR_u T \quad (2.2)$$

jossa  $R_u$  on yleinen kaasuvakio 8,314 J/molK. Kaava voidaan esittää ilman yleistä kaasuvakiota muotoon

$$pV = \frac{m}{M} R_u T = m \frac{R_u}{M} T = mRT \quad (2.3)$$

missä  $R$  on jokaiselle kaasulle ominainen vakio  $R_u/M$ . Samasta kaavasta saadaan edelleen ominaistilavuuden avulla lausuttuna

$$p \frac{V}{m} = pv = RT \quad (2.4)$$

Professori Ryti poisti ideaalikaasun tilanyhtälöstä (2.2) yleisen kaasuvakion antamalla sille arvon 1. Näin ollen tilanyhtälö voidaan esittää muodossa

$$pV = NT \quad (2.5)$$

Yhtälössä lämpötilan yksiköksi tulee [MJ/kmol]. Näin ollen yhtä kelvinyksikköä vastaa 8,3141 kJ/kmol eli 120,28 K = 1 MJ/kmol. Yleisen kaasuvakion poistaminen yksinkertaistaa laskelmia ja tekee yhtälöstä puhtaan suureyhtälön.

## 2.3 Termodynamiikan pääsäännöt

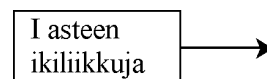
### 2.3.1 I pääsääntö

Termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö on

$$\Delta U = Q + W \quad (2.6)$$

Ensimmäinen pääsääntö toteaa siis, että systeemillä on tilasuure sisäenergia (U), jonka muutos on työn ja lämpömäärän summa. U:n tilasuureluonne seuraa havaitusta energian häviämättömyydestä. Systeemin ja ympäristön välillä siirtyvä energiamäärä luokitellaan kahteen ryhmään: työ ja lämpö. Itse asiassa tässä ei vielä määritellä niiden laatua, vaan ainoastaan otetaan käytäntöön kaksi toisensa poissulkevaa energiansiirtymismuotoa. Työ ja lämpö ovat siirtymisvaiheessa olevia energiamääriä. Ne eivät ole systeemin ominaisuuksia. Systeemissä ei siis ole lämpöä eikä työenergiaa, vaan systeemissä on sisäenergiaa.

Tärkeää on huomata, että sisäenergia U on tilasuure, joten sen määrä ei riipu tiestä, jota pitkin tiettyyn tilaan on tultu. Systeemiin tuotu työ ja lämpö eivät ole tilasuureita, vaan niiden määrä riippuu tiestä, jota pitkin systeemi siirtyy alkutilasta lopputilaan. (Summa  $Q + W$  ei tietenkään riipu prosessitiestä.) I pääsäännön mukaan I asteen ikiliikkuja on mahdoton (energia on häviämätöntä). Työ voi muuttua kokonaan lämmöksi, mutta lämpö voi muuttua kokonaan vain sisäenergiaksi.



### 2.3.2 II pääsääntö

Palautuva prosessi on rajatapaus luonnollisen ja luonnottoman prosessin välillä. Kaikki tapahtumat, jotka tapahtuvat itsestään ovat luonnollisia eli palautumattomia prosesseja. Sellaisia ovat esimerkiksi lämmönsiirto korkeammasta lämpötilasta alhaisempaan, kitkalämmön syntyminen, joulen lämmön kehittyminen sähköjohdossa, kemiallinen reaktio ja kahden kaasun sekoittuminen.

Päinvastaista tapahtumaa pidetään luonnonvastaisena. Kokemusperäisesti ei tunneta tapauksia, jolloin lämpöä itsestään olisi siirtynyt kylmästä kappaleesta kuumaan, eikä myöskään, että sähköjohdossa vastuksen johdosta kehittynyt lämpö olisi muuntunut takaisin sähköenergiaksi. Näin ollen luonnollisessa prosessissa jää sekä systeemin että ympäristön tilaan muutoksia, jotka eivät itsestään palaudu.

Palautuvalla prosessilla tarkoitetaan prosessia, joka voi palautua alkutilaansa niin, ettei systeemiin eikä ympäristöön jää minkäänlaisia muutoksia. Tämä edellyttää ettei prosessin aikana pääse syntymään olosuhteita, jotka laukaisevat itsestään meneviä prosesseja. Palautuvuus merkitsee siis esimerkiksi sitä, että lämpöä siirtyy äärettömän pienen lämpötilaeron johdosta sekä ettei muista energiamuodoista kehity yhtään lämpöä kitkan tai sähkövastuksen takia. Kaikki todelliset prosessit ovat jossain määrin palautumattomia.

Jokainen eristetty systeemi muuntuu itsestään, kunnes tasapaino on saavutettu. Energiamuutoksia ei silloin välttämättä tarvitse tapahtua. Tämä systeemin muuntumiskyky mitataan suureella, jota kutsutaan entropiaksi. Entropia on tilasta riippuva suure, ja on ekstensiivinen, joten osaentropiat voidaan laskea yhteen.

$$dS = dS_{rev} + dS_{irrev} \quad (2.7)$$

missä

$dS_{rev}$  = palautuva eli reversiibeli entropian muutos

$dS_{irrev}$  = palautumaton eli irreversiibeli entropian muutos.

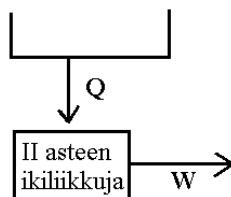
Entropian olemassaolo termodynamiikassa vahvistetaan II pääsäännöllä. II pääsäännölle löytyy monta yhtäpitävää määrittelyä. Periaatteessa II pääsääntö on joko yksistään entropian, lämpötilan tai lämmön määritelmä tai entropian muutoksen ja lämmön välisen yhteyden toteamus. II pääsäännöllä voidaan tarkoittaa myös kaikkia näitä määritelmiä yhdessä.

II pääsäännön mukaan pätee

$$dS_{rev} = \frac{dQ}{T} \quad (2.8)$$

Siis siirtyvä lämpömäärä

$$dQ = TdS_{rev} \quad (2.9)$$

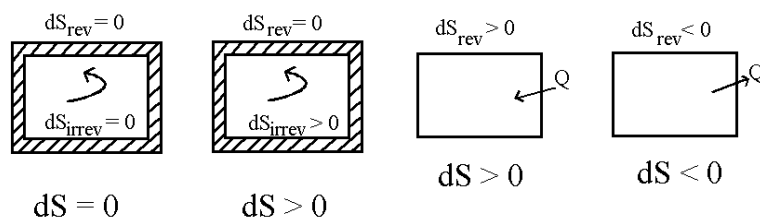


II pääsäännön mukaan II asteen ikiliikkuja on mahdoton eli ei voida rakentaa konetta, joka ottaa lämpöä vain yhdestä lämpösäiliöstä ja muuttaa sen kokonaan työksi.

Entropialla on siis seuraavat ominaisuudet:

- Entropia on vakio ( $dS = 0$ ), kun systeemi on adiabaattinen (=lämpöeristetty,  $dS_{\text{rev}} = 0$ ) ja systeemissä ei tapahdu palautumattomuuksia (= itsestään käyviä prosesseja,  $dS_{\text{irr}} = 0$ ).
- Entropia kasvaa kun systeemi on adiabaattinen mutta systeemissä tapahtuu palautumattomuuksia.
- Entropia kasvaa kun systeemiin siirtyy lämpöä.
- Entropia vähenee ainoastaan kun systeemistä siirtyy lämpöä pois.

Edellä mainitut tilanteet on esitetty graafisesti kuvassa 2.3.



Kuva 2.3. Entropian muutokset.

## 2.4 Tärkeimpiä termodynaamisia funktioita

### 2.4.1 Sisäenergia

Systeemin sisäenergia määritellään I pääsäännön avulla

$$dU = dQ + dW \quad (2.10)$$

Kun siirtyvää työ on tilavuudenmuutostyötä eli  $dW = -pdV$  (=tilavuudenmuutostyö) ja lämpömäärä II pääsäännön mukaan on  $dQ = TdS$ , saadaan sisäenergian muutokselle

$$dU = TdS - pdV \quad (2.11)$$

Tätä kaavaa voidaan pitää termodynamiikan peruskaavana.

## 2.4.2 Entalpia

Käytännön tekniikassa esiintyy sisäenergia usein yhdessä tulon  $pV$  kanssa. On siksi osoittautunut tarkoituksenmukaiseksi ottaa käyttöön funktio

$$H = U + pV \quad (2.12)$$

jolle on annettu nimitys entalpia. Entalpian yksikkö on  $[H] = \text{joule}$ .

Entalpia ei siis ole perussuure niinkuin sisäenergia, vaan ainoastaan johdettu apusuure. Kuitenkin entalpia on erittäin hyödyllinen ja käytännössä sitä käytetään paljon enemmän kuin sisäenergiaa.

Entalpian muutokselle saadaan

$$dH = dU + pdV + Vdp \quad (2.13)$$

sijoittamalla tähän kaavaan sisäenergian määritelmä

$$dU = TdS - pdV \quad (2.14)$$

saadaan

$$dH = TdS + Vdp \quad (2.15)$$

Jakamalla ekstensiivinen suure massalla saadaan ominaissuure. Ominaisuuksia merkitään pienellä kirjaimella ja ekstensiivisuureita suurella. Esimerkiksi ominaisentalpian yksikkö  $[h] = \text{J/kg}$ . Vastaavasti moolinen entalpia  $H_m$  saadaan jakamalla ainemäärällä. Yksiköksi saadaan  $[H_m] = \text{J/mol}$ .

Lisäksi termodynamiikassa käytetään funktioita

Vapaa energia eli Helmholtz'in funktio (F)

$$F = U - TS \quad (2.16)$$

Vapaa entalpia eli Gibbs'in funktio (G)

$$G = H - TS \quad (2.17)$$

Näiden muutoksille saadaan

$$dF = -pdV - SdT \quad (2.18)$$

$$dG = Vdp - SdT \quad (2.19)$$

### 2.4.3 Ominaislämpö

Lämpökapasiteetti määritellään kaavalla

$$C_x = \left( \frac{\partial Q_{rev}}{\partial T} \right)_x \quad (2.20)$$

alaindeksillä x tarkoitetaan sitä muuttujaa, joka on vakio ko. prosessille. Näin ollen lämpökapasiteetti vakiopaineessa ja vakiotilavuudessa voidaan määrittää kaavoilla

$$C_p = \left( \frac{\partial Q_{rev}}{\partial T} \right)_p \quad (2.21)$$

ja

$$C_v = \left( \frac{\partial Q_{rev}}{\partial T} \right)_v \quad (2.22)$$

Ominaislämpö voidaan määrittää neljässä eri yksikössä

Kirjainmerkintä	Merkitys	Yksikkö
$C_p$ $C_v$	Lämpökapasiteetti vakiopaineessa Lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa	J/K J/K
$c_p$ $c_v$	Ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa (= $C_p/m$ ) Ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa (= $C_v/m$ )	J/kgK J/kgK
$C_{pm}$ $C_{vm}$	Molaarinen lämpökapasiteetti vakiopaineessa (= $C_p/N$ ) Molaarinen lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa (= $C_v/N$ )	J/kmolK J/kmolK
$C_{pm}^*$ $C_{vm}^*$	Dimensioton molaarinen lämpökapasiteetti vakiopaineessa (= $c_p/R$ ) Dimensioton molaarinen lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa (= $c_v/R$ )	- -

Dimensiottomia ominaislämpökapasiteetteja käytetään kaavoissa, joissa lämpötilan yksikkönä on  $[T] = \text{MJ/kmol}$ . Muita ominaislämpökapasiteetteja käytetään kaavoissa, joissa lämpötila on laatuna  $[T] = \text{K}$ .

Ominaislämpökapasiteettien merkinnät eivät ole vakiintuneita. Usein pitääkin päätellä asiayhteydestä, onko käytössä dimensioton vai molaarinen lämpökapasiteetti, sillä molemmista käytetään merkintää  $C_{xm}$  ilman tähteä.

Dimensioton ominaislämpökapasiteetti saadaan ominaislämpökapasiteetista seuraavasti

$$C_{pm}^* = \frac{M c_p}{R_u} = \frac{c_p}{R} \Leftrightarrow c_p = C_{pm}^* \frac{R_u}{M} = C_{pm}^* R \quad (2.23)$$

Vastaavasti

$$C_{vm}^* = \frac{M c_v}{R_u} = \frac{c_v}{R} \Leftrightarrow c_v = C_{vm}^* \frac{R_u}{M} = C_{vm}^* R \quad (2.24)$$

Ominaislämpöjen suhde toisiinsa

$$C_{pm}^* - C_{vm}^* = 1 \quad (2.25)$$

$$c_p - c_v = R \quad (2.26)$$

Ominaislämpöjen suhde on isentrooppivakio

$$\gamma = \frac{C_{pm}^*}{C_{vm}^*} = \frac{c_p}{c_v} \quad (2.27)$$

## 2.4.4 Entalpian ja sisäenergian muutosten laskeminen

Yleisesti pätee entalpian ja sisäenergian muutokselle

$$dh = c_p dT + v(1 - \beta T) dp \quad (2.28)$$

$$du = (c_p - \beta v p) dT + v(\kappa_T p - \beta T) dp \quad (2.29)$$

missä  $\beta$  on tilavuuden lämpötilakerroin ja  $\kappa_T$  isoterminen kompressibiliteetti

$$\beta = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (2.30)$$

$$\kappa_T = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \quad (2.31)$$

Ideaalikaasulle

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (2.32)$$

$$\kappa_T = \frac{1}{p} \quad (2.33)$$

Isobaariselle muutokselle ( $dp = 0$ ) pätee siis aina

$$dh = c_p dT \quad (2.34)$$

$$du = (c_p - \beta v p) dT \quad (2.35)$$

Ideaalikaasulle ovat  $\beta T = 1$  ja  $\kappa_T p = 1$ , joten ideaalikaasuille ja kaasuille, jotka ovat lähellä ideaalikaasutilaa myöskin aina pätee

$$dh = c_p dT \quad (2.36)$$

$$du = c_v dT \quad (2.37)$$

Nesteelle on usein  $\beta T$  pieni ja  $\kappa_T$  vieläkin pienempi, joten sopivia likiarvoja entalpian ja sisäenergian muutoksille ovat

$$dh = c_p dT + v dp \quad (2.38)$$

$$du = c_v dT - v \beta T dp \quad (2.39)$$

Nesteelle  $c_p \approx c_v$ . Yleisesti pätee erolle  $c_p - c_v$

$$c_p - c_v = \frac{\beta^2 v T}{\kappa_T} \quad (2.40)$$

Esim. vedelle (300 K, 100 kPa)

$$c_p - c_v = \frac{0,06 \cdot 10^{-3} \cdot 0,207 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{MPa}}{0,43 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{K}} \approx 0,03 \text{ kJ/kgK}$$



Koska veden  $c_p = 4,186 \text{ kJ / kgK}$ , joten ero on pienempi kuin 1%. Sama koskee usein kiinteitä aineita.

## 2.5 Termodynamiikan työaineet

### 2.5.1 Ideaalikaasut

#### Ideaalikaasun tilanmuutokset

Tarkastellaan suljetun systeemin tilanmuutosta pisteestä 1 pisteeseen 2. Tilanyhtälöstä saadaan

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (2.41)$$

koska tilanyhtälöstä  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = NR_u$  suljetun systeemin muutoksessa ainemäärä ei muutu, eikä luonnollisesti myöskään kaasuvakio. Tarkastellaan erilaisia ideaalikaasuprosesseja

1) Isobaari (paine vakio)

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (2.42)$$

2) Isokoori (tilavuus vakio)

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (2.43)$$

3) Isotermi (lämpötila vakio)

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (2.44)$$

4) Isentrooppi (entropia vakio = reversiibeli adiabaatti)

$$p_1 v_1^\gamma = p_2 v_2^\gamma \quad (2.45)$$

missä

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \textit{isentrooppivakio}$$

Isentrooppivakion arvoja eri kaasuille on esitetty taulukossa 2.1. Taulukosta löytyvät myös kaasuvakioiden sekä ominaislämpöjen arvot.

Taulukko 2.1. Kaasujen ominaisuuksia.

Kaasu	Rakenne	Kaasuvakio, $R$ kJ/(kg · K)	$C_p$ kJ/(kg · K)	$C_v$ kJ/(kg · K)	$\gamma$
Ilma	—	0.2870	1.005	0.718	1.400
Argon	Ar	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Butaani	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.1433	1.7164	1.5734	1.091
Hiididioksidi	CO <sub>2</sub>	0.1889	0.846	0.657	1.289
Hiilimonoksidi	CO	0.2968	1.040	0.744	1.400
Etaani	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.2765	1.7662	1.4897	1.186
Eteeni	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.2964	1.5482	1.2518	1.237
Helium	He	2.0769	5.1926	3.1156	1.667
Vety	H <sub>2</sub>	4.1240	14.307	10.183	1.405
Metaani	CH <sub>4</sub>	0.5182	2.2537	1.7354	1.299
Neon	Ne	0.4119	1.0299	0.6179	1.667
Typpi	N <sub>2</sub>	0.2968	1.039	0.743	1.400
Oktaani	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	0.0729	1.7113	1.6385	1.044
Happi	O <sub>2</sub>	0.2598	0.918	0.658	1.395
Propaani	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.1885	1.6794	1.4909	1.126
Vesihöyry	H <sub>2</sub> O	0.4615	1.8723	1.4108	1.327

Yleissääntönä voidaan pitää, että 2 – atomisille kaasuille voidaan käyttää  $\gamma$ :n arvoa n. 1,4 ja 3 – atomisille arvoa n. 1,3.

### 5) Polytrooppi

Polytrooppiprosessilla tarkoitetaan itse asiassa sitä, että prosessit 1...4 voidaan esittää yhdellä kaavalla.

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k \quad (2.46.)$$

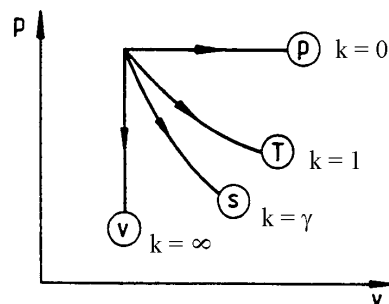
missä  $k$  = polytrooppivakio, joka saa eri arvoja prosessista riippuen.

Kun  $k = 0$  isobaari

$k = 1$  isotermi

$k = \infty$  isokoori

$k = \gamma$  isentrooppi



Kuva 2.4. Ideaalikaasuprosessit.

Seuraavaksi tarkastellaan eri prosesseissa tehtyä työtä, tuotua lämpöä sekä niiden ja termodynaamisen tilan välistä riippuvuutta.

- 1) Isobaariselle prosessille paine on vakio, joten työ

$$W = - \int p dV = p(V_1 - V_2) \quad (2.47)$$

Tuoduksi lämmöksi saadaan

$$Q = \Delta U - W = U_2 - U_1 - p(V_1 - V_2) = \Delta H = mc_p(T_2 - T_1) \quad (2.48)$$

- 2) Isokoorisessa prosessissa tilavuus on vakio, joten  $W = 0$ . Tällöin

$$Q = \Delta U = mc_v(T_2 - T_1) \quad (2.49)$$

- 3) Isotermiselle prosessille lämpötila ja sisäenergia ovat vakioita, joten  $Q = -W$ . Nämä saadaan laskettua puristustyön määritelmästä sijoittamalla siihen ideaalikaasun tilanyhtälöstä johdettu paineen lauseke

$$W = - \int p dV = - \int mRT \frac{dV}{V} = mRT \ln \frac{V_1}{V_2} \quad (2.50)$$

- 4) Isentrooppiselle prosessille  $Q = 0$ , joten työ

$$W = \Delta U = mc_v(T_2 - T_1) \quad (2.51)$$

Taulukoissa 2.2 ja 2.3 on kummassakin esitetty tuotu lämpö, työ sekä riippuvuudet ensin yleisesti höyryjen ja kaasujen tapauksessa sekä erikseen ideaalikaasuille. Taulukossa 2.2 lämpötilat ovat kelvineissä. Taulukossa 2.3 käytetään professori Rytin kehittämää menetelmää, jossa  $R_u = 1$ , lämpötilat ovat yksikössä [MJ/kmol] ja ominaislämpökapasiteetit yksiköttöminä.

Taulukko 2.2. Tilanmuunnoksia yleisesti ja ideaalikaasujen tapauksessa ( $[T] = K$ ).

	Q [J]	W [J] kertaprosessi	$W_t = \int V dp$ [J] Jatkuva prosessi	$p_1 T_1 V_1$ -riippuvuuksia
Yleisesti				
Isokoori (v)	$U_2 - U_1$	0	$V(p_2 - p_1)$	
Isobaari (p)	$H_2 - H_1$	$p(V_1 - V_2)$	0	
Isotermi (T)	$U_2 - U_1 + \int p dV$	$-\int p dV$	$\int V dp$	
Isentrooppi	0	$U_2 - U_1$	$H_2 - H_1$	
Ideaalikaasulle				
Isokoori (v)	$mc_v(T_2 - T_1)$	0	$V(p_2 - p_1)$	$p/T = \text{vakio}$
Isobaari (p)	$mc_p(T_2 - T_1)$	$p(V_1 - V_2)$	0	$V/T = \text{vakio}$
Isotermi (T)	$mRT \ln V_2/V_1$	$mRT \ln V_1/V_2$	$mRT \ln V_1/V_2$	$pV = \text{vakio}$
Isentrooppi	0	$mc_v(T_2 - T_1)$	$mc_p(T_2 - T_1)$	$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\gamma-1/\gamma} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}$
Polytrooppi	$m \frac{kc_v - c_p}{k-1} (T_2 - T_1)$	$mR \frac{T_2 - T_1}{k-1}$	$mR \frac{k}{k-1} (T_2 - T_1)$	$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{k-1/k} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1}$

Taulukko 2.3. Tilanmuunnoksia ( $[T] = \text{MJ/kmol}$ ,  $[C^*_{pm}] = (-)$ ).

	Q [J]	W [J] kertaprosessi	$W_t = \int V dp$ [J] Jatkuva prosessi	$p_1 T_1 V_1$ -riippuvuuksia
Yleisesti				
Isokoori (v)	$U_2 - U_1$	0	$V(p_2 - p_1)$	
Isobaari (p)	$H_2 - H_1$	$p(V_1 - V_2)$	0	
Isotermi (T)	$U_2 - U_1 + \int p dV$	$-\int p dV$	$\int V dp$	
Isentrooppi	0	$U_2 - U_1$	$H_2 - H_1$	
Ideaalikaasulle				
Isokoori (v)	$NC^*_{vm}(T_2 - T_1)$	0	$V(p_2 - p_1)$	$p/T = \text{vakio}$
Isobaari (p)	$NC^*_{pm}(T_2 - T_1)$	$p(V_1 - V_2)$	0	$V/T = \text{vakio}$
Isotermi (T)	$NT \ln V_2/V_1 = NT \ln p_1/p_2$	$NT \ln V_1/V_2 = NT \ln p_2/p_1$	$NT \ln V_1/V_2 = NT \ln p_2/p_1$	$pV = \text{vakio}$
Isentrooppi	0	$NC^*_{vm}(T_2 - T_1)$	$NC^*_{pm}(T_2 - T_1)$	$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/C^*_{pm}} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1/C^*_{vm}}$
Polytrooppi	$N \frac{kC^*_{vm} - C^*_{pm}}{k-1} (T_2 - T_1)$	$N \frac{T_2 - T_1}{k-1}$	$N \frac{k}{k-1} (T_2 - T_1)$	$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{k-1/k} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1}$

Taulukoissa on erotettu toisistaan kertaprosessin työ (puristustyö) sekä jatkuvan prosessin työ (teknillinen työ). Yleensä väliainetta puristaessa on puristustyö

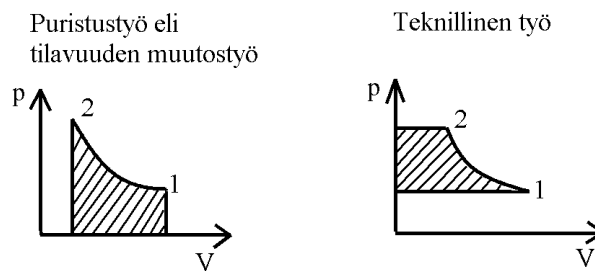
$$W_p = - \int p dV \quad (2.52)$$

joka isentrooppiselle puristukselle on  $\Delta U$ . Tämä on siis kertaprosessin työ. Jotta jatkuvasti tai jaksollisesti toimivassa koneessa (esimerkkinä olkoon kompressori) saataisiin

puristettu kaasu ulos, on tehtävä lisätö  $p_2V_2$ . Uutta kaasua otettaessa se tekee systeemiin työn  $p_1V_1$ . Kaikkiaan tarvitaan siis jatkuvassa tai jaksollisesti toistuvassa prosessissa teknillinen työ

$$W_t = W_p + p_2V_2 - p_1V_1 = \int_1^2 V dp \quad (2.53)$$

joka isentrooppiselle prosessille on  $\Delta H$ . Kuvassa 2.5. on esitetty graafisesti puristustyön ja teknillisen työn ero.



Kuva 2.5. Puristustyö ja teknillinen työ.

## 2.5.2 Reaalikaasut

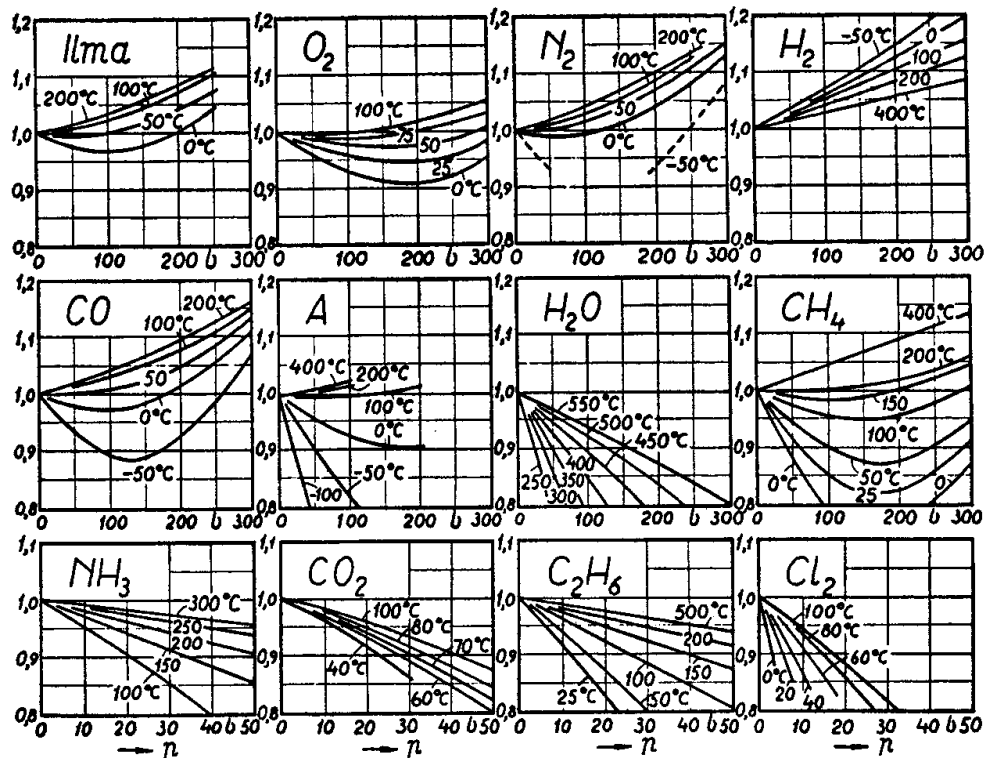
Todelliset kaasut eivät noudata aivan tarkasti ideaalikaasun yhtälöä. Reaalikaasujen tilanyhtälö on muotoa (käytetään Rytin määritelmää, jossa  $R_u = 1$  ja  $[T] = \text{MJ/kmol}$ )

$$pV = \Omega NT \quad (2.54)$$

$\Omega$  on reaalisuuskertoimen, jonka määrittämiseksi on kehitetty erilaisia menetelmiä (reaalikaasuyhtälöt)

$$\Omega = \Omega(T, p) \quad (2.55)$$

Alla olevasta kuvasta selviävät yleisimpien kaasujen reaalisuuskertoimien arvot paineen (bar) ja lämpötilan ( $^{\circ}\text{C}$ ) funktiona. Kuvasta voidaan arvioida, millä alueella kaasulle voidaan käyttää ideaalikaasun tilanyhtälöä eli  $\Omega = 1$ .



Kuva 2.6. Eräiden aineiden reaalisuuskertoimet paineen ja lämpötilan funktiona. Kuvasta voidaan päätellä mille aineille ja millä arvoilla voidaan käyttää ideaalikaasuoletuksia. (TKK2, 732.)

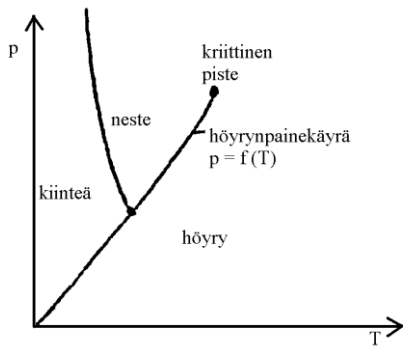
### 2.5.3 Vesihöyry

Vesihöyryä voidaan joissain tapauksissa pienillä paineilla käsitellä ideaalikaasuna. Vesihöyryn laajin teknillinen käyttö on kuitenkin höyryvoimalaitoksissa, joissa paine on luokkaa 4–20 MPa ja lämpötila 300–600 °C. Lisäksi höyryvoimalaitoksissa faasimuutokset ovat oleellinen osa prosessia. Näin ollen ideaalikaasuoletus johtaisi merkittävään virheeseen. Vesihöyryn tilasuureet onkin luettava taulukoista ja tilapiirroksista.

Faasimuutos nesteestä kaasuksi on höyrystyminen ja päinvastainen kaasusta nesteeksi lauhtuminen. Kun käsitellään prosesseja, joissa nämä faasimuutokset voivat esiintyä, käytetään kaasusta nimitystä höyry. Höyry on siis lähellä nesteytymistilaa oleva kaasu.

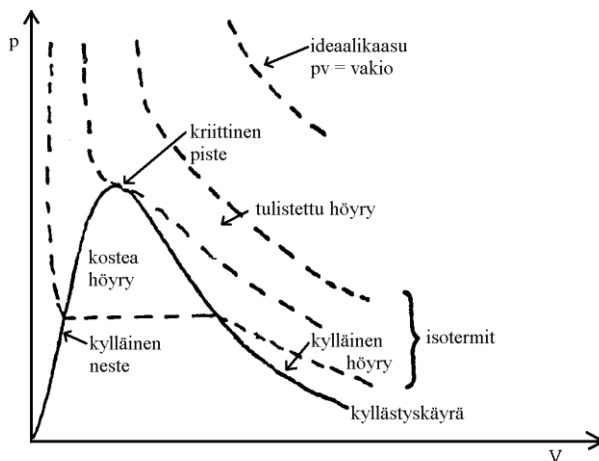
#### Tilapiirroksiset

$p$ - $T$ -tasossa määräytyy faasimuutosrajakäyrä, höyrynpainekäyrä funktiosta  $p = f(T)$ , koska Gibbsin faasisäännön mukaan aineella on silloin ainoastaan yksi vapausaste. Höyrynpainekäyrän ylin piste on kriittinen piste.



Kuva 2.7. Vesihöyryn pT –piirros ja höyrynpainekäyrä.

pV- ja Ts-tasoon muodostuu faasimuutoksesta alue, koska höyryn ominaistilavuus on paljon suurempi kuin nesteen. Faasimuutokseen myöskin liittyy huomattava lämmön-siirto, höyrystymisen latentti lämpö eli höyrystymislämpö.



Kuva 2.8. Vesihöyry pV –tasossa.

Faasimuutosaluetta, ns. kostean höyryn aluetta rajoittavat käyrät, kyllästetty neste ja kyllästetty höyry. Kosteaa höyryä sisältää siis sekä nestettä (pieninä pisaroina) että höyryä.

Faasimuutosrajakäyrän maksimipisteessä on isotermillä infleksiopiste, vastaava tila on kriittisen pisteen tila. Kriittisen pisteen yläpuolella höyry ja neste eivät voi olla tasapainossa keskenään. Kriittisen paineen ja kriittisen lämpötilan yläpuolella aine voi esiintyä vain kaasumuodossa.

Rajakäyrän sisäpuolella ovat isotermit vaakasuoria, koska vakiopaineessa myöskin lämpötilan on oltava vakio. On siten ilmeistä, että tällä kostealla alueella paineen ja lämpötilan tunteminen ei yksinomaan riitä tilan määrittämiseen. Kostealla höyryllä tarkoitetaan kaasumaisen höyryn ja pienten vesipisaroiden seosta. Kosteassa höyryssä

sekä kaasu että neste on kylläistä. On otettu käyttöön karakteristinen suure, höyrypitoisuus. Höyrypitoisuudella tarkoitetaan kylläisen höyryn osuutta koko massasta. Kylläisen höyryn tilasuureet merkitään yleensä yläindeksillä " (kaksi pilkkua) ja kylläisen nesteen ' (yksi pilkku). Höyrypitoisuus on siten

$$x = \frac{m''}{m'' + m'} = \frac{m''}{m} \quad (2.56)$$

Esim.  $x = 0,9$  tarkoittaa, että 90 % aineesta on höyryfaasissa ja loput 10 % nestefaasissa.

Höyrypitoisuuden avulla voidaan määrittää muiden tilasuureiden arvot kostealla alueella. Esimerkiksi ominaistilavuus  $v$

$$v = (1 - x)v' + xv'' \quad (2.57)$$

Likimääräisenä voidaan määrittää  $\approx xv''$ , koska  $v'' \gg v'$ , mikäli tila ei ole kriittisen pisteen läheisyydessä.

Toisena esimerkkinä olkoon entalpia

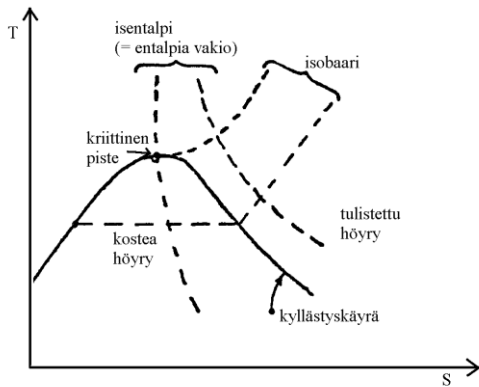
$$h = (1 - x)h' + xh'' = h' + x(h'' - h') = h' + xl \quad (2.58)$$

missä entalpiaero  $h'' - h' = l =$  höyrystymislämpö. Höyrystymislämpö edustaa siis sitä lämpömäärää, joka vakioaineessa on tuotava, jotta kyllästetty vesi muuttuisi kyllästetyksi höyryksi.

Mikäli höyryn lämpötila on korkeampi kuin kyllästetyn höyryn samassa paineessa on, sanotaan höyryä tulistetuksi. (Kostean höyryn alueen oikealla puolella oleva alue pV-tasossa.)

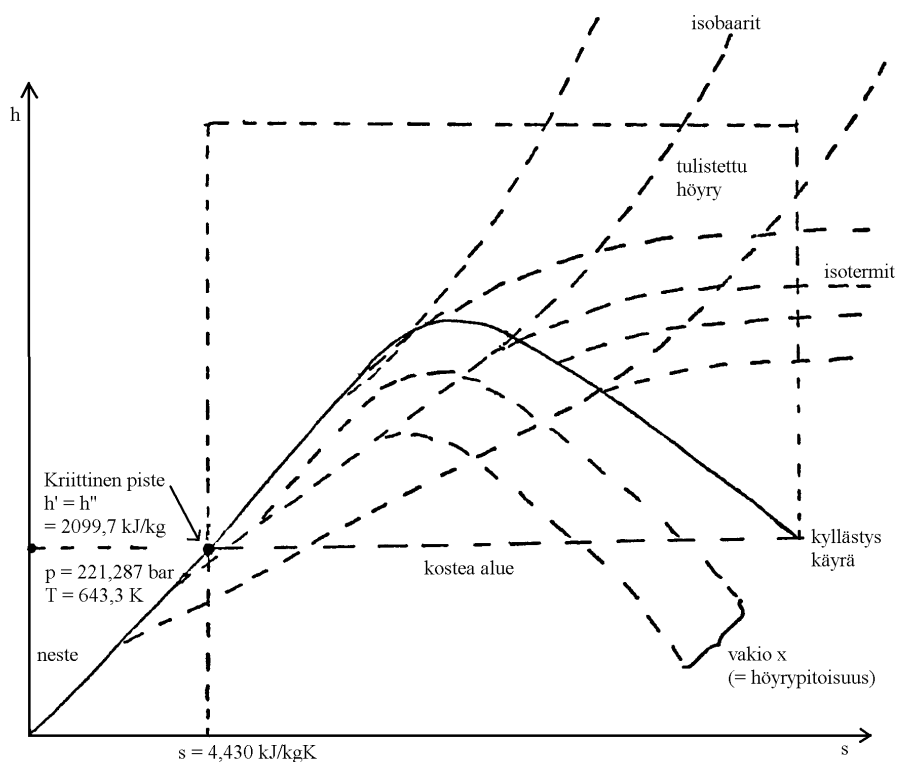
Ts-tasossa ovat vastaavasti isobaarit kostealla alueella vaakasuoria. Nestealueella ovat isobaarit hyvin lähellä kyllästyskäyrää. Vakioentalpiakäyrät eli isentalpit ovat ideaalikaasutilassa olevalle kaasulle (T korkea, p pieni) vaakasuoria (Ts-tasossa), mutta lähellä kyllästystilaa hyvin jyrkkiä; höyrymuodostuksessa siis entalpiakasvu on huomattava.





Kuva 2.9. Vesihöyry Ts-tasossa.

Koska stationäärisen virtaussysteemin energia-analyysissä entalpia- ja entropia-arvot usein kiinnostavat eniten on useille tärkeille aineille laadittu  $h$ - $s$  -piirroksia joiden avulla prosessia helposti voidaan havainnollistaa ja analysoida.



Kuva 2.10. Vesihöyryn  $h$ - $s$ -piirros.

Vesihöyryn  $h$ - $s$ -piirroksen nollapisteksi on valittu  $0 \text{ }^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$ , mikä johtuu historiallisista syistä. Sisäenergia- ja entropia-arvoja määritettäessä pidetään nykyään veden kolmoispistettä  $273,16 \text{ K}$  nollapisteenä (Kelvinasteikon kiintopiste). Kaikkia entalpia-arvoja olisi vähennettävä tämän takia arvolla  $0,04 \text{ kJ/kg}$ , mutta käytännössä tämä ero

on merkityksetön. Hs –tasossa kriittinen piste ei sijaitse enää kyllästyskäyrän maksimipisteessä kuten pV - ja TS –tasossa, vaan kostean alueen vasemmalla puolella.

Kostealla alueella isobaarit ja isotermit yhtyvät, ja ne ovat suoria koska kaavasta

$$dh = Tds + vdp \quad (2.59)$$

seuraa isobaarille ja isotermille

$$\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)_p = T \quad (2.60)$$

Isobaari jatkuu tulistetulle alueelle ilman taittumista kyllästyskäyrän ohittaessaan. Isotermille sensijaan esiintyy tässä kohdassa epäjatkuvuuskohta (hs-piirroksessa ei isotermejä ole jatkettu tulistetulta alueelta kostealle alueelle havainnollisuuden vuoksi, mutta ne ovat siis yhdensuuntaisia piirrettyjen isobaarien kanssa).

Nestealueella ovat isobaarit hyvin lähellä kyllästyskäyrää. Kostealle alueelle on piirretty myöskin vakiohörypitoisuuskäyriä.









Tarkkuuden vuoksi on tavallisissa hs-piirroksissa esitetty ainoastaan kuvassa katkovivalla merkitty neliön muotoinen alue. Kyllästetyn nesteen arvot jäävät tuolloin piirroksen ulkopuolelle. Ne ja kylläisen höyryn arvot on erikseen taulukoitu. Tarkempia laskuja varten on syytä käyttää erityisiä höyrytaulukkoita. Näistä saadaan myöskin höyryn ominaistilavuuden arvoja. Isokooreja ei nimittäin aina ole piirretty hs-piirrokseseen vaan niiden sijasta merkitty pv-tulon käyrät. Isokoorit kulkevat jyrkemmin kuin isobaarit.

Kylläisen veden ja vesihöyryn aineominaisuudet löytyvät taulukoituna liitteenä 2. Liitteenä 3 on vesihöyryn hs –piirros. Liitteenä 4 on paisuntahöyryn muodostuminen kyläisen veden paisuessa alempaan paineeseen. Liitteenä 5 löytyy veden hp –piirros. Kuvaa on merkitty erään kattilassa tapahtuvan höyryn kehitys.

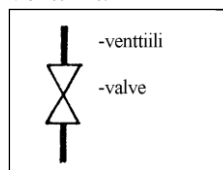
## 2.6 Piirrosmerkit

Seuraavassa on esitetty eräitä termodynamiikan ja energiatekniikan kannalta tärkeitä, yleisesti käytössä olevia piirrosmerkkejä. Niitä käytetään esimerkiksi voimalaitosten prosessikaavioissa.

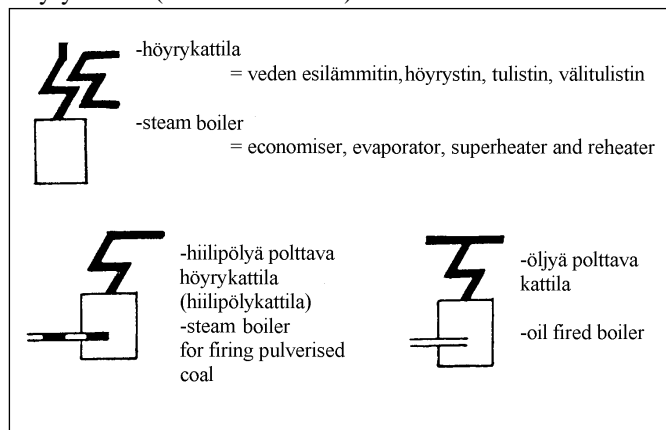
## Putkijohdot (the pipes):

 <p>-suur- ja pienpainehöyry -high and low pressure steam</p>	 <p>-päähöyryjohto -main stream pipe ("steam main")</p>	 <p>-puhdas vesi, esimerkiksi lauhde -clean or pure water, for instance condensate</p>	 <p>-syöttövesi -feed water</p>
 <p>-ilma -air</p>	 <p>-palava kaasu -combustible gas</p>	 <p>-pakokaasu, savukaasu -exhaust gas, flue gas</p>	 <p>-hiili -coal</p>

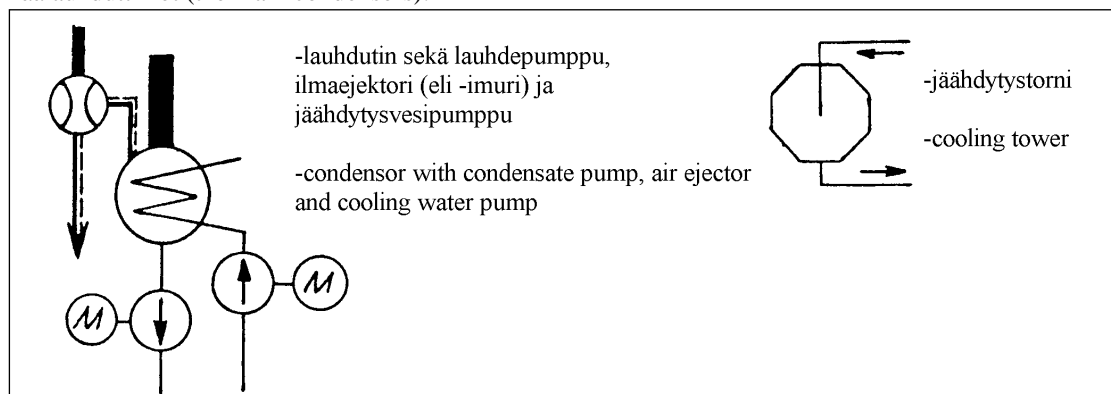
## Ventiilit:



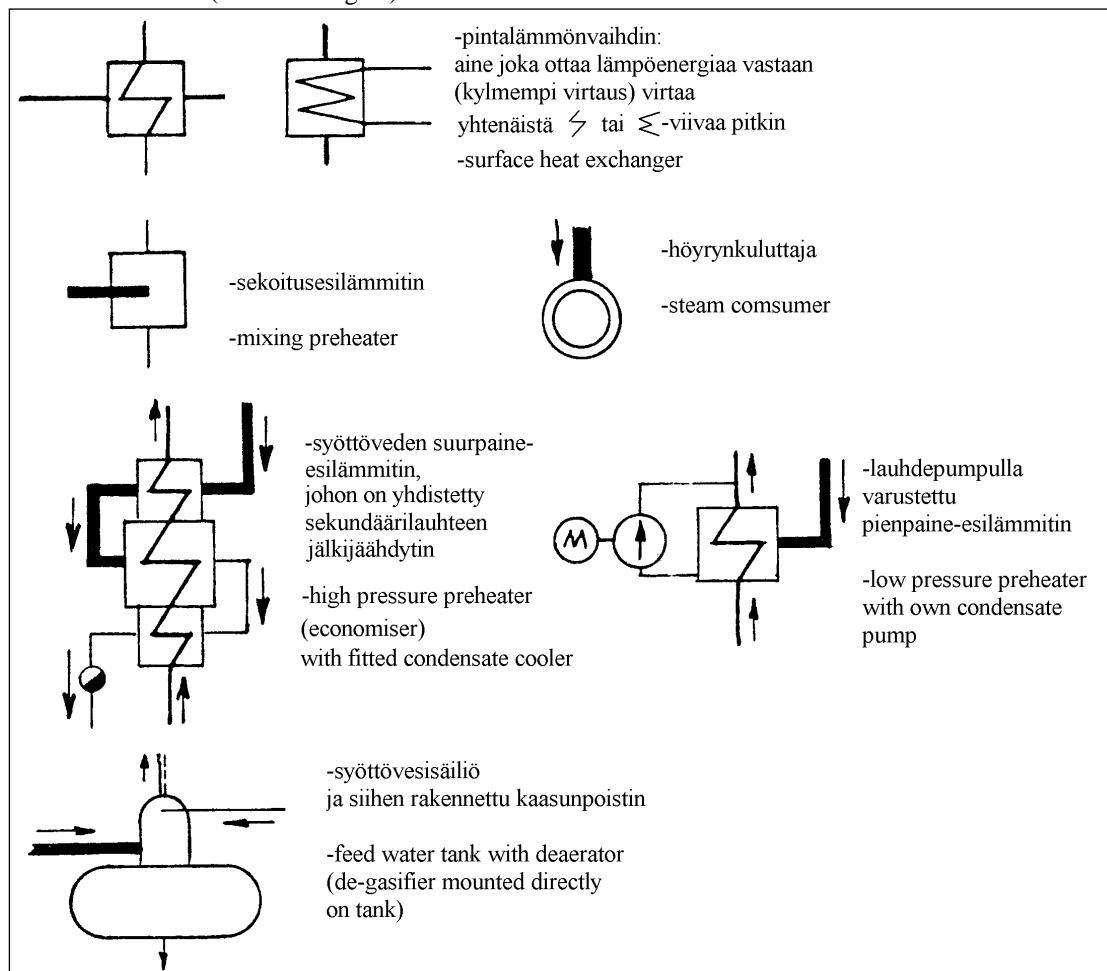
## Höyrykattilat (the steam boilers):



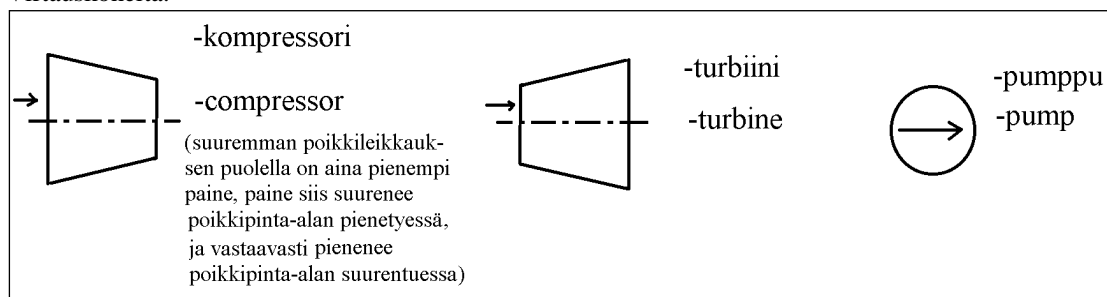
## Päälauhduttimet (the main condensers):



## Lämmönvaihtimet (heat exchangers):



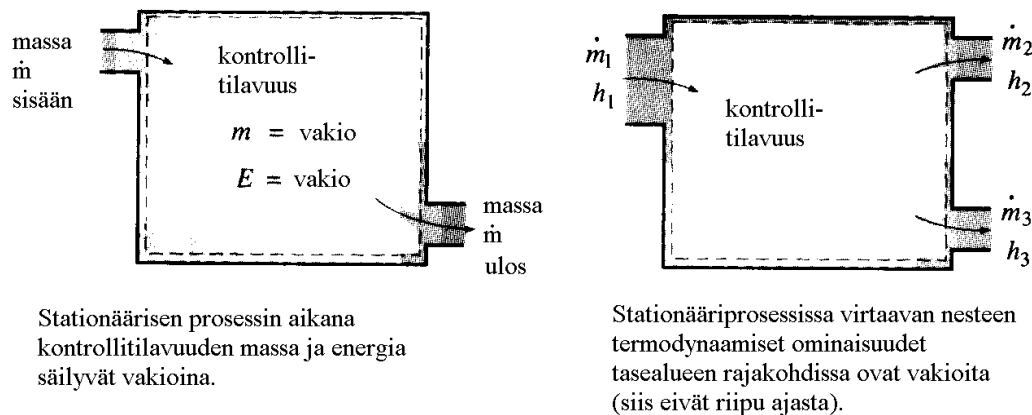
## Virtauskoneita:



## 2.7 Avoimen systeemin yhtälöt

Stationäärisellä virtaussysteemillä tarkoitetaan järjestelmää, johon aina virtaa yhtä paljon ainetta sisään kuin sitä tulee ulos. Järjestelmään ei siten varastoidu ainetta, vaan se pysyy koko ajan vakiona. Järjestelmän termodynaamiset ominaisuudet pysyvät joka kohdassa ajan suhteen samoina, vaikkakin voivat olla erilaiset eri kohdissa järjestelmää.

Esimerkkejä tämän tyyppisistä järjestelmistä ovat vesi-, höyry- ja kaasuturbiinit, puhaltimet ja pumput, lämmönsiirtimet, höyrykattilat, kompressorit, jne.



Kuva 2.11. Stationääriprosessin periaate.

Massavirta sisään ja ulos on siis yhtä suuri. Jos kontrolli-tilavuuteen tulee ja siitä lähtee useampia putkia, toteutuu massan säilyminen kun

$$\sum_{\text{sisään}} \dot{m} = \sum_{\text{ulos}} \dot{m} \quad (2.61)$$

Stationääriprosessille pätee myös ensimmäinen pääsääntö

$$dE = dQ + dW = \dot{Q}dt + \dot{W}dt = \Phi dt + Pdt \quad (2.62)$$

missä  $\Phi$  on tasetilaan tuotu tai siitä viety lämpöteho ja  $P$  vastaava mekaaninen teho.

Kokonaisenergia koostuu nyt sisäenergiasta, potentiaalienergiasta ja kineettisestä energiasta. Näin ollen yhtälö 2.62 voidaan kirjoittaa muotoon

$$dE = (u_2 - u_1)dm + g(z_2 - z_1)dm + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}dm = dQ + dW \quad (2.63)$$

Mekaaninen työ  $dW$  koostuu kahdesta osasta. Toinen on akselityötä, joka tuodaan tasetilaan pyörivän tai edestakaisin liikkuvan akselin muodossa. Toinen osa tulee siitä virtauksen tekemänä työnä, kun tasetilan kontrollipinnan muoto muuttuu aikavälillä  $dt$ .

$$dW = Pdt - p_2v_2dm + p_1v_1dm \quad (2.64)$$

Sijoittamalla tämä kaavaan 2.63, jakamalla ajanmuutoksella  $dt$  ja merkitsemällä  $dm/dt = \dot{m}$  saadaan

$$P + \Phi = \dot{m} \left[ \left( u_2 + p_2 v_2 + g z_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) - \left( u_1 + p_1 v_1 + q z_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) \right] \quad (2.65)$$

Koska  $u + pv = h$ , saadaan yhtälöstä edelleen

$$P + \Phi = \dot{m} \left[ h_2 - h_1 + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}(w_2^2 - w_1^2) \right] \quad (2.66)$$

Yhtälö 2.66 on stationäärisen virtaussysteemin energiatase. Se antaa tasetilavuuteen tulevien ja siitä lähtevien ainevirtojen riippuvuuden tasetilavuuden kontrollipinnan läpäisevästä lämpö- ja mekaanisesta tehosta.

Kaavassa voidaan käyttää myös merkintää kokonaisentalpia

$$h_{tot} = h + gz + \frac{w^2}{2} \quad (2.67)$$

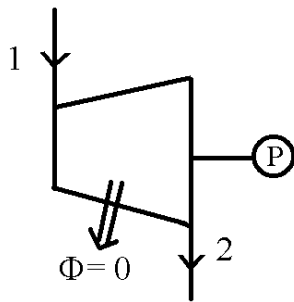
jolloin kaava 2.66 saadaan muotoon

$$P + \Phi = \dot{m} \Delta h_{tot} = \dot{N} \Delta H_{tot} \quad (2.68)$$

Virtauskoneeseen tuotu kokonaisteho (mekaaninen ja lämpöteho) on siis aina kokonaisentalpiavirran lisäys riippumatta koneen häviöistä (hyötysuhteesta). (Wiksten 1996, 10 – 11.)

Kaavaa 2.68 voidaan käyttää kaikkiin stationäärisiin virtaussysteemeihin, esimerkiksi kompressoriin, turbiiniin, kuristukseen jne. Jokaisessa tapauksessa on tarkasteltava erikseen, mitkä termit kokonaisentalpian lausekkeessa ovat merkityksellisiä ja mitkä voidaan jättää pois. Seuraavassa käydään läpi muutama tapaus.

### 2.7.1 Paisunta turbiinissa



Kuva 2.12. Adiabaattinen turbiini.

Virtaavan kaasun (tai höyryn) kulkiessa turbiinin läpi sen siipiä vastaan tehdään työtä. Työ on positiivista, koska se on kaasun tekemää. Avoimen systeemin energiayhtälön termejä voidaan useimmiten turbiinin tapauksessa yksinkertaistaa seuraavasti

- $\Phi = 0$ , koska yleensä lämmönsiirto ympäristöön on pyritty estämään. Turbiini on siis adiabaattinen.
- Potentiaalienergian muutos kaasun virratessa turbiinissa on hyvin pieni ja jätetäänkin yleensä laskuissa huomiotta.
- Kineettisen energian muutos jätetään yleensä huomiotta, koska virtausnopeudet turbiinissa ovat yleensä pieniä (ja nopeudenmuutoskin pieni)

Turbiinin tuottamaksi tehoksi  $P$  saadaan siis

$$P = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (2.69)$$

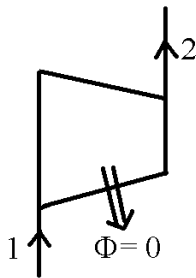
missä  $\Delta h$  on virtausaineen entalpiamuutos turbiinissa. (Cengel & Boles, 1998, 208 – 211.)

Rytin merkintöjä käyttäen voidaan turbiinin teho lausua myös ominaislämpökapasiteetin avulla seuraavasti

$$P = \dot{N} C_{pm}^* \Delta T \quad (2.70)$$

Yhtälössä lämpötila on yksikössä  $[T] = \text{MJ/kmol}$  ja ominaislämpökapasiteetti on yksikötön.

## 2.7.2 Kompressor



Kuva 2.13 Adiabaattinen kompressor.

Kompressorin tarkastelu on samanlainen turbiiniin verrattuna. Erona on tehdyn työn suunta: turbiinissa kaasu tekee työtä kun taas kompressorissa virtausaineeseen tehdään työtä, eli sen paine nousee.

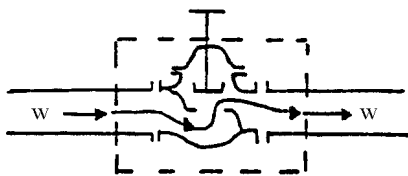
Tarkasteltaessa avoimen systeemin energiatasetta päädytään vastaavaan tulokseen kuin turbiinin yhteydessä. Oletetaan että systeemi on adiabaattinen eli  $\Phi = 0$  ja potentiaalienergiatermi sekä kineettisen energian termi voidaan jättää huomiotta. Näin ollen kompressorin vaatima teho on siis

$$P = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2.71)$$

Vastaavasti kuin turbiinin tapauksessa, voidaan yhtälö lausua myös ominaislämpökapasiteetin avulla.

## 2.7.3 Kuristus

Kuristuksella tarkoitetaan laitetta, jossa virtauksen kulkua jotenkin estetään. Kaasun tai nesteen virratessa pienen aukon läpi sen paine alenee. Paineen alenemiseen liittyy yleensä myös lämpötilan aleneminen. Esimerkiksi osittain avattu tavallinen sulkuventtiili on tyypillinen kuristuslaite.



Kuva 2.14 Kuristusventtiili.

Laitetta voidaan pitää adiabaattisena. Tapaukselle, jolloin nopeudet tulo- ja menopuolella ovat yhtä suuret, seuraa jatkuvan systeemin energiatasetta



$$P + \Phi = \dot{m}\Delta h_{tot} \quad (2.72)$$

$$\Delta h = 0 \quad (2.73)$$

Tämä ei kuitenkaan merkitse sitä, ettei mitään olisi tapahtunut: syntyy paine-ero.

$$dh = Tds + vdp = 0 \quad (2.74)$$

$$ds = -\frac{vdp}{T} \quad (2.75)$$

Kun  $dp$  on negatiivinen, niin entropia kasvaa. Koska systeemi on lämpöeristetty, merkitsee tämä palautumattomuutta eli häviöitä. Kuristaminen on siis huono säätötapa.

### 3 POLTTOTEKNIIKAN PERUSTEET

Palamisen tarkoitus polttoprosesseissa on vapauttaa polttoaineen mahdollisimman täydellisen hapettumisen seurauksena sen sisältämä energia, joka sitten pyritään hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti. Yksinkertaisimmillaan perusreaktio syntyy, kun hiilivety  $C_xH_y$  ( $x$  moolia hiiltä,  $y$  moolia vetyä) hapettuu tuottaen hiilidioksidia  $CO_2$  ja vettä  $H_2O$ . Seuraavassa käsitellään palamisilmiö pääpiirteissään.

Palamisreaktio määritellään perinteisesti seuraavasti: palaminen on aineen ja hapen (hapettimen) välinen reaktio, jonka seurauksena vapautuu lämpöenergiaa. Useimmat ilmansaasteet muodostuvat prosesseissa, joihin liittyy palaminen. On siis olennaista ymmärtää perusteet palamisprosessista.

#### 3.1 Palaminen

Palamisessa happi yhtyy palavaan aineeseen ja reagoi sen kanssa. Palamisreaktion lähtöaineiden kulutus ja palamistulosten eli savukaasujen koostumus saadaan selville reaktioyhtälöistä. Reaktioyhtälön molemmiin puolin on oltava sama määrä eri aineiden atomeja, koska näiden lukumäärä ei reaktiossa muutu. Reaktioyhtälö osoittaa tasapainotilaa ennen reaktiota ja sen jälkeen, eikä siis kykene selvittämään itse reaktion useimmiten hyvin mutkikasta kulkua. Esimerkkinä reaktioyhtälöstä on hiilen täydellinen palamisreaktio



Oheisessa taulukossa 3.1 on eräitä tavallisimpia palamisreaktioiden reaktioyhtälöitä.

Taulukko 3.1. Eräitä palamisreaktioita.

palava aine	reaktio
hiili hiilimonoksidiksi	$C + \frac{1}{2} (O_2 + 3,77 N_{2r}) + CO + 1,89 N_{2r}$
hiili hiilidioksidiksi	$C + O_2 + 3,77 N_{2r} = CO_2 + 3,77 N_{2r}$
hiilimonoksidi hiilidioksidiksi	$CO + \frac{1}{2} (O_2 + 3,77 N_{2r}) = CO_2 + 1,89 N_{2r}$
vety	$H_2 + \frac{1}{2} (O_2 + 3,77 N_{2r}) = H_2O + 1,89 N_{2r}$
rikki	$S + O_2 + 3,77 N_{2r} = SO_2 + 3,77 N_{2r}$
$C_xH_y$	$C_xH_y + \left(x + \frac{y}{4}\right) \left(O_2 + 3,77 N_{2r}\right) =$ $= x CO_2 + \frac{y}{2} H_2O + 3,77 \left(x + \frac{y}{4}\right) N_{2r}$

Palamisreaktion happi tuodaan polttoaineeseen ilmaa. Ilma sisältää hapen lisäksi pääasiassa typpeä  $N_2$  ja jonkin verran jalokaasuja A ja hiilidioksidia  $CO_2$ . Palamislaskuja varten kannattaa ilman koostumus jakaa kahteen erillään tarkasteltavaan osaan: hapteen ja muihin kaasuihin. Muut kaasut ovat lähes inertejä eivätkä osallistu merkittävässä määrin palamisreaktioihin. Ne ovat pääasiassa typpeä, joten niille voidaan käyttää typen aineominaisuuksia. Ilman inerteistä kaasuista käytetäänkin usein nimitystä raakatyppi ( $N_{2r} = N_2 + A + CO_2$ ). Raakatyppi siirtyy savukaasuihin sellaisenaan. Sen koostumus saadaan taulukosta 3.2. Raakatyypin määrä on  $3,77 \cdot$  hapen määrä.

Taulukko 3.2. Ilman koostumus.

$x$	$M_r$	$xM_r$	$W = xM_r/M$	
0,7809	28,0134	21,8737	0,7553	»Raakatyppi» = $N_2 + A + CO_2$ $M_r = \frac{22,2604}{0,7905} = 28,160$
0,2095	31,9988	6,7037	0,2314	
0,0093	39,948	0,3715	0,0128	
0,0003	44,010	0,0132	0,0005	
$\Sigma = 1,0000$	$\Sigma = M_r = 28,964$	$\Sigma = 1,000$		

Samoin ilman tai polttoaineen sisältämä vesihöyry siirtyy savukaasuihin sellaisenaan. Kaasuseoksessa olevan vesihöyryn mooliosuus saadaan seuraavasti:

$$p_h = \varphi p'_h \quad (3.2.)$$

$$x_{H_2O} = \frac{p_h}{p_{tot}} \quad (3.3)$$

missä

- $\varphi$  = suhteellinen kosteus
- $p_h$  = vesihöyryn osapaine kaasussa
- $p'_h$  = vesihöyryn kyllästyspaine ko. lämpötilassa
- $x_{H_2O}$  = vesihöyryn mooliosuus kaasussa

Kaasuseoksen koostumus esitetään tavallisesti tilavuusprosentteina (tilavuudet kokonaispaineessa). Jos seos sisältää kaasuja, joiden moolitilavuus poikkeaa huomattavasti ideaalikaasun moolitilavuudesta, eivät tilavuusosat vastaa suoraan mooliosuuksia, vaan yksityisten kaasujen moolitilavuudet on silloin otettava huomioon.

Taulukon 3.1 reaktioyhtälöiden perusteella voidaan laskea kaikkien tavallisimpien polttoaineiden teoreettinen ilman tarve ja savukaasujen koostumus, kun polttoaineen koostumus tunnetaan. Polttoaineen koostumuksen perusteella saadaan reaktioyhtälöistä kemiallisesti oikeaan palamiseen tarvittava ilmamäärä. Tätä polttoaine - ilma -suhdetta sanotaan stökiometriseksi eli teoreettiseksi suhteeksi. Jos polttoaine sisältää happea, se luonnollisesti vähentää ilmasta otettavan hapen tarvetta samalla määrällä. On tarkoituksenmukaista käyttää laskuissa mooleja ja suorittaa laskut taulukkomuodossa. Kaasuseosten laskut on edullista suorittaa kuivan kaasun koostumuksen perusteella, jolloin kosteuden vaihtelut voidaan ottaa huomioon erikseen.

Täydellisen palamisen varmistamiseksi on ilmaa käytettävä teoreettista ilmantarvetta enemmän. Seos ei siis ole enää stökiometrinen. Ekvivalenttisuhteen asemesta ilmaistaan seosuhde palamislaskujen yhteydessä tavallisesti ilmakertoimella  $\lambda$ , jolla tarkoitetaan todellisen ilmamäärän suhdetta teoreettiseen ilmamäärään, siis

$$\lambda = \frac{I}{I_t} = \frac{O_2}{O_{2t}} \quad (3.4.)$$

Polttomoottoritekniikassa kuitenkin käytetään myös  $\lambda$ :n käänteisarvoa, josta silloin käytetään myös nimitystä ilman käyttösuhde (Luftverhältnis, relative fuel - air -ratio).

Koska teoreettisella seosuhdeella  $\lambda = 1$  saadaan palamisilman määrä ja savukaasujen koostumus muilla ilmakertoimen arvoilla esim. taulukon 3.1 esittämille reaktioille yksinkertaisesti kertomalla ilmantarve  $\lambda$ :lla ja lisäämällä reaktioyhtälön savukaasupuolelle termi  $(\lambda - 1) \cdot (\text{teoreettisen ilmantarpeen termi})$ . Samalla tavoin voidaan menetellä muissakin tapauksissa.

### 3.2 Muodostumis- ja tuntuva entalpia

Polttoaineiden palaminen on kemiallinen reaktio. Polttoaine yhtyy happeen ja samalla vapautuu reaktiolle ominainen energia lämpönä.

Reaktion reaktiolämpö määritellään erikseen vakiotilavuudessa ja vakio paineessa tapahtuville reaktioille. Käytännössä tulevat yleensä kysymykseen melkein yksinomaan vakio paineessa tapahtuvat reaktiot, joten seuraavassa tarkoitetaan reaktiolämmöllä yleensä reaktioentalpiaa.

Reaktiolämpö vakio paineessa eli reaktioentalpia = reaktiotuotteiden yhteenlaskettujen entalpioiden ja lähtöaineiden yhteenlaskettujen entalpioiden erotus.

Kemiallisissa reaktioissa säilyy alkuaineen määrä muuttumattomana. Siksi voidaan valita kullekin alkuaineelle erikseen  $H_m$  = molaarinen entalpia mielivaltaisesti jossakin

mielivaltaisessa peruslämpötilassa. Ei-alkuaineille on  $H_m$  tässä lämpötilassa laskettava alkuaineiden arvoista ja muodostumisentalpiasta.

Muodostumisentalpia  $H_{mf}$  (heat of formation) on entalpiamuutos kun aine syntyy alkuaineistaan ja paine sekä lämpötila reaktion jälkeen ovat samat kuin sitä ennen.

Aineen entalpia lämpötilassa  $T$  on siten

$$H_m = H_{mf}(T_B) + H_{mt}(T) \quad (3.5.)$$

missä  $H_{mf}(T_B)$  = muodostumislämpö, kun aine muodostuu alkuaineistaan jossakin standarditilassa. Esim. kemiassa standarditilana käytetään yleisesti 25 °C, 1 atm. Taulukko liitteenä 6. Alkuaineille siis  $H_{mf}(T_B) = 0$ .

$H_{mt}(T)$  = ”tuntuva” eli taulukoitu entalpia, jonka nollapiste on  $T_B$ :ssa. Taulukoita eri kaasuille on liitteinä 7 ja 8.

Yleensä laskuissa tarvitaan kuitenkin entalpian muutosta

$$\Delta H_m = H_m(T_2) - H_m(T_1) \quad (3.6.)$$

tämä voidaan laskea myös kaavasta

$$\Delta H_m = H_{mt}(T_2) - H_{mt}(T_1) \quad (3.7.)$$

Joskus, mikäli  $T_2$  ja  $T_1$  ovat likimain yhtä suuria, tai kaasun dimensioton molaarinen ominaislämpökapasiteetti  $C_{pm}^*$  muuttuu lämpötilavälillä suoraviivaisesti, voidaan entalpiamuutos laskea myös

$$\Delta H_m = C_{pm}^* \Delta T = C_{pm}^* (T_2 - T_1) \quad (3.8.)$$

missä

$C_{pm}^*$  = dimensioton molaarinen ominaislämpö lämpötilavälin keskipisteessä. Tärkeää ominaislämpöjen avulla laskettaessa on huomata lämpötilan yksikkö, joka voi joissain lähteissä olla  $[T] = \text{MJ/kmol}$ .

Yhtälö antaa kuitenkin vain likimääräisen arvion entalpiamuutoksesta.

### 3.3 Polttoaineen lämpöarvo

Kiinteiden tai nestemäisten polttoaineiden tarkkaa kemiallista rakennetta ei useinkaan tiedetä. Näille onkin käytössä reaktiolämmön sijasta lämpöarvo massayksikköä kohti

$$q = \frac{Q_p}{m_p} \quad (3.9.)$$

Kalorimetrinen lämpöarvo  $q_s$  määritetään polttamalla polttoainenäyte pommikalorimetrissä ja mittaamalla vapautuvan energian määrä kalorimetrin lämpötilan muutoksen avulla. Pommikalorimetrissä palamisen tuloksena syntynyt vesi on nesteenä, joten näin saatu lämpöarvo on liian korkea käytettäväksi normaalipoltossa vapautuvan lämpömäärän laskemiseen.

Tehollinen eli alempi lämpöarvo  $q_l$  eroaa kalorimetrisestä eli ylemmästä siten, että siinä palamisen tuloksena syntynyt vesi on höyryfaasissa.

Polttoaineen rikki ja typpi palavat oksideiksi pommikalorimetrissä ja muodostavat veden kanssa rikki- ja typpihappoa eksotermisellä reaktiolla. Määrittäessä lämpöarvoa tarkasti (tai jos polttoaineessa on paljon rikkiä) on syntyvien happojen määrä selvitettävä (titraamalla) ja lämpöarvoon on tehtävä ns. happokorjaus.

Eri polttoaineiden lämpöarvoille on annettu kirjallisuudessa useita korrelaatioita, joista seuraavana osa:

***Turve:***

Kuiva-aineen kalorimetrinen lämpöarvo  $q_{sk}$  [kJ/kg]

$$q_{sk} = 336 \cdot C + 1420 \cdot H - 153 \cdot O + 0,72 \cdot O^2 + 94 \cdot S \quad (3.10.)$$

jossa C, H, O ja S painoprosentteina kuiva – aineesta.

Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo  $q_{lk}$  [kJ/kg]

$$q_{lk} = q_{sk} - 219,6 \cdot H \quad (3.11.)$$

jossa H painoprosentteina kuiva-aineesta.

Kostean turpeen tehollinen lämpöarvo  $q_{lw}$  [kJ/kg]

$$q_{lw} = q_{lk} \left( \frac{100 - w}{100} \right) - 24,4 \cdot w \quad (3.12)$$

jossa  $w$  on turpeen kosteus painoprosentteina kostean turpeen painosta. Tehollisten lämpöarvojen kaavoja voidaan käyttää myös muille polttoaineille.

***Kivihiili:***

Kuiva – aineen ylempi lämpöarvo  $q_{sk}$  [kJ/kg]

kun  $O < 10$  p-% ja  $C > 83$  p-%, niin

$$q_{sk} = 4,187 \cdot (123,9 \cdot C + 388,12 \cdot H - 4269) \quad (3.13.)$$

muulloin

$$q_{sk} = 4,187 \cdot (123,9 \cdot C + 388,12 \cdot H + 0,25 \cdot O^2 - 4269) \quad (3.14.)$$

$C$ ,  $H$  ja  $O$  painoprosentteina.

***Polttoaineet yleensä:***

(edellisiä epätarkempia) [kJ/kg]

Dulong:

$$q_{sk} = 338,2 \cdot C + 1442,8 \cdot \left( H - \frac{O}{8} \right) + 94,2 \cdot S \quad (3.15.)$$

Grumell & Davies:

$$q_{sk} = (15,22 \cdot H + 937) \cdot \left[ \frac{C}{3} + H - \frac{(O - S)}{8} \right] \quad (3.16.)$$

kaavoissa  $C$ ,  $H$ ,  $O$  ja  $S$  ovat kuiva – aineen pitoisuuksia painoprosentteina.

**Laskuesimerkki:** Turpeen kuiva-aineen koostumus on seuraava: hiiltä 55 p-%, vetyä 5,5 p-%, rikkiä 0,2 p-%, happea 32,6 p-%, typpeä 1,7 p-% ja tuhkaa loput. Turpeen vesipitoisuus on poltettaessa 45 p-%. Polttoilma tulee polttoon tilassa 1 bar ja 285 K (suht. kosteus 0,7). Laske polton teoreettinen ilmantarve sekä syntyvän savukaasun määrä ja komponenttien mooliosuudet. Polttoaineen rikki hapettuu kokonaan SO<sub>2</sub>:ksi.

**Ratkaisu:** Lasketaan aluksi kostean polttoilman sisältämän vesihöyryn ja kuivan ilman osuuksien moolisuhde kaavojen 2.77 ja 2.78 sekä monisteen liitteen 2 avulla. Laskut suoritetaan alla olevan taulukon mukaisesti tarkastelemalla 1 kg märkää turvetta. Hapentarpeet ja savukaasumäärät saadaan taulukon 2.4 reaktioyhtälöistä. Polttoaineen tyyppi ja vesihöyry siirtyvät sellaisenaan savukaasuihin. Tuhka ei siirry savukaasuihin.

			mol/kg		CO2	SO2	N2	H2O	O2
	g/mol	g/kg pa	pa	O2-tarve					
C	12,010	302,50	25,187	25,187	25,187				
H2	2,016	30,25	15,005	7,502				15,005	
O2	32,000	179,30	5,603	-5,603					
N2	28,010	9,35	0,334				0,334		
S	32,060	1,10	0,034	0,034		0,034			
H2O	18,020	450,00	24,972					24,972	
Tuhka		27,50							
<b>YHT</b>		<b>1000,00</b>		<b>27,121</b>	<b>25,187</b>	<b>0,034</b>	<b>0,334</b>	<b>39,977</b>	
Hapentarve				27,121					
Typpeä ilmasta ( $\lambda * 3,77 * N_{O_2}$ )				102,246			102,246		
Happea savukaasuissa ( $(\lambda - 1) * N_{O_2}$ )				0,000					0,000
Kosteutta palamisil- massa				0,000				0,000	
Savukaasujen (todelliset) määrät mol/kg pa					<b>25,187</b>	<b>0,034</b>	<b>102,580</b>	<b>39,977</b>	<b>0,000</b>

Kuivaa savukaasua 127,8 mol/kg pa

Kostea savukaasua 167,8 mol/kg pa

Kuivaa ilmaa 129,4 mol/kg pa

Kostea ilmaa 129,4 mol/kg pa

SAVUKAASUN KOOSTUMUS		Osuus
CO2	$X_{CO_2}/X_{sk}$	<b>0,1501</b>
H2O		<b>0,2383</b>
SO2		<b>0,00020</b>
N2		<b>0,6114</b>
O2		<b>0,00000</b>
summa		<b>1,00000</b>

Taulukossa 3.3 on listattu yleisimpien polttoaineiden palamislämpöjen arvoja ja eräitä muita tarpeellisia parametreja. Keskimäärin hiilivetytypolttoaineelle lämpöarvo on n. 44 MJ/kg.



Taulukko 3.3. Hiilivetyypolttoaineden ominaisuuksia

Poltto- aine	Mooli- massa (kg/kmol)	Höyryst. lämpö (kJ/kg)	Palamis- lämpö (MJ/kg)	Stökiöm. seos (til-%)	Syttymisrajat		Syttymis- Adiabaatt.	
					Laiha (%)	Rikas (%)	lämpötila (°C)	lämpötila (°C)
Asetoni	58,1	521	-	4,97	59	233	561	2104
Asetyleeni	26	----	48,2	7,72	31	----	305	----
Bentseeni	78,1	393	40,6	2,71	43	336	592	2288
n-Butaani	58,1	386	45,7	3,12	54	330	431	2238
1-Butaani	56,1	391	45,2	3,37	53	353	443	2302
Hiilimonoksidi	28	212	----	29,5	45	251	609	-----
Sykloheks.	84,2	358	43,8	2,27	48	401	270	2232
n-Dekaani	142,3	277	44,6	1,33	45	356	232	2268
Etaani	30,1	488	47,5	5,64	50	272	472	2227
Eteeni	28,1	484	47,2	6,52	41	610	490	2357
Etyylialkoh.	46,1	856	----	6,52	---	---	392	----
n-Heptaani	100,2	316	44,9	1,87	53	450	247	2196
n-Heksaani	86,2	335	45,1	2,16	51	400	261	2221
Vety	2	451	119,9	29,5	---	---	571	----
Vetysulfidi	34,1	551	----	12,24	---	---	290	----
Isopropyylalkoholi	60,1	665	----	4,44	---	---	456	----
Metaani	16	509	50	9,48	46	164	632	----
Metyylialk.	32	1100	---	12,24	48	408	470	----
n-Nonaani	128,3	288	44,7	1,47	47	434	234	----
n-Oktaani	114,2	300	44,8	1,65	51	425	240	----
n-Pentaani	72,1	358	45,4	2,55	54	359	284	2232
Propaani	44,1	426	46,4	4,02	51	283	504	2232
Tolueeni	92,1	363	40,9	2,27	43	322	568	2327

### 3.4 Adiabaattinen palamislämpötila / dissosiaatio

Kun palamistapahtumassa ei ole lämpöhäviöitä ympäristöön, niin tällöin syntyvää liekin lämpötilaa kutsutaan adiabaattiseksi lämpötilaksi. Se on siis kyseisen tapauksen maksimaalinen liekin lämpötila. Maksimaalinen adiabaattinen lämpötila syntyy, kun on kyseessä stökiometrinen tilanne ja kun reaktiot kulkevat tuotteiksi täydellisesti eli tällöin ei huomioida lainkaan ns. dissosiaatiota, joka tarkoittaa reaktioiden tapahtumista taaksepäin tuotteista lähtöaineiden suuntaan. Dissosiaatiota alkaa tapahtua, kun reaktion lämpötila nousee ollen erilainen eri reaktioilla.

### 3.5 Syttymis-/palamisrajat

Jos otetaan 99 % metaania ja 1 % ilmaa ja tuodaan kipinä, niin seos ei syty. Ilmaa ei ole siis tarpeeksi läsnä ja seoksen sanotaan olevan ”liian rikas”. Samoin jos otetaan 1 % metaania ja 99 % ilmaa niin ei seos syty. Tällä kertaa puolestaan metaania ei ole tarpeeksi ja seoksen sanotaan olevan ”liian laiha”. Rajat syttyvien ja ei-syttyvien seosten välillä ovat nimeltään laiha raja tai alempi syttymisraja ja rikas raja tai ylempi syttymisraja.

Palamisen rajoja ei voida laskea ilman kokeellista tietoa. Mitatut rajat ovat ainakin jossain määrin laitteen geometrian funktioita. Ne eivät ole termodynaamisia suureita, kuten tiheys tai lämpötila, vaan ne ovat luonteeltaan kineettisiä ominaisuuksia, joita voidaan mitata vain laitteessa, joissa tapahtuu nopeita ja monimutkaisia kemiallisia reaktioita. Arvot esitetään yleensä huoneen lämpötilassa. Stökiometriset konsentraatiot ja palamisrajat ilmoitetaan lähes aina yksikössä til-%, joka on sama kuin mol-%. Niiden arvot vaihtelevat laajalti polttoaineen moolimassan mukaan, kun taas massan suhteen vaihtelut ovat vähäiset.

### 3.6 Palamisreaktioiden tasapaino

Palamisprosesseissa, joissa lämpötila on korkea, palamistuotteet eivät muodostu ideaalituotteista, kuten stökiometrisissä reaktioyhtälöissä oletetaan. Todellisuudessa suurin osa aineista dissosioituu tuottaen lähtöaineita ja myös muita vähemmän tärkeitä aineita. Joissain olosuhteissa näitä välituotteita on itse asiassa suhteellisen suuri määrä. Esimerkiksi hiilivedyn ja ilman ideaaliset palamistuotteet ovat CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> ja N<sub>2</sub>. Näiden yhdisteiden dissosiaatio ja reaktiot yhdessä dissosiaatiotuotteiden kanssa tuottaa muun muassa H<sub>2</sub>, OH, CO, H, O, N, NO. Tässä luvussa käsitellään kaikkien reaktiotuotteiden mooliosuuksien laskentaa annetussa lämpötilassa ja paineessa, kun rajoittavana tekijänä on kunkin lähtöaineena olevan alkuaineen moolien lukumäärän säilyminen. Tämä alkuaineisiin liittyvä rajoitus ilmaisee vain, että C, H, O, ja N atomien lukumäärä pysyy vakiona huolimatta siitä, missä yhdisteissä ne esiintyvät.

Kemiallinen tasapaino juontaa juurensa termodynamiikan II pääsääntöön. Tarkastellaan vakio tilavuudessa olevaa adiabaattista reaktiosäiliötä, jossa tietty massa lähtöaineita muodostaa tuotteita. Kun reaktiot etenevät sekä paine että lämpötila nousevat, kunnes tasapaino on saavutettu. Tätä lopputilan tasapainoa (lämpötila, paine ja seoksen koostumus) ei voida selittää yksinomaan termodynamiikan I pääsäännön avulla vaan se vaatii myös II pääsäännön käyttöä. Tarkastellaan palamisreaktiota



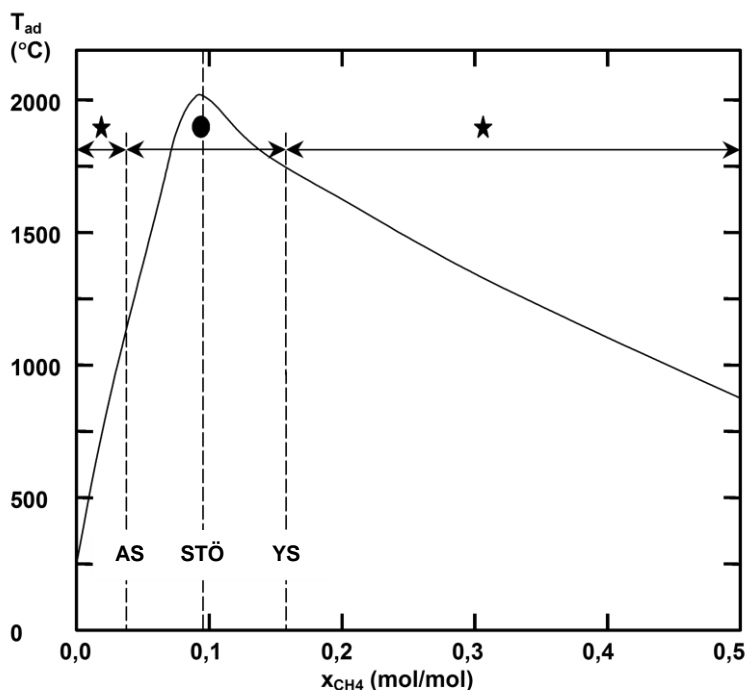
Jos loppulämpötila on tarpeeksi korkea,  $CO_2$  dissosioituu. Kun oletetaan, että tuotteet koostuvat ainoastaan  $CO_2$ ,  $CO$  ja  $O_2$ , voidaan kirjoittaa



jossa  $\alpha$  on dissosioituneen  $CO_2$  osuus. Adiabaattinen palamislämpötila voidaan laskea dissosiaatio-osuuden  $\alpha$  funktiona käyttäen edellisestä yhtälöstä. Esimerkiksi, jos  $\alpha = 1$ , lämpöä ei vapaudu ja seoksen lämpötila, paine ja koostumus pysyvät muuttumattomina. Kun  $\alpha = 0$ , lämpöä vapautuu maksimi määrä ja lämpötila ja paine ovat korkeimmat mahdolliset.

### 3.7 Palamisen kinetiikkaa ja palamisnopeus

Yhtälö 3.17 esittää hiilivedyn yleistä palamisreaktiota, joka ei ole hetkellinen vaan on sen yleinen muoto kuvaten sen lähtö- ja lopputilanteita. Jos reaktio pysäytetään ennen kuin se on tapahtunut täydellisesti, kaikki polttoaine ei kulu. Lähes kaikki kemialliset reaktiot nopeutuvat lämpötilan kasvaessa. Eli palamisen loppuunsaattamiseksi polttamalla seos tuodaan tarpeeksi korkeaan lämpötilaan tarpeeksi pitkäksi aikaa.



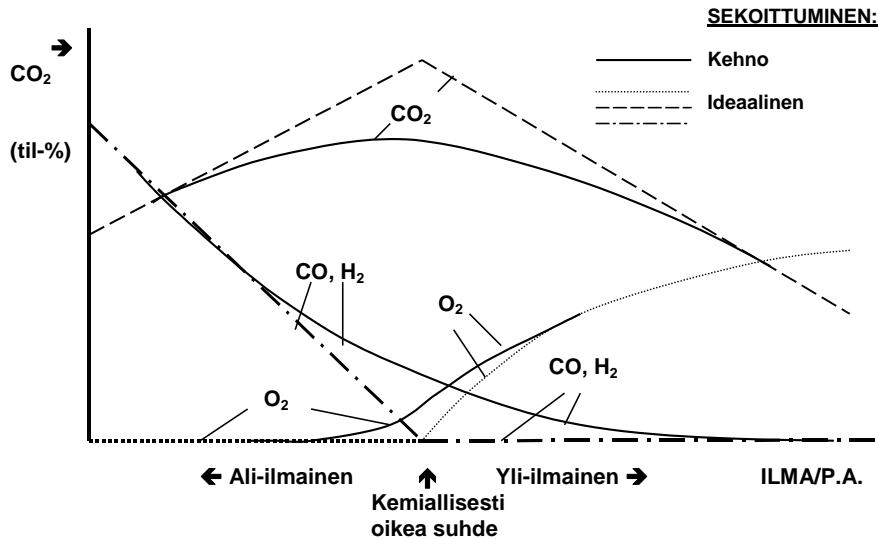
Kuva 3.1. Lasketut  $T_{ad}$  metaanin ja ilman seoksille alkaen  $T = 0^\circ C$ . Lasketut lämpötilat riippuvat valituista palamistuotteiden lämpökapasiteeteista. AS ja YS = alempi ja ylempi syttymisraja, STÖ = stökiometrinen seos, • ja \* = palavan ja ei-palavan seoksen alue.

Eräs fysikaalisen kemian perusongelmista on laskea kemiallisten reaktioiden reaktiionopeudet taustalla olevien mekanismien pohjalta. Tulokset ovat yleensä monimutkaisia ja on vaikea ennustaa jonkun reaktion nopeutta toisen reaktion tulosten pohjalta. Muutamille hyvin tutkituille reaktioille (esim.  $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ ) on olemassa lähes täydellisiä reaktiionopeuden ja taustalla olevien mekanismien kuvauksia. Suurimmalle osalle kuitenkin käytetään empiirisiä nopeusyhtälöitä tai nyrkkisääntöjä, kun arvioidaan, kuinka korkea lämpötilan on oltava ja kuinka kauan sitä täytyy pitää kyseisessä lämpötilassa, jotta reaktio olisi täydellinen.

### 3.8 Sekoittuminen palamisreaktioissa

Jotta palaminen tapahtuisi, tarvitaan polttoaineen ja hapettimen (normaalisti ilman happi) sekoittumista. Jos polttoaine ja hapetin eivät sekoitu kunnolla ja vaikka läsnä olisikin tarpeeksi ilmaa, niin palaminen ei ole täydellistä, koska osa polttoaineesta ei ole kosketuksissa ilman happimolekyylin kanssa korkean lämpötilan alueella. Kuvassa 3.2 on esitetty sekoittumisen tärkeyttä. Siinä on kuvattu hiilivetyypolttoaineen polton palamiskaasujen jakaumia ilman ja polttoaineen suhteen funktiona. Kuvassa esiintyy kahdenlaisia käyriä: yksi täydelliselle sekoittumiselle ja toinen heikolle sekoittumiselle. Riittäväällä yli-ilmalla kaikki CO ja  $\text{H}_2$  kuluu jopa sekoittumisen ollessa heikkoa. Jos lämpötila olisi tarpeeksi korkea tarpeeksi kauan, polttoaine kuluisi kokonaan (ei jäisi palamatonta CO tai  $\text{H}_2$ ) kaikissa stökiometristä tilaa korkeammassa olosuhteissa. Todellinen tilanne kuvaa heikkoa sekoittumista.

Kaikissa teollisuuden tulipesissä lämpöä siirretään pois liekistä. Se on tulipesän tarkoitus – siirtää lämpöä liekistä lämmitettävään väliaineeseen. Myös paloaika on rajoitettu. Suurempi paloaika vaatii suuremman tulipesän ja suurempia pääomakustannuksia. Käytännössä siis yritetään saada paras mahdollinen sekoitus, jotta saataisiin minimoitua polttoaineen (CO ja  $\text{H}_2$ ) määrä savukaasuissa ja palamattomien polttoaineiden aiheuttamien päästöjen määrä. (hyvä sekoitus saattaa lisätä  $\text{NO}_x$  päästöjä!)



Kuva 3.2. Ilman ja polttoaineen suhteen sekä sekoituksen vaikutus palamiskaasujen koostumukseen

### 3.9 Liekin lämpötila

Liekeillä ei ole yhtenäisiä lämpötiloja. Pienien liekkien, kuten savukkeensytytin tai kynttilä, lämpötilat voivat vaihdella jopa 400 °C näkyvän liekin osasta toiseen. Suuremmat liekit ovat tasaisempia mutta nekään eivät ole täysin samanlaisia. Adiabaattinen lämpötila taulukossa 3.3 vastaa palamista, jossa ei tapahdu lämpöhäviöitä. Avointen liekkien huippulämpötila riippuu seuraavista

- Käytetystä polttoaineesta ja hapettimesta
- Liekin koosta
- Polttoaineen ja ilman esisekoituksesta
- Polttoaineen ja ilman esilämmityksestä

Polttoaine/happi-liekit ovat kuumempia kuin polttoaine/ilma-liekit, koska polttoilman tyyppi absorboi lämpöä eli palamisen vapauttama lämpö jakaantuu useamman molekyylin kesken, ja yhtä molekyyliä kohden on vähemmän lämpöä kuin polttoaine/happi-liekillä. Korkeimmat liekin lämpötilat syntyvät asetyleeni/ilma-seoksesta. Ne ovat kuumempia, koska asetyleenin kolmoissidokseen on varastoitunut ylimääräistä energiaa, joka vapautuu palamisessa palamisreaktiossa itsessään vapautuvan energian lisäksi.

Kaikilla polttoaineilla palamislämpötilat riippuvat liekin koosta ja muodosta. Liekki kehittää lämpöä kemiallisella reaktiolla ja menettää sen ympäristöönsä valtaosin lämpösäteilynä mutta osin myös johtamalla ja sekoituessaan ympäröivän ilman kanssa. Mitä suurempi on liekin pinta-ala suhteessa vapautuvaan energiaan sitä enemmän ja nopeammin vapautuu lämpöä ja sitä alhaisempi on liekin maksimilämpötila. Ajasta

riippumattomassa tilanteessa (kuten kynttilä tai nk. Bunsen lamppu) jatkuvalla liekille voidaan kirjoittaa lauseke

Lämmön kehitys = lämmön siirtyminen ympäristöön

$$\dot{m}_{pa} \Delta h_{poltto} = kA(T_{liekki} - T_{ympäristö}) \quad (3.19.)$$

$$T_{liekki} = T_{ympäristö} + \dot{m}_{pa} \Delta h_{poltto} / (kA)$$

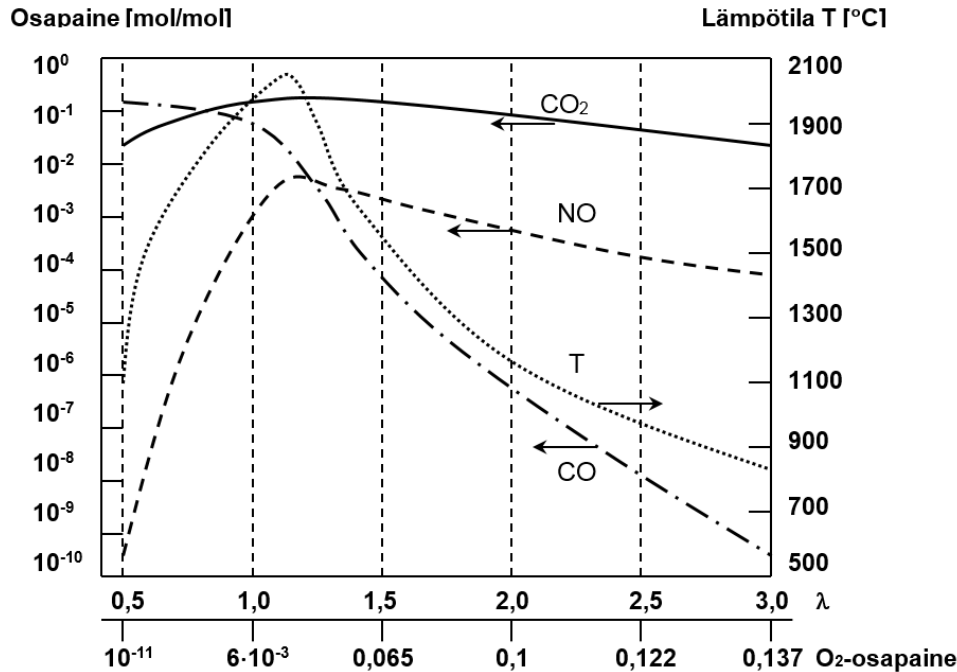
jossa lämmönsiirtokerroin  $k$  sisältää säteilyn, johtumisen ja konvektion ja  $\Delta h_{poltto}$  on palamisen entalpian muutos.

Sellaista liekkiä, jossa ilma ja polttoaine ohjataan liekkirintamaan erikseen, kutsutaan diffuusioliekeksi. Kynttilöiden, tulitikkujen ja nuotioiden sekä lähes kaikkien teollisuuden (paitsi polttomoottorin) liekit ovat diffuusioliekkejä.

Diffuusioliekin vastakohta on esisekoitettu liekki, jossa ilma ja polttoaine sekoittuvat täydellisesti ennen sytyttämistä. Autojen moottoreiden liekit ovat kokonaan esisekoitettuja. Niissä nestemäinen bensiinistä tehdään ensin pienien pisaroiden muodostama suihku, ja sen jälkeen sekoitetaan se ilman kanssa joko kaasuttimessa tai polttoaineen ruiskuttamisesta. Seosta lämmitetään sitten puristamalla, jotta polttoaine höyrystyisi ennen kuin se sytytetään. Kun kipinä sytyttää polttoaineen, liekkirintama kulkee esisekoitetun ilman ja polttoaineen seoksen läpi. Palaminen on nopeampaa kuin diffuusioliekeissä, koska ei tarvitse odottaa ilman sekoittumista polttoaineeseen. Tästä johtuen maksimilämpötilat ovat korkeammat kuin diffuusioliekeissä. Lämpötilat polttomoottoreissa ovat n. 2200 °C.

### 3.10 Ilmakerroin

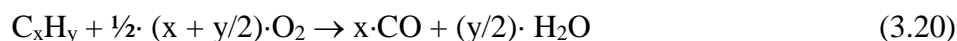
Teolliset, käytännön palamisprosessit tapahtuvat yleensä lähes stökiömetrisissä olosuhteissa (stökiömetria = polttoaineen palamiseen käytetään se happi (ilma) määrä, minkä se teoreettisesti tarvitsee – tällöin ns. ilmakerroin  $\lambda = 1$ ). Jos ilmaa on enemmän kuin ko. teoreettinen määrä,  $\lambda > 1$ , eli kyse on yli-ilmainen (~ yli-stökiömetrinen) palaminen ja vastaavasti jos ilmaa on alle ko. teoreettinen määrä,  $\lambda < 1$ , kyse on ali-ilmainen (~ ali-stökiömetrinen) palaminen. Millainen ilmakerroin kulloinkin on tarpeen, riippuu paljon polttoaineesta ja -laitteesta. Kun ilmakerroin on alle yksi,  $\lambda < 1$ , palaminen on epätäydellistä, koska happea ei ole riittävästi, joka voi tapahtua paikallisesti polttoprosessissa tai se vallitsee koko prosessissa. Epätäydellinen palaminen voi toteutua myös liian kylmässä (~ jäädytys) palamisessa tai jos palamiselle ei ole varattu riittävän pitkää aikaa tapahtua (~ viipymäaika).



Kuva 3.3. Ilmakertoimen  $\lambda$  vaikutus metaanin adiabaattisen liekin lämpötilaan sekä CO- ja NO-päästöön (perustuu tasapainolaskentaan).

### 3.11 Hiilimonoksidi CO

Hiilimonoksidin pääasiallinen syntyminen normaaleissa palamisolosuhteissa ( $\lambda > 1$ ) johtuu siitä, että hiilivety hapettuu hiilidioksidiksi ja vedeksi 2-vaiheisella mekanismilla tuottaen 1. vaiheessa hiilimonoksidia ja vettä ja 2. vaiheessa hiilimonoksidista hiilidioksidia. Reaktioyhtälöt voidaan kirjoittaa seuraaviin muotoihin:

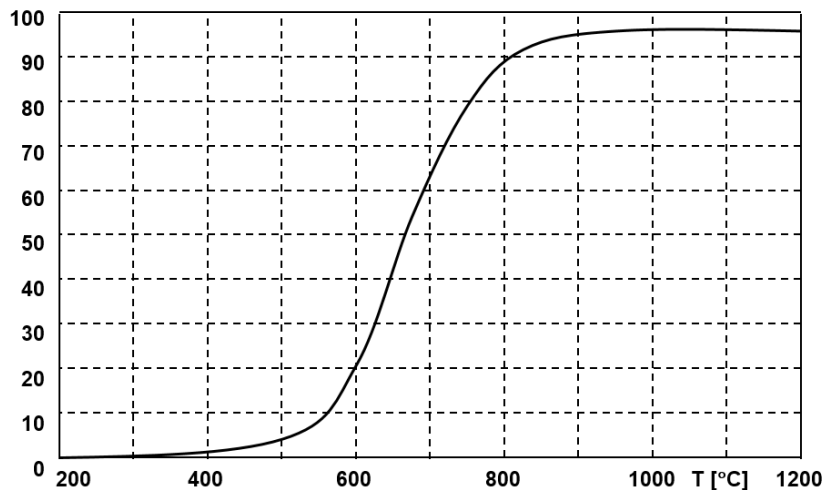


Hiilimonoksidin hapettuminen on hidas (~ viipymäaika) verrattuna hiilivedyn hapettumiseen ja se vaatii tietyn minimilämpötilan (700 °C) hapettuakseen. Nämä molemmat em. syyt aiheuttavatkin helposti CO-päästön syntymisen, jonka merkittävin lähde on kuitenkin paikallinen  $O_2$ -vaje, joka johtuu huonosta sekoittumisesta. Kuvassa 1.8 on esitetty ilmakertoimen  $\lambda$  vaikutus metaanin adiabaattiseen lämpötilaan sekä CO- ja NO-pitoisuuksiin (tasapainolaskentaan perustuva). Kuten kuvasta 3.3 nähdään, kun ilmakerroin  $\lambda$  pienenee ja lähenee arvoa  $\lambda = 1$ , CO-pitoisuus kasvaa merkittävästi (huom! osapaine akseli on logaritminen) kasvaen lisää mentäessä ali-stökiometriselle alueelle  $\lambda < 1$ . Stökiometrisissä tilanteissa,  $\lambda = 1$ , CO-pitoisuus on n. 0,01 (1 %) ja

eräs raja-arvo,  $\text{CO} = 50 \text{ mg/m}^3$  eli  $p(\text{CO}) = 4 \cdot 10^{-5}$ , saavutetaan ilmakertoimella noin  $\lambda = 1,4$  (yli-ilma). Kuvan 3.4 tilanne perustuu teoreettiseen tasapainolaskentaan, joka ei vastaa käytännön tilanteita, jolloin huono lähtöaineiden sekoittuminen muuttaa tilannetta merkittävästi CO -pitoisuutta kasvattaen.

Tällöin puhutaankin, että palaminen on sekoittumisen hallitsema tai rajoittama (hitaampana verrattuna itse reaktion nopeuteen, josta käytetään nimitystä kinetiikan hallitsema tai rajoittama), joka käytännön tilanteissa on lähes aina kyseessä. Jo aiemmin adiabaattisen lämpötilan määrittämisen yhteydessä puhuttiin dissosiaatiosta, syntyneen tuotteen muuttumisesta takaisin lähtöaineikseen korkean lämpötilan vallitessa. Hiilidioksidin muuttuminen hiilimonoksidiksi, josta käytetään myös nimitystä Boudouard -reaktio, jonka voimakkaampi muodostuminen alkaa lämpötila-alueella  $500 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$  ja saavuttaa lämpötilassa n.  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  pysyvän maksimiarvon suhteessa hiilidioksidiin ( $\sim 0,95$ ). Kuva 1.9 esittää CO/CO<sub>2</sub> tasapainokäyrän CO -pitoisuutena ilmaistuna.

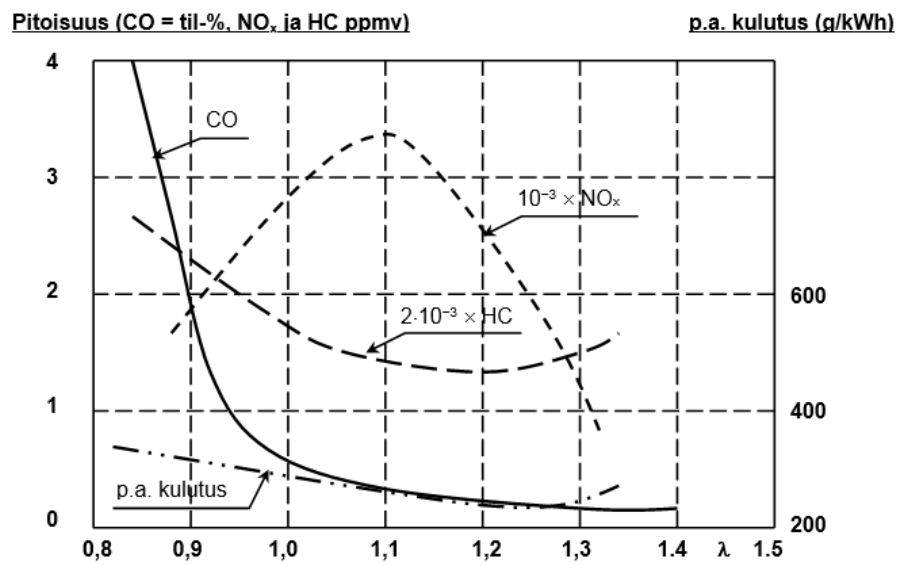
CO-pitoisuus [mol-%]



Kuva 3.4. CO:n tasapainopitoisuus CO/CO<sub>2</sub> -tasapainolaskennassa lämpötilan suhteen.

Hiilimonoksidin CO syntyminen epänormaaleissa palamisolosuhteissa eli kun  $\lambda < 1$  johtuu siitä, ettei hapetinta ( $\sim$  ilmaa) O<sub>2</sub> ole riittävästi käytettävissä joko kaiken kaikkiaan tai paikallisesti. Tässä tarkastellaan tilannetta, kun kokonaisilmakerroin  $< 1$  eli kyse on ns. rikkaasta seoksesta. Tällaiset tapaukset esiintyvät useimmiten esim. hiilivedyn palamisprosessissa polttomoottorissa, joka on kaikkien päästöjen suhteen hyvin herkkä. Tämä nähdään kuvasta 3.5.





Kuva 3.5. CO:n, HC:n, NO<sub>x</sub>:n ja polttoaineen kulutuksen riippuvuus ilmakertoimesta  $\lambda$  tyypillisellä polttomoottorilla.

## 4 KIERTOPROSESSIT

Tärkeä termodynamiikan alue on energian muuntaminen muodosta toiseen, esimerkiksi polttoaineen kemiallisen energian muuntaminen lämpöenergiaksi palamisen kautta ja sen jälkeen lämmön muuntaminen sähköenergiaksi. Käytännössä tämä energian muutos toteutetaan usein kiertoprosessien avulla lämpövoimakoneissa. Ideana on tuottaa energiaa jatkuvasti, toistuvassa syklissä, joka muuntaa energian mekaaniseksi tai sähköiseksi. (Holman, 1988, 442.)

Kiertoprosessit voidaan jakaa kiertoaineen mukaisesti joko kaasu- tai höyryprosesseihin. Kun väliaineena on kaasu, se pysyy kaasumaisessa faasissa koko prosessin ajan, kun taas höyryprosesseissa väliaineena oleva vesi läpikäy faasimuutoksen ollen osassa prosessista vettä ja toisessa osassa höyryä. Kiertoprosessit voidaan jakaa myös avoimiin ja suljettuihin. Suljetussa kiertoprosessissa työaine palautetaan alkutilaan ja kierretään uudelleen. Avoimessa kiertoprosessissa työaine vaihdetaan jokaisen kierroksen lopuksi. Esimerkiksi otto- prosessin mukaisesti toimivissa koneissa palamiskaasut poistetaan jokaisen kierron lopuksi, ja uusi puristus alkaa uudella ilma-bensiini –seoksella. (Cengel & Boles, 1998, 487.)

Prosessit jaetaan myös reversiibeihin ja irreversiibeihin eli palautuviin ja palautumattomiin. Käytännössä kaikki prosessit ovat palautumattomia, johtuen esimerkiksi kitkasta. Prosesseja yksinkertaistetaan kuitenkin usein reversiibeiksi tarkasteluja varten.

Yleisesti kiertoprosessi voidaan määrittää seuraavasti. Kun aineen tilavuus muuttuu, syntyy työ  $W = - \int p dV$ . Tämä tilavuuden muutostyö on siis negatiivinen paisunnassa ja positiivinen puristuksessa. Kun aine suorittaa prosessin, joka koostuu sekä paisunnasta, että puristuksesta ja palaa alkutilaan on nettotyö siten  $W = - \oint p dV$ , joka on sama kuin prosessitien sisäpuolelle jäävä pinta pV-tasossa.

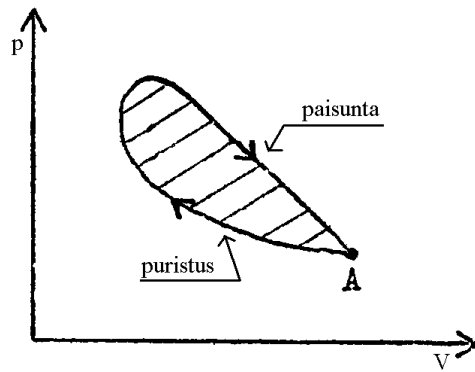
Kiertoprosessissa on sisäenergian muutos  $\Delta U = 0$ , koska U riippuu ainoastaan tilasta. I pääsäännöstä seuraa siten

$$\Delta U = Q_{rev} - \oint p dV = 0 \quad (4.1)$$

eli

$$Q_{rev} = \oint p dV \quad (4.2)$$

joten nettotyö on nettolämmön suuruinen.



Kuva 4.1. Kiertoprosessi.

## 4.1 Kiertoprosesseja, joissa väliaine on kaasu

Lämpövoimakoneiden termodynaaminen toimintaperiaate on tietyn kiertoprosessin toteuttaminen. Havainnollisuuden vuoksi tehdään seuraavat yksinkertaistukset.

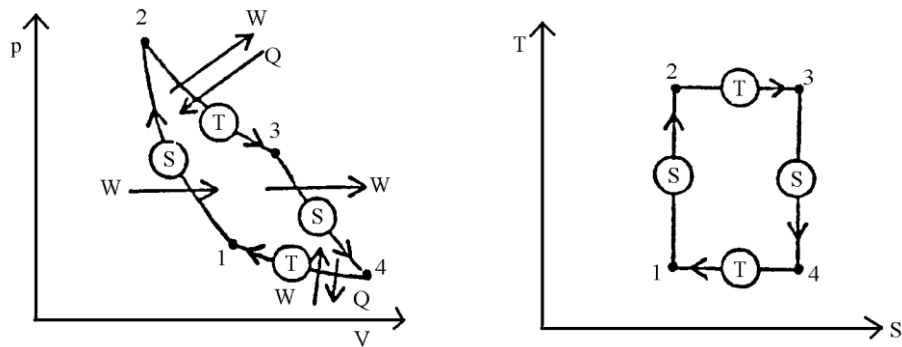
- väliaine on ideaalikaasu,  $pV_m = T$  (käytetään Rytin järjestelmää, jossa  $[T] = \text{MJ/kmol}$  ja ominaislämpökapasiteetit ovat dimensiottomia  $C^*_{pm}$  ja  $C^*_{vm}$ )
- asetetaan ainemäärä ykköseksi ( $N = 1$ ), joten ainemäärää ei merkitä kaavoihin
- lämpökapasiteetit ovat vakioita
- prosessit ovat palautuvia (reversiibeilitä), siis häviöttömiä
- kiertoprosessin aikana väliainemäärä ei muutu.

### 4.1.1 Carnot –kiertoprosessi

Yksinkertaisin palautuva kiertoprosessi on Carnot-prosessi. Siinä lämmöntuonti systeemiin tapahtuu vain yhdessä lämpötilassa  $T_{\max}$  ja lämmön poisvienti ympäristöön tapahtuu samoin vain yhdessä lämpötilassa  $T_{\min}$ . Muissa lämpötiloissa systeemi ei vaihda lämpöä ympäristön kanssa, mutta työn muodossa energiaa siirtyy systeemin ja ympäristön välillä systeemin muissakin lämpötiloissa. Prosessi koostuu siis neljästä osasta:

- isentrooppinen puristus (eli reversiibeli ja lämpöeristetty eli adiabaattinen)
- isoterminen lämmöntuonti
- isentrooppinen paisunta
- isoterminen lämmönpoisto

Carnot –prosessin on piirretty kuvassa 4.2 sekä pV- että Ts-tasoon.



Kuva 4.2. Carnot -prosessi pV- ja TS -tasoissa.

Yleisesti lämpövoimakoneiden tehokkuutta voidaan tarkastella hyötysuhteen  $\eta$  avulla.

Tarkoituksena on tuottaa mahdollisimman paljon työtä mahdollisimman pienellä lämmöntuonnilla. Hyötysuhde voidaan siis määrittää

$$\eta = \frac{\text{mitä saadaan}}{\text{mistä maksetaan}} = \frac{\text{saatu työ}}{\text{tuotu lämpö}} \quad (4.3)$$

Prosessi voidaan jakaa osaprosesseihin, joiden avulla voidaan määrittää nettotyö sekä tuotu lämpö. Osaprosesseissa tehty työ ja lämpömäärä ovat taulukon 2.3 mukaisia ja ne on koottu seuraavaan taulukkoon.

Prosessi	$Q = \int TdS$	$W = - \int pdV$
1 – 2 puristus, isentrooppi	0	$C_{Vm}^*(T_2 - T_1)$
2 – 3 lämmöntuonti, isotermi	$T_2 \ln\left(\frac{v_3}{v_2}\right)$	$T_2 \ln\left(\frac{v_2}{v_3}\right)$
3 – 4 paisunta, isentrooppi	0	$C_{Vm}^*(T_4 - T_3)$
4 – 1 lämmönpoisto, isotermi	$T_1 \ln\left(\frac{v_1}{v_4}\right)$	$T_1 \ln\left(\frac{v_4}{v_1}\right)$

Laskemalla yhteen osaprosesseissa tehty työ saadaan kiertoprosessin nettotyöksi siis

$$\sum W = \ln\left(\frac{v_3}{v_2}\right)(T_2 - T_1) \quad (4.4)$$

Joten Carnot - prosessin hyötysuhde:

$$\eta = \frac{\ln\left(\frac{v_3}{v_2}\right)(T_2 - T_1)}{T_2 \ln\left(\frac{v_3}{v_2}\right)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (4.5)$$

Tätä hyötysuhdetta voidaan parantaa joko nostamalla ylempää lämpötilaa  $T_2$  tai laske-  
malla alemmaa lämpötilaa  $T_1$ . Usein lämpövoimakoneiden materiaalit asettavat kuiten-  
kin rajoituksensa ylempään lämpötilan nostamiselle ja ympäristö puolestaan alemman  
lämpötilan laskemiselle.

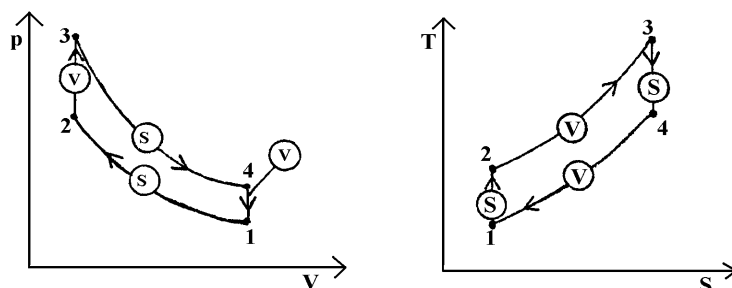
Carnot-hyötysuhde on paras mahdollinen hyötysuhde, joka lämpövoimakoneella voi-  
daan saavuttaa käyttäen tiettyjä lämpötiloja  $T_1$  ja  $T_2$ . Carnot-kiertoprosessi on kuitenkin  
vaikea toteuttaa käytännössä. Esimerkiksi isoterminen puristus on vaikea saada aikaan,  
varsinkin kun koneelta vaaditaan pyörimisnopeutta tarpeellisen tehon tuottamiseksi.  
Mäntäkoneena toteutettuna olisi tarvittava sylinteritilavuus kohtuuttoman suuri, koska  
paisunta tapahtuu alkutilaan paineeseen saakka (= ulkoilmanpaineeseen). Kone tulisi  
erittäin kömpelöksi.

#### 4.1.2 Polttomoottoriprosessit

Koska koneen hinta riippuu koneen koosta, ja näin ollen sylinteritilavuudesta, pyritään  
mäntäkoneessa saamaan maksimiteho tietystä sylinteritilavuudesta. Tämä on tunnus-  
omaista polttomoottoreille. Tavallisimmat polttomoottoriprosessit ovat OTTO- ja DIE-  
SEL – prosessit.

##### Otto – prosessi

Otto-prosessia toteutetaan bensiinimoottoreissa. Siinä polttoaineen ja ilman seos puris-  
tetaan isentrooppisesti paineesta 1 paineeseen 2. Lämmöntuonti tapahtuu vakiotilavuu-  
dessa eli isokoorisesti. Paisunta on jälleen isentrooppinen ja lämmönpoisto isokoorinen.  
Oheisessa kuvassa 4.3. on esitetty Otto-prosessi pV- ja Ts-tasoissa.



Kuva 4.3. Otto – prosessi pV- ja Ts-tasoissa.

Seuraavassa taulukossa on jälleen koottu osaprosessien työt ja lämmöt, joiden avulla voidaan laskea koko prosessin nettotyö ja sen avulla puolestaan prosessin hyötysuhde.

Prosessi	$Q = \int TdS$	$W = - \int pdV$
1 – 2 puristus, isentrooppi	0	$C_{Vm}^* (T_2 - T_1)$
2 – 3 lämmöntuonti, isokoori	$C_{Vm}^* (T_3 - T_2)$	0
3 – 4 paisunta, isentrooppi	0	$C_{Vm}^* (T_4 - T_3)$
4 – 1 lämmönpoisto, isokoori	$C_{Vm}^* (T_1 - T_4)$	0

Nettotyöksi saadaan

$$\sum W = C_{Vm}^* (T_2 - T_1 + T_4 - T_3) \quad (4.6)$$

ja hyötysuhteeksi

$$\eta = \frac{-W}{Q_{uotu}} = \frac{C_{Vm}^* (T_3 - T_4 - T_2 + T_1)}{C_{Vm}^* (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (4.7)$$

Isentroopille

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{1/C_{Vm}^*} = \left( \frac{v_4}{v_3} \right)^{1/C_{Vm}^*} = \frac{T_3}{T_4} \quad (4.8)$$

$$\therefore \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad (4.9)$$

Otetaan käyttöön puristussuhde  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{mv_1}{mv_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (4.10)$$

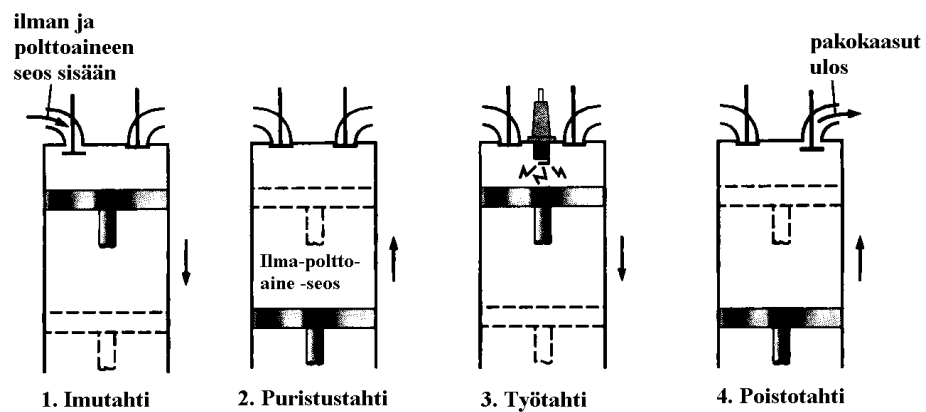
joten hyötysuhde voidaan lausua myös

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{1/C_{Vm}^*}} \quad (4.11)$$

Käyttämällä isentrooppivakiota  $\gamma$  hyötysuhde voidaan lausua myös

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \quad (4.12)$$

Ottoprosessissa  $T_2 < T_{\max}$ , joten hyötysuhde on huonompi kuin Carnot -prosessin. Hyötysuhde riippuu myöskin puristussuhteesta  $\varepsilon$ . Tavallisessa bensiinipolttomootorissa yritetään toteuttaa Otto -prosessia. Siinä bensiini-ilmaseos puristetaan vaiheessa 1 - 2 jonka jälkeen seos sytytetään sähkökipinällä. Puristusvaiheessa seoksen lämpötila ja paine kasvavat. Puristussuhteella on siten maksimiarvo, koska lämpötilan noustessa seos voi syttyä itsestään ja syntyy ns. nakutusilmiö.



Kuva 4.4. 4-tahttisen ottomootorin toimintaperiaate. (Cengel & Boles 1998, 495.)

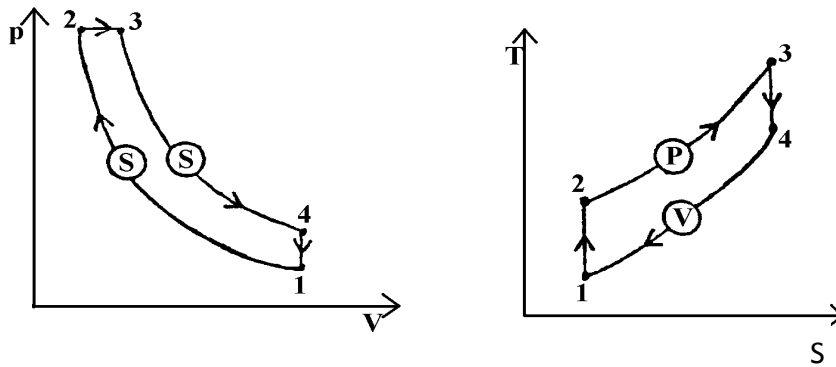
1. Imutahti: imuventtiili auki, mäntä alas.
2. Puristustahti: venttiilit kiinni, mäntä ylös.
3. Työtahti: venttiilit kiinni, yläkuolokohdassa kipinäsytytys, mäntä alas.
4. Poistotahti: pakuventtiili auki, mäntä ylös.

Kunkin tahdin aikana kampiakseli pyörähtää puoli kierrosta. Kiertoprosessin kannalta moottorin keskeiset osat ovat imu- ja pakuventtiili, sylinteri, mäntä, kiertokanki, kampiakseli ja sytytystulppa.

## Diesel-prosessi

Dieselprosessi muistuttaa ottoprosessia isentrooppisen puristuksen ja paisunnan sekä isokoorisesta lämmönpoistosta. Lämmöntuonti ei kuitenkaan tapahdu isokoorisesti, vaan sen sijaan isobaarisesti.

Diesel-koneessa voidaan käyttää suurempia puristussuhteita kuin ottoprosessissa, koska nakutusilmiötä ei esiinny. Prosessissa puristetaan ainoastaan ilmaa ja polttoainetta lisätään ruiskuttamalla puristusvaiheen jälkeen. Syttyminen tapahtuu, kun puristuksen loppulämpötila on tarpeeksi korkea.



Kuva 4.5. Diesel -prosessi pV- ja TS -tasoissa.

Prosessi	$Q = \int TdS$	$W = - \int pdV$
1 – 2 puristus, isentrooppi	0	$C_{Vm}^* (T_2 - T_1)$
2 – 3 lämmöntuonti, isobaari	$C_{pm}^* (T_3 - T_2)$	$p_2 (V_2 - V_3)$
3 – 4 paisunta, isentrooppi	0	$C_{Vm}^* (T_4 - T_3)$
4 – 1 lämmönpoisto, isokoori	$C_{Vm}^* (T_1 - T_4)$	0

Käytetään seuraavia lyhennyksiä:

$$\text{Puristussuhde} \quad \varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad (4.13)$$

$$\text{Täytössuhde} \quad \varphi = \frac{V_3}{V_2} \quad (4.14)$$

$$\text{Paisuntasuhde} \quad \frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_3} = \frac{\varepsilon}{\varphi} \quad (4.15)$$

Dieselprosessin hyötysuhteen kaavaksi saadaan ( $\gamma$ =isentrooppivakio)

$$\eta = 1 - \left( \frac{1}{\varepsilon^{1/C_{Vm}^*}} \right) \left( \frac{\varphi^\gamma - 1}{\gamma(\varphi - 1)} \right) = 1 - \left( \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \right) \left( \frac{\varphi^\gamma - 1}{\gamma(\varphi - 1)} \right) \quad (4.16)$$

Tekijä  $\frac{\varphi^\gamma - 1}{\gamma(\varphi - 1)}$  on  $> 1$  (raja-arvo  $\varphi \rightarrow 1$  on 1).



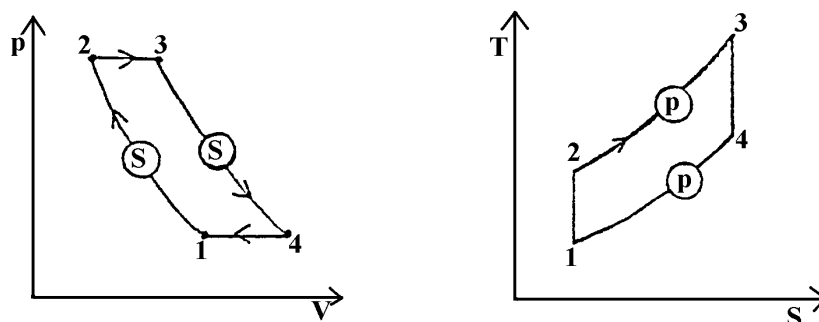
Samalla puristussuhteella on siis dieselprosessin hyötysuhde pienempi kuin ottoprosessin. Dieselkoneessa voidaan kuitenkin sallia suurempia puristussuhteita kuin ottokoneessa, joten sen hyötysuhde on käytännössä parempi. Suurempi puristussuhde merkitsee samalla suurempia paineita, joten lujuusvaatimukset kasvavat ja kone tulee suhteellisesti painavammaksi (ja siten myöskin kalliimmaksi).

Diesel- ja ottoprosessien käytännön toteutusta ja toimintaperiaatetta tarkastellaan tarkemmin luvussa 9.

### 4.1.3 Kaasuturbiini –prosessit

#### Brayton-prosessi

Brayton-prosessi on ideaalinen kaasuturbiiniproessi. Siinä kaasu puristetaan isentrooppisesti paineesta 1 paineeseen 2. Lämmöntuonti tapahtuu vakipaineessa eli isobaarisesti. Paisunta on jälleen isentrooppinen ja lämmönpoisto isobaarinen.



Kuva 4.6. Brayton –prosessi pV- ja TS –tasoissa.

Prosessi	$Q = \int TdS$	$W = - \int pdV$
1 – 2 puristus, isentrooppi	0	$C_{Vm}^*(T_2 - T_1)$
2 – 3 lämmöntuonti, isobaari	$C_{pm}^*(T_3 - T_2)$	$-p_2(V_3 - V_2)$
3 – 4 paisunta, isentrooppi	0	$C_{Vm}^*(T_4 - T_3)$
4 – 1 lämmönpoisto, isobaari	$C_{pm}^*(T_1 - T_4)$	$-p_4(V_1 - V_4)$

Käytetään lyhennystä painesuhde  $\Pi$

$$\Pi = \frac{p_2}{p_1} \quad (4.17)$$

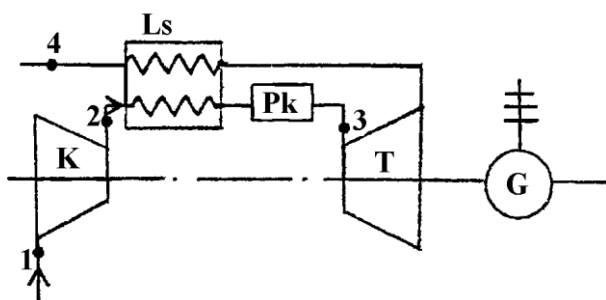
Hyötysuhde

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\Pi^{1/\gamma}} = 1 - \Pi^{-1/\gamma} \quad (4.18)$$

siis huonompi kuin Carnot.

Vaikka ideaalinen Brayton-prosessi on suljettu, se toteutetaan yleisesti avoimena prosessina kaasuturbiinikoneikossa. Puristus tapahtuu kompressorissa, jossa ilman paine ja lämpötila nousevat. Korkeapaineinen ilma etenee polttokammioon, jossa polttoaine poltetaan vakioaineessa. Tuloksena oleva korkeapaineinen savukaasu paisuu turbiinissa ilmanpaineeseen, tuottaen täten työtä. Pakokaasuja ei kierrätetä, vaan ne poistetaan, joten systeemi luokitellaan avoimeksi.

Turbiinista lähtevät pakokaasut ovat yleensä huomattavasti kuumempia kuin puristettu ilma. Kaasuturbiinikoneikkoon voidaankin lisätä lämmönsiirrin, jotta kuumien pakokaasujen lämpö saadaan käytettyä hyödyksi. Lämmönsiirrin parantaa hyötysuhdetta, koska polttoainetta tarvitaan vähemmän. Toisaalta lämmönsiirtimeen kustannukset ovat melko korkeat saatavaan hyötyyn nähden, joten lämmönsiirrintä ei yleensä käytetä nykyisissä kaasuturbiineissa. (Cengel & Boles 1998, s. 508 – 509, 516 – 517.)

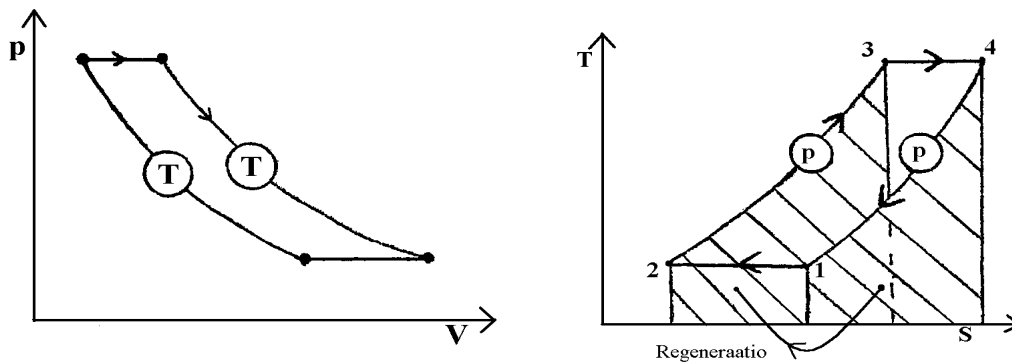


Kuva 4.7. Kaasuturbiinin koneikko (mukana lämmönsiirrin, jota yleensä ei käytetä).

Kaasuturbiinikoneikon hyötysuhdetta voidaan parantaa käyttämällä useampivaiheista puristusta välijäähdytyksellä ja useampivaiheista paisuntaa välilämmityksellä. Kun vaiheiden lukumäärä lähestyy ääretöntä, lähestyy prosessi Ericsson-prosessia.

## Ericsson-prosessi

Ericsson-prosessissa edellytetään lämmön regeneraatiota: lämmönsiirtimien avulla siirretään lämmönpoiston (4 - 1) aikana vapautunut lämpömäärä lämmöntuontiin (2 - 3).



Kuva 4.8. Ericsson-prosessi pV- ja Ts-tasoissa.

Prosessi	$Q = \int TdS$	$W = - \int pdV$
1 - 2 puristus (lämmönpoisto), isotermi	$T_1 \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$	$-T_1 \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = -T_1 \ln \Pi$
2 - 3 lämmöntuonti (regeneraatiolla), isobaari	$C_{pm}^* (T_3 - T_2)$	$-p_2 (V_3 - V_2)$
3 - 4 paisunta (lämmöntuonti), isotermi	$T_3 \ln\left(\frac{p_3}{p_4}\right)$	$-T_3 \ln\left(\frac{p_3}{p_4}\right) = -T_3 \ln \Pi$
4 - 1 lämmönpoisto (regeneraatiolla), isobaari	$C_{pm}^* (T_1 - T_4)$	$-p_4 (V_1 - V_4)$

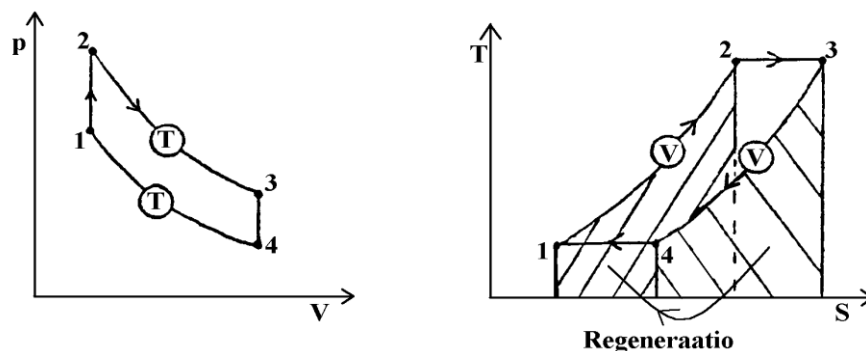
Ericsson-prosessin hyötysuhteeksi saadaan:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (4.19)$$

$T_3 = T_{\max}$ , joten hyötysuhde on sama kuin Carnot-hyötysuhde.

### 4.1.4 Stirling-prosessi ("kuumailmakone")

Stirling-prosessi koostuu neljästä täysin reversiibelistä osaprosessista: isoterminen paisunta, isokoorinen lämmöntuonti (joka toteutetaan regeneraationa lämmönpoistosta), isoterminen puristus ja isokoorinen lämmönpoisto.



Kuva 4.9. Stirling -prosessi pV- ja TS -tasoissa.

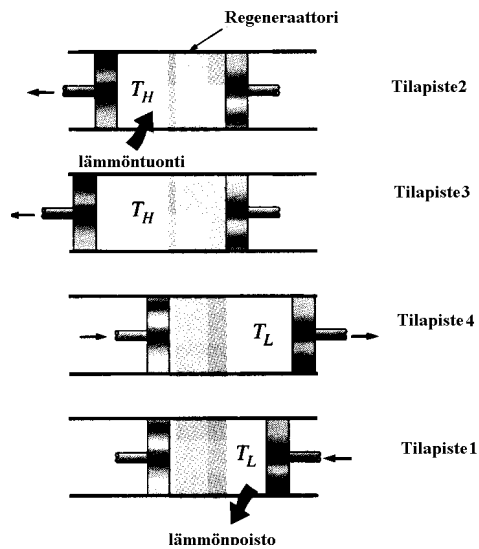
Prosessi	$Q = \int TdS$	$W = - \int pdV$
1 – 2 lämmöntuonti regeneraatiolla, isokoori	$C_{Vm}^* (T_2 - T_1)$	0
2 – 3 lämmöntuonti ulkoa, paisunta, isotermi	$T_2 \ln \left( \frac{v_3}{v_2} \right)$	$-T_2 \ln \left( \frac{v_3}{v_2} \right)$
3 – 4 lämmönpoisto regeneraatiolla, isokoori	$C_{Vm}^* (T_4 - T_3)$	0
4 – 1 lämmönpoisto, puristus, isotermi	$-T_1 \ln \left( \frac{v_4}{v_1} \right)$	$T_1 \ln \left( \frac{v_4}{v_1} \right)$

Jos saavutetaan 100-prosenttinen regeneraatio, on  $Q_{3-4} = Q_{1-2}$ , jolloin Stirling-prosessin hyötysuhde on sama kuin Carnot.

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (4.20)$$

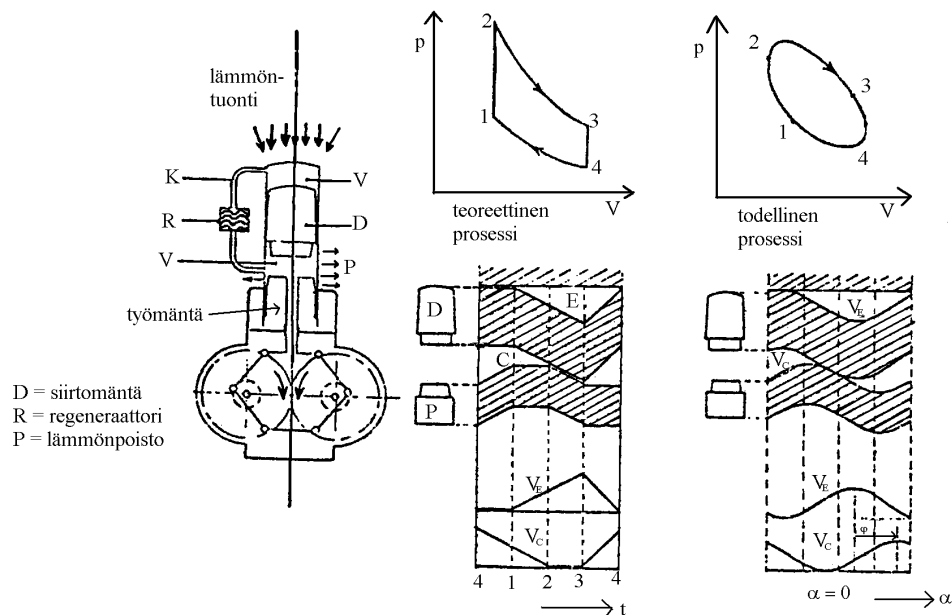
Stirling-prosessin toteuttaminen on melko monimutkaista. Periaatteessa se voidaan toteuttaa kuvan 4.10. mukaisella hypoteettisella koneella. Aluksi kaikki työaine (kaasu) on vasemmassa kammiossa. Prosessin 2 – 3 aikana ulkoisesta lähteestä tuodaan lämpöä. Kaasu laajenee isotermisesti, jolloin mäntä liikkuu ulospäin tehden työtä. Samalla paine putoaa. Välillä 3 – 4 molemmat männän liikkuvat yhtä nopeasti samaan suuntaan, jotta tilavuus pysyy vakiona. Kun kaasu kulkee regeneraattorin läpi, lämpö siirtyy regeneraattoriin ja lämpötila putoaa  $T_H$ :sta  $T_L$ :aan. Välillä 4 – 1 oikeanpuoleinen mäntä

liikkuu sisäänpäin, puristaen kaasua. Puristuksen aikana tapahtuu isoterminen lämmönpoisto lämpötilassa  $T_L$ . Lopuksi välillä 1 – 2 molemmat männät liikkuvat vasemmalle samalla vauhdilla (tilavuus vakio), pakottaen kaiken kaasun taas vasempaan kammiioon. Kaasun lämpötila nousee alemmasta lämpötilasta ylempään sen kulkiessa regeneraattorin läpi.



Kuva 4.10. Stirling-prosessin toteuttaminen. (Cengel & Boles, 1998, s. 506.)

Kuvassa 4.11. on esimerkki Stirling-prosessin mukaan toimivasta todellisesta koneesta.



Kuva 4.11. Stirling-prosessin mukaan toimiva kone.

### 4.1.5 Kiertoprosessien vertailua

Lämpövoimakoneen paras mahdollinen hyötysuhde on Carnot-hyötysuhde

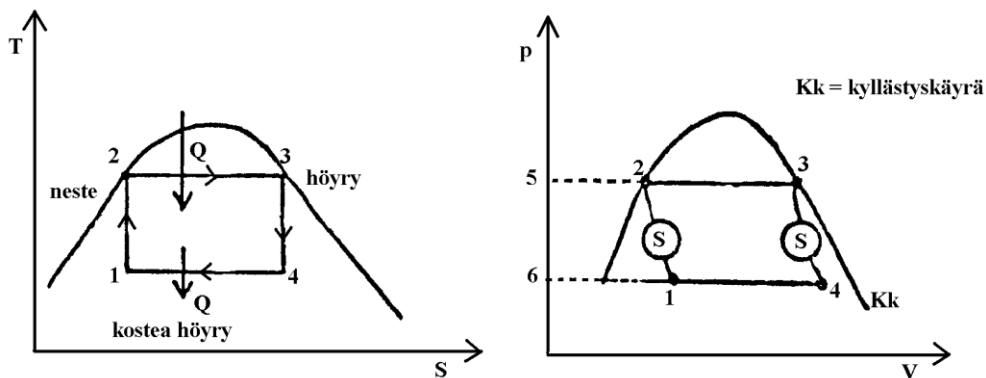
$$\eta = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} \quad (4.21)$$

Siksi voidaan pitää yleisenä pääpyrkimyksenä lämpövoimakoneiden kehittämisessä maksimilämpötilan nostamista koska  $T_{\min}$  määräytyy ympäristön lämpötilasta. Maksimilämpötilalla tarkoitetaan siis tässä tapauksessa lämpötilaa, jossa lämpöä tuodaan prosessiin. Maksimilämpötilaa rajoittavat kuitenkin koneen materiaalien ominaisuudet. Jaksottaisesti toimivissa (esim. polttomoottori) voidaan sallia korkeampia huippulämpötiloja kuin virtauskoneissa (esim. kaasuturbiini), koska huippu on tilapäinen. Polttomoottorin maksimilämpötila on luokkaa 2000 K, kun tämä kaasuturbiinissa on 1400 K – 1600 K materiaalien lämmönkestävyysyistä johtuen.

## 4.2 Kiertoprosesseja höyryille

### 4.2.1 Yleistä

Päinvastoin kuin kaasuilla, voidaan höyryillä helposti toteuttaa isoterminen prosessi käyttämällä hyväksi höyrystymistä ja lauhtumista. Nämähän tapahtuvat vakio- $p$ -lämpötilassa paineen ollessa vakio. Höyryillä voidaan siis päästä lähelle Carnot-prosessin toteutusta.



Kuva 4.12. Carnot -prosessi höyrylle.

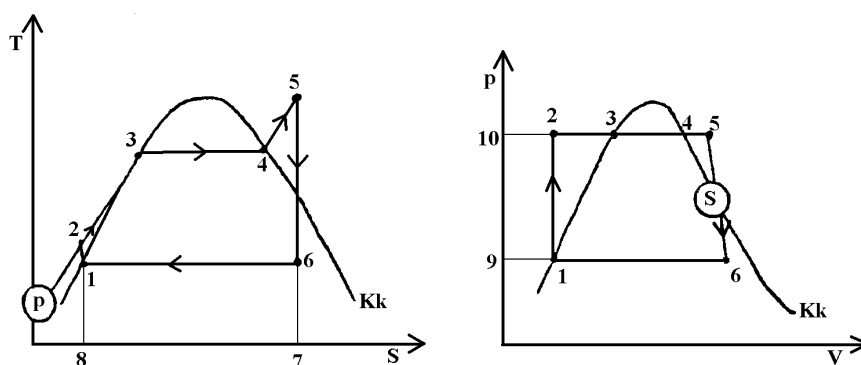
Kuvan prosessi koostuu seuraavista osista

- 1 - 2 isentrooppinen puristus nesteeksi
- 2 - 3 isoterminen lämmöntuonti, neste höyrysty
- 3 - 4 isentrooppinen paisunta
- 5 - 1 isoterminen lämmönpoisto, höyry nesteytyy

Tämä prosessi olisi kuitenkin huono käytännössä, koska teknillinen puristustyö 1256 on huomattavan suuri turbiinin tai höyrykoneen työhön 3456 verrattuna. Tietyn nettotyön saamiseksi tarvitaan siis suuret koneet. Lisäksi puristuksen ja paisunnan hyötysuhteet ovat  $< 1$ . Sitäpaitsi neste-höyry-seoksen puristaminen isentrooppisesti tuottaa suuria vaikeuksia, koska vain höyry pyrkii kuumenemaan ja tästä olisi lämmön siirryttävä nestefaasiin tarpeeksi nopeasti. Jos puristetaan seos kokonaan nesteeksi, syntyy vielä vesi-iskun vaara. Siksi todellisuudessa käytetäänkin Clausius-Rankine-prosessia. Tässä lämmönpoistovaihe jatkuu täydelliseen nesteytymiseen saakka, eli kyllästyskäyrälle asti.

#### 4.2.2 Clausius - Rankine –prosessi (höyryvoimaprosessi)

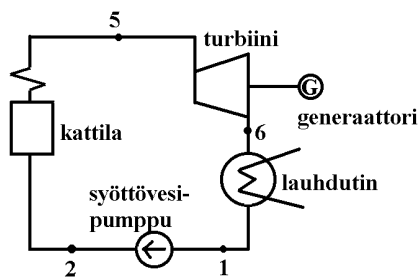
Useimmat Carnot-prosessin käytännön vaikeudet voidaan ratkaista tulistamalla höyry kattilassa ja lauhduttamalla se kokonaan nesteeksi lauhduttimessa. Clausius-Rankine-prosessi (kts. kuva 4.13) eroaa Carnot-prosessista siten, että lämmöntuonti ei tapahdu vakioämpötilassa, vaan kylläinen neste on ensin lämmöntuontiprosessin aikana lämmitettävä höyrystymislämpötilaan. Tämä laskee lämmöntuonin keskilämpötilaa ja siten huonontaa hyötysuhdetta Carnot-prosessiin verrattuna.



Kuva 4.13. Clausius – Rankine –prosessi pV- ja TS –tasossa.

Vaiheessa 1 – 2 nesteen paine nostetaan höyrystymislämpötilaa  $T_3$  vastaavaan kyllästysarvoon syöttövesipumpun avulla. Ts –tasossa tämä vaihe esitetään selvyiden vuoksi

liioiteltuna, todellisuudessa lämpötila ei nouse kovinkaan huomattavasti. Vaiheessa 2 - 3 neste kuumennetaan kattilassa höyrystymislämpötilaan tässä paineessa. Neste höyrystyy kattilassa vaiheessa 3 - 4. Vaiheessa 4 - 5 höyry tulistetaan kattilassa. Tulistettu höyry siirtyy vaiheessa 5 - 6 turbiiniin jossa se paisuu isentrooppisesti tuottaen samalla työtä turbiinin kytketyn generaattorin välityksellä. Höyryn paine ja lämpötila alenevat. Pisteessä 6 höyry siirtyy lauhduttimeen, jossa se lauhtuu kylmävedeksi välillä 6 - 1. Lauhdutin on käytännössä suuri lämmönsiirrin, jossa lauhtumisessa vapautuva lämpö poistetaan jäädyttämällä se esimerkiksi meriveden avulla. Clausius -Rankine -prosessin prosessikaavio on esitetty kuvassa 4.14.



Kuva 4.14. Clausius-Rankine-prosessin prosessikaavio.

Clausius-Rankine-prosessista saatavaa työtä voidaan tutkia osaprosessien avulla.

Paisuntatyö

$$= h_5 - h_6 = 5 - 6 - 9 - 10 \text{ pV -piirroksessa.}$$

Nesteen puristustyö

$$= h_2 - h_1 = 1 - 2 - 9 - 10 \text{ pV -piirroksessa.}$$

$h_5$  = isobaarin 10 - 2 - 3 - 4 - 5 alle jäävä pinta (koska  $dh = Tds + vdp$ ).

$h_6$  = isobaarin 9 - 1 - 6 alle jäävä pinta.

Nettotyö on siis

$$= (h_5 - h_6) - (h_2 - h_1)$$

= kuvion pinta 1234561 kummassakin piirroksessa.

Tuotu lämpö

$$= \int Tds = \bar{T} (s_5 - s_2)$$

$$= h_5 - h_2 = \text{pinta } 123456781$$



Poistettu lämpö

$$= T_1 (s_6 - s_1)$$

$$= h_6 - h_1 = \text{pinta } 6187$$

Hyötysuhteeksi saadaan siten

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{(h_5 - h_6) - (h_2 - h_1)}{h_5 - h_2} = \frac{\bar{T}(s_5 - s_2) - T_1(s_6 - s_1)}{\bar{T}(s_5 - s_2)} = 1 - \frac{T_1}{\bar{T}} \quad (4.22)$$

Pumpputyö ja pumpun teho sekä hinta ovat nyt mitättömiä verrattuina Carnot-prosessiin, joten melkein koko paisuntatyö on nettotyötä ja tullaan siis toimeen pienellä koneistolla.

Tämä on höyryvoimalaitoksen periaatteellinen etu verrattuna kaasuturbiinilaitokseen, jossa kompressorin työ saattaa olla 2/3 turbiinin työstä, joten vain 1/3 jää nettotyöksi. Turbiinin ja kompressorin yhteinen teho on siis 5 kertaa nettoteho. Sensijaan kaasuturbiinissa höyrykattilan korvaa yksinkertaisempi palokammio.

Haittana Carnot-prosessiin verrattuna on vaiheen 2 huono hyötysuhde. Tämä alentaa keskilämpötilaa jossa lämpöä tuodaan.

Tulistusvaihe 4 - 5 vastaavasti parantaa hyötysuhdetta. Toinen syy sen käyttöön on paisunnan loppupisteen höyrypitoisuuden kasvaminen. Nestepisarat höyryssä huonontavat nimittäin turbiinin mekaanista hyötysuhdetta ja aiheuttavat höyryturbiinin siipien kulumista. Tästä syystä höyrypitoisuuden on oltava vähintään 0,88.

Clausius-Rankine-prosessin hyötysuhde paranee, kun  $T_1$  pienenee. Lauhdutinta käyttäen saadaan paljon parempi hyötysuhde kuin puhaltamalla höyry ulos  $100\text{ }^\circ\text{C}$  :ssa.  $T_1$  määräytyy käytettävissä olevan jäähdytysveden lämpötilasta. Tässä suhteessa Suomella on etu esim. Keski-Eurooppaan verraten, koska täällä jäähdytysveden lämpötila  $t_j$  on talvella  $2\text{ }^\circ\text{C}$ , millä saavutetaan  $T_1 = 17\text{ }^\circ\text{C}$ . (Kesällä  $t_j = 18 - 20\text{ }^\circ\text{C}$  lyhyen ajan.)

Todellisessa höyryturbiinin paisunnassa entropia kasvaa kitkan ym. häviöiden vuoksi. Paisunta ei siis todellisuudessa ole isentrooppinen. Lopputilan 6 entalpia ja siis myös poistettava lämpömäärä suurenevät tästä johtuen pintaa  $66'77'$  vastaavasti ja hyötysuhde huononee määrällä

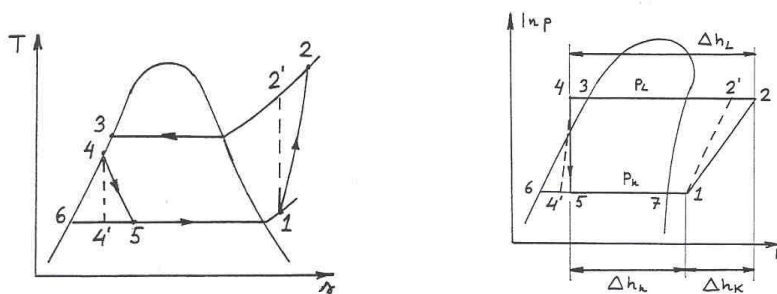
$$\frac{\Delta Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 \Delta S_{6'6}}{Q_1} \quad (4.23)$$

Kun tarkastellaan höyrykattilaa ja turbiinia kokonaisuutena aiheutuu höyryn ja savukaasujen lämpötilaerosta palautumattomuutta. Vaikutus on suurin vaiheen 23 aikana.

Jos tulistuslämpötilan nostamiseksi myös savukaasun lämpötilaa nostetaan, suurenee savukaasun ja höyryn keskimääräinen lämpötilaero ja kokonaishyötysuhde saattaa huonontua. Tämä tulee esille siinä, että savukaasut poistuvat kuumempina savupiippuun.

### 4.2.3 Käänteinen Clausius - Rankine –prosessi (kylmähöyryprosessi)

Vaihtamalla kuvan 3.13 Clausius-Rankine-prosessin virtaussuunta saadaan aikaan käänteinen Clausius-Rankine-prosessi eli kylmähöyryprosessi. Käytännön prosessi toteutetaan korvaamalla nesteen paisunnassa tarvittava turbiini kuristusventtiilillä. Sen avulla voidaan lämpöä siirtää matalasta lämpötilasta korkeampaan. Kuvassa 4.15 on esitetty todellinen kylmälaiteissa ja lämpöpumpuissa käytettävä kylmähöyryprosessi



Kuva 4.15. Käänteinen Clausius – Rankine –prosessi  $T_s$  - ja  $\ln p, h$  -tasossa. Katkoviivoilla on kuvattu teoreettiset puristus- ja paisuntaprosessit, 1-2 todellinen isentrooppinen puristus kompressorissa, 2-4 kaasun jäähtyminen ja lauhtuminen lauhduttimessa vakio- ja vakiopaineessa, 4-5 kuristus venttiilissä ( $h$ =vakio), 5-1 kostean höyryn höyrystyminen ja tulistus vakio- ja vakiopaineessa.

$T_s$ - ja  $\ln p, h$ -tasossa. Kuvassa  $\Delta h_L$  on entalpiian muutos lauhduttimessa,  $\Delta h_h$  entalpiian muutos höyrystimestä ja  $\Delta h_K$  entalpiian muutos kompressorissa. Prosessin laitteisto koostuu kuristusventtiilistä, kompressorista, höyrystimestä, lauhduttimesta sekä näitä yhdistävistä putkista. Liitteissä on annettu erään kylmäaineen  $h, p$ -käyrästä. Kylmäaineen valinta määrää prosessin toimintaolosuhteet. Prosessin hyvyttä arvioidaan jäähdytystapauksessa kylmäkertoimella  $\varepsilon$  ja lämpöpumputapauksessa lämpökertoimella  $\varepsilon_L$ . Nämä määritellään seuraavasti

$$\varepsilon = \frac{\text{kylmäteho}}{\text{kompressoriteho}} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_5)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} \quad (4.24)$$

$$\varepsilon_L = \frac{\text{lämpöteho}}{\text{kompressoriteho}} = \frac{\dot{m}(h_2 - h_4)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} \quad (4.25)$$

Kylmäteho virtaa sisään prosessiin höyrystimessä ja lämpöteho virtaa prosessista ulos lauhduttimessa. Kylmäkertoimen  $\varepsilon$  ja lämpökertoimen  $\varepsilon_L$  välillä on luonnollisesti seuraava riippuvuus

$$\varepsilon_L = \varepsilon + 1 \quad (4.26)$$

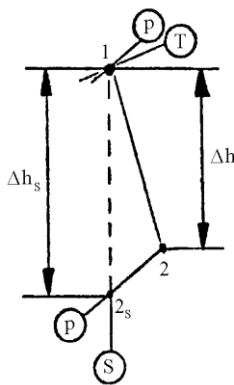
## 5 HÖYRYPROSESSI

### 5.1 Muutamia tavallisia prosesseja h,s-piirroksessa

Tarkastellaan aluksi muutamia höyryprosessin kannalta tärkeiden osaprosessien laske-  
mista h,s-piirroksen avulla.

#### 5.1.1 Paisunta turbiinissa

Höyrykattilan jälkeen tunnetaan tuorehöyryn paine  $p_1$  ja lämpötila  $T_1$  sekä turbiinin  
paisunnan jälkeinen paine eli lopputilan paine  $p_2$ . Lisäksi turbiinille oletetaan tietty  
isentrooppinen hyötysuhde  $\eta_s$ .



Kuva 5.1. Paisunta turbiinissa.

hs-piirroksesta löydetään lämpötilan ja paineen avulla kyseisen pisteen entalpia  $h_1$ .  
Isentrooppisen paisunnan loppupisteen entalpia  $h_{2s}$  saadaan, kun kuljetaan pisteestä 1  
suoraan alaspäin loppupaineeseen asti. Näin ollen  $\Delta h_s = h_1 - h_{2s}$  on määrätty. Isentroop-  
pisen hyötysuhteen avulla lasketaan todellinen entalpiamuutos

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \eta_s \Delta h_s \quad (5.1)$$

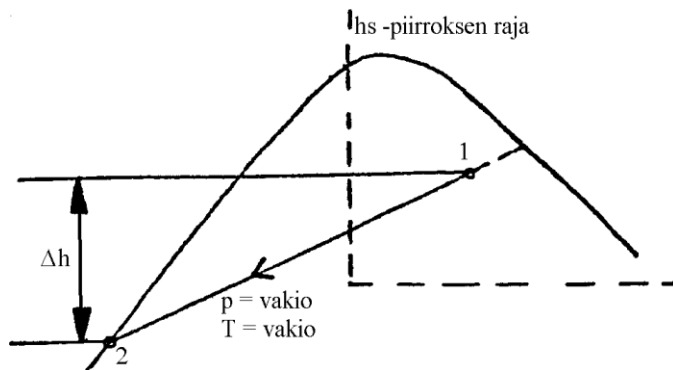
Paisunnan loppupisteen entalpiaksi saadaan siten

$$h_2 = h_1 - |\Delta h| = h_1 - \eta_s (h_1 - h_{2s}) \quad (5.2)$$

Piste sijaitsee sijaitsee loppupaineisobaarilla. Kun tiedetään paisunnan loppupiste, voi-  
daan piirtää varsinainen paisuntakäyrä. Käyrän kaltevuuden määrää turbiinin isentroop-  
pisen hyötysuhde.

### 5.1.2 Lauhtuminen

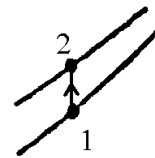
Lauhdutin sijaitsee heti turbiinin jälkeen, joten lauhtumisen alkupiste on siis sama kuin turbiinipaisunnan loppupiste. Koska lauhtumisen lopputila on kylläinen neste jää tämä  $h_s$  -piirroksen ulkopuolelle. Lauhtuminen on isoterminen prosessi, joten lopputilan arvot saa kylläisen veden taulukosta alkupisteen lämpötilan tai paineen avulla.  $h_s$ -piirroksessaan kostealla alueella isobaarit ja isotermit seuraavat toisiaan.



Kuva 5.2. Lauhtuminen  $h_s$  -piirroksessa.

### 5.1.3 Syöttövesipumppu

Syöttövesipumpussa tapahtuu nesteen paineen nousu. Pumppu on tavallisessa höyryprosessissa heti lauhtuttimen jälkeen, joten alkupiste on kyllästyskäyrällä. Entalpiannousu syöttövesipumpussa on tavallisesti niin pieni että se on havainnollisuuden vuoksi piirrettävä liioiteltuna  $h_s$  -piirrosluonnokseen. Koska nesteelle ominaistilavuutta voidaan pitää vakiona, voidaan isentrooppinen entalpiankasvu laskea kaavasta

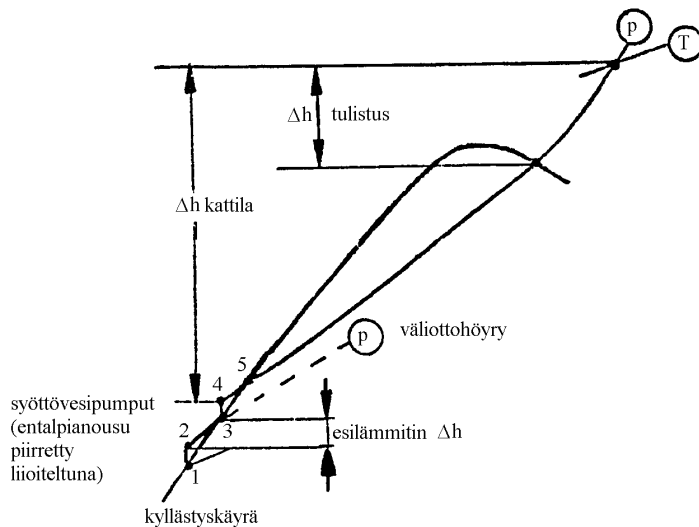


$$\Delta h_s = (h_1 - h_{2s}) = v \Delta p \quad (5.3)$$

ja  $\Delta h$  isentrooppisen hyötysuhteen avulla

$$\Delta h = (h_1 - h_2) = \frac{\Delta h_s}{\eta_s} \quad (5.4)$$

### 5.1.4 Veden esilämmitys ja höyrykattila

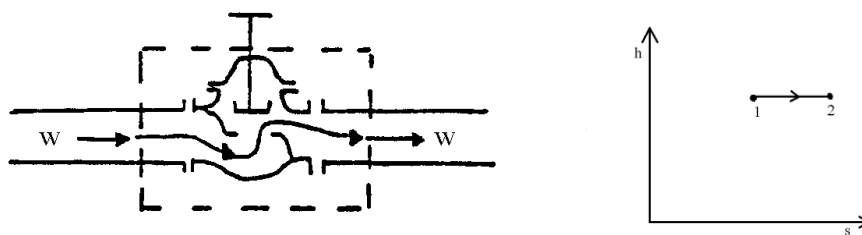


Kuva 5.3. Kattilan entalpianousu.

Virtauspainehäviöitä lukuunottamatta on prosessi kattilassa isobaarinen. Varsinainen höyrystyminen on siis pisteestä 5 lähtien kyllästyskäyrälle asti. Tämän jälkeen höyryä usein vielä tulistetaan, eli kuumennetaan sitä vakioapaineessa vastaavaa kylläisen höyryn lämpötilaa suuremmaksi. Alkutilan entalpia määräytyy esilämmittimen energiata- seesta sekä ottaen huomioon entalpiannousut syöttövesipumpuissa.

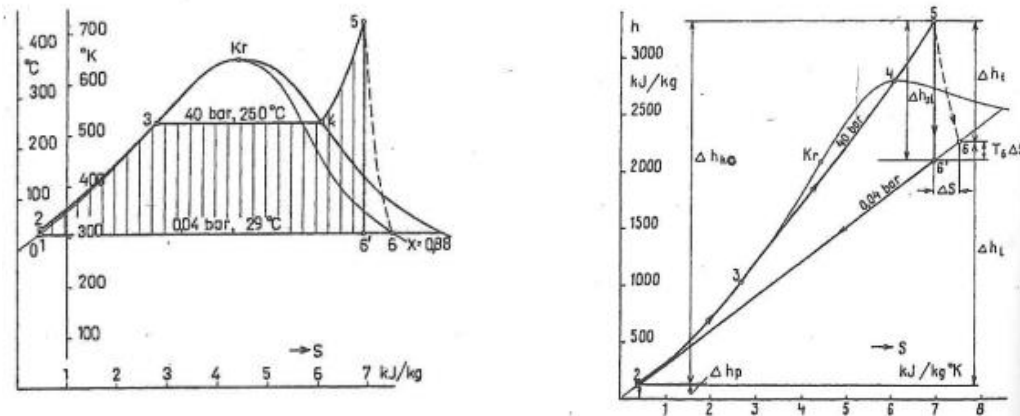
### 5.1.5 Kuristus

Kun aineen virtausta osittain estetään virtausputkessa, tapahtuu kuristusta, esim. osit- tain avattu tavallinen sulkuventtiili on tyypillinen kuristuslaite (kts. kuva 5.4.).



Kuva 5.4. Kuristusventtiili ja kuristaminen  $h,s$ -tasossa.

Tarkastellaan  $h,s$ -piirroksessa höyryn kuristamisen vaikutusta höyryn paineeseen, läm- pötilaan ja vesipitoisuuteen. Höyryn paine pienenee, kuten jo edellä kävi ilmi avoimen systeemin yhtälöiden yhteydessä. Tällöin entropia kasvaa ja entalpia pysyy vakiona. Myös lämpötila laskee. Kostean höyryn vesipitoisuus alenee kuristuksessa ja tulistettu höyry tulistuu entisestään, mikäli höyryn paine ei ole hyvin korkea.



Kuva 5.5. Yksinkertainen höyryvoimaproessi

## 5.2 Höyryprosessin hyötysuhde

Höyryprosessilla tarkoitetaan siis tässä yhteydessä Clausius-Rankine –prosessia ilman veden esilämmitystä. Prosessin hyötysuhde ilman veden esilämmitystä saadaan jakamalla koko prosessista saatava teho kattilaan tuotavalla lämpöteholla. Prosessista saatava teho on turbiinista saatava teho miinus pumppujen käyttämiseen tarvittava teho, eli kaavana (kuvan 5.5. merkinnät)

$$\eta = \frac{P_{st} - P_{sp}}{\Phi_k} = \frac{\Delta h_{st} - \Delta h_{sp}}{\Delta h_{ko}} \quad (5.5)$$

Kaavassa alaindekseillä on seuraava merkitys:

0 = ilman esilämmitystä    p = pumppu    k = kattila    t = turbiini

s = isentrooppi

Vastaavan todellisen, ei - isentrooppisen prosessin hyötysuhde (ilman esilämmitystä) on

$$\eta = \frac{P_t - P_p}{\Phi_k} = \frac{\Delta h_t - \Delta h_p}{\Delta h_{ko}} = 1 - \frac{\Delta h_l}{\Delta h_{ko}}, \quad (5.6)$$

koska  $\Delta h_{ko} + \Delta h_p = \Delta h_t + \Delta h_l$ .

Hyötysuhteen kaavassa turbiinin antama teho voidaan laskea

$$P_t = \dot{m}\Delta h_t = \eta_{st} \dot{m}\Delta h_{st} = \eta_{st} P_{st} \quad (5.7)$$

samoin syöttövesipumpun tehontarve

$$P_p = \dot{m}\Delta h_p = \dot{m} \frac{\Delta h_{sp}}{\eta_{sp}} \left( \approx \frac{\dot{m}v\Delta p}{\eta_{sp}} \right) = \frac{P_{sp}}{\eta_{sp}} \quad (5.8)$$

ja kattilaan tuotu lämpövirta

$$\Phi_k = \dot{m}\Delta h_{ko} \quad (5.9)$$

Edellä lasketulla hyötysuhteella tarkoitetaan siis prosessin hyötysuhdetta. Kun halutaan tietää koko voimalaitoksen hyötysuhde, on otettava huomioon vielä muitakin tekijöitä. Voimalaitoksen hyötysuhde saadaankin kaavasta

$$\eta_{kok} = \eta_k \eta_g \eta_m \eta_{omak} \eta_{pr} \quad (5.10)$$

missä

$\eta_k$  = kattilan hyötysuhde. Se muodostuu paitsi palamishäviöistä myöskin säteilyhäviöistä ympäristöön sekä savukaasuhäviöistä. Suurissa laitoksissa  $\eta_k$  on luokkaa 0,9.

$\eta_m$  = turbiinin mekaaninen hyötysuhde. Mekaaniset häviöt ovat verrattain pieniä ja ne onkin tapana yhdistää generaattorin hyötysuhteeseen  $\eta_g$ .

$$\eta_m \eta_g \approx 0,95 \dots 0,98$$

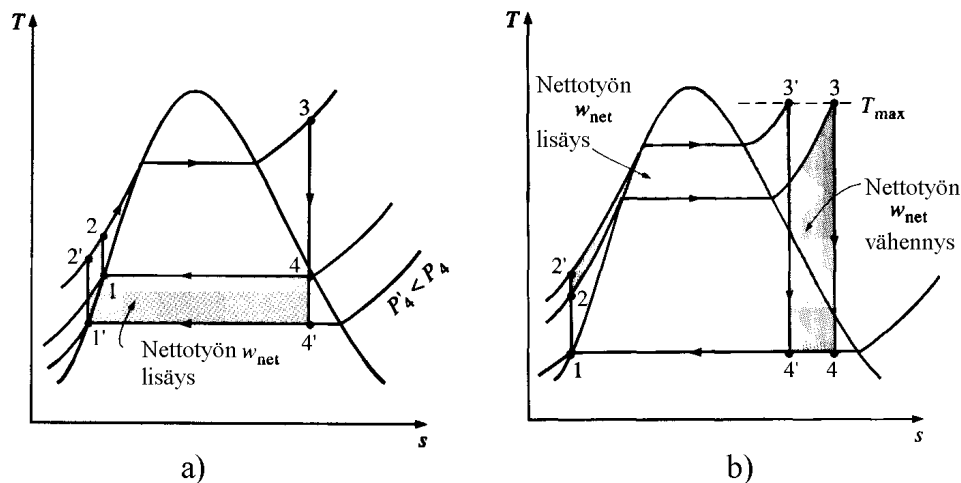
$\eta_{omak}$  = omakäyttöhyötysuhde. Omakäyttöhyötysuhde ottaa huomioon laitoksen käyttöön tarvittava tehon. Omakäyttöön sisältyvät esimerkiksi hiilimylyt ja arinan käyttölaitteet, ilma- ja savukaasupuhaltimet, lauhduttimien jäähdytysvesi- ja ilmapumput sekä tehonsiirtohäviö syöttöpumppuun. Pumpun tehontarve sensijaan sisältyy jo prosessihyötysuhteeseen. Omakäyttö  $\approx 2 \dots 4\%$  laitoksen tuottamasta tehosta.

Kokonaishyötysuhde on esimerkiksi Naantalın höyryvoimalaitoksessa  $\approx 40\%$ . Nykyisin on puhtaan höyryvoimalaitoksen kokonaishyötysuhteen maksimi  $\approx 48\%$ .



### 5.3 Hyötysuhteen parantaminen

Höyryvoimalaitokset tuottavat suurimman osan maailman sähköstä, joten pienikin hyötysuhteen paraneminen tuottaa suuria säästöjä polttoaineen kulutuksessa. Kaikkien hyötysuhteen parannuskeinojen idea on sama: lisätä lämmöntuonnin keskilämpötilaa kattilassa tai alentaa lämmönpoiston keskilämpötilaa lauhduttimessa. Seuraavassa käsitellään tapoja, joilla hyötysuhdetta on mahdollista parantaa.



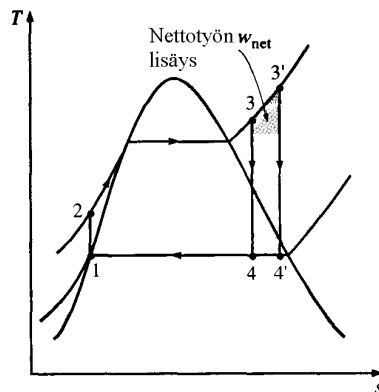
Kuva 5.6. Hyötysuhteen parantaminen a) lauhduttimen painetta laskemalla tai b) kattilan painetta suurentamalla.

Höyry on lauhduttimessa kylläisessä tilassa lauhduttimen painetta vastaavassa kyllästymislämpötilassa. Siksi lauhduttimen paineen laskeminen automaattisesti laskee höyryn lämpötilaa ja sitä kautta lämmönpoiston lämpötilaa. Vaikutusta on havainnollistettu kuvassa 5.6. kohdassa a). Lauhduttimen paineet ovatkin yleensä käytännössä alle ilmanpaineen. Paineen laskemiselle on kuitenkin olemassa alaraja: paine ei voi olla alhaisempi kuin jäähdytysaineen lämpötilaa vastaava kyllästymispaine. Esimerkiksi jos lauhdutukseen käytetään järvivettä jonka keskilämpötila on  $15\text{ °C}$  ja lauhduttimen asteisuus on  $10\text{ °C}$ , ei lauhduttimen paine voi olla alhaisempi kuin kyllästymispaine  $25\text{ °C}$  lämpötilassa eli  $3,2\text{ kPa}$ . Lauhduttimen paineen alentamisella on myös negatiivinen vaikutus, koska se lisää höyryn kosteuspitoisuutta, josta puolestaan aiheutuu turbiinin siipien kulumista.

Hyötysuhdetta voidaan parantaa myös nostamalla kattilan painetta, koska se samalla nostaa myös höyrystymislämpötilaa (ks. kuva 5.6. kohta b)). Hyötysuhteen paraneminen perustuu siis lämmöntuonnin keskilämpötilan nousemiseen. Kuten kuvasta voidaan päätellä, tämä toimenpide siirtää kiertoprosessia vasemmalle Ts-tasossa ja lisää höyryn kosteuspitoisuutta. Tähän ongelmaa voidaan pienentää höyryn välitulistuksella, jota käsitellään tarkemmin luvussa 5.3.2. (Cengel & Boles, 1998, 564 - 565.)

### 5.3.1 Tulistus

Yksi tapa parantaa hyötysuhdetta on nostaa lämmöntuonnin keskilämpötilaa tulistamalla höyry korkeampaan lämpötilaan. Hyötysuhteen paranemisen lisäksi tulistuksella on myös toinen hyvä puoli, sillä se vähentää lauhduttimeen menevän höyryn kosteuspitoisuutta, kuten kuvan 5.7. perusteella voi päätellä.



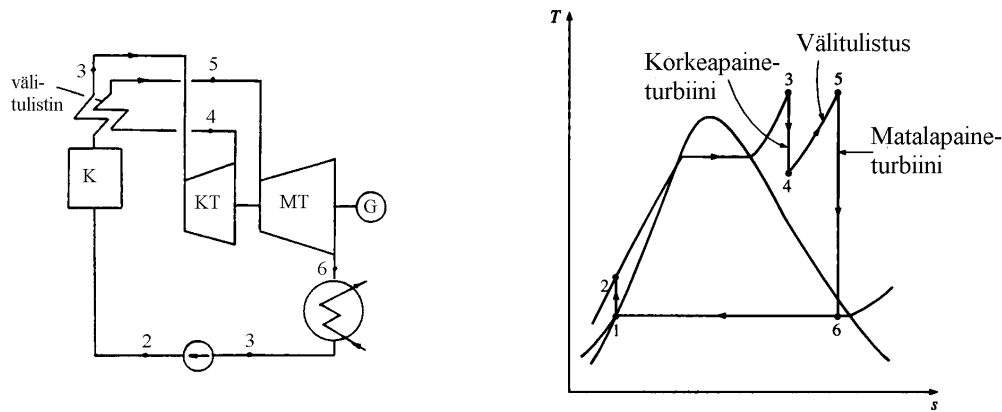
Kuva 5.7. Tulistus.

Lämpötila, johon höyry voidaan tulistaa, on kuitenkin rajoitettu materiaalisuista. Nykyisellään korkein mahdollinen tuorehöyryn lämpötila on 620 °C. Kaikki parannus tästä lämpötilasta riippuu nykyisten materiaalien parantamisesta tai korkeita lämpötiloja kestävien uusien aineiden keksimisestä. Keraameja on pidetty yhtenä mahdollisuutena. (Cengel & Boles, 1998, 565.)

### 5.3.2 Välitulistus

Suuria paineita käytettäessä, jolloin piste 3 siirtyy ylöspäin ja vasemmalle pitkin rajakäyrää, on tarpeellista käyttää välitulistusta koska yksi tulistus johtaisi liian korkeaan lämpötilaan tai paisunnan loppupiste jäisi liian kostean höyryn alueelle.

Välitulistuksessa höyryn annetaan paisua kahdessa vaiheessa. Ensinnäkin höyryn annetaan paisua korkeapaineturbiinissa välipaineeseen. Tämän jälkeen höyry kulkee uudelleen kattilan kautta, jossa se lämmitetään vakioaineeseen. Yleensä välitulistuksen jälkeinen lämpötila on sama kuin ensimmäisenkin tulistuksen jälkeen. Tämän jälkeen höyry johdetaan matalapaineturbiiniin, jossa sen annetaan paisua lauhduttimen paineeseen.



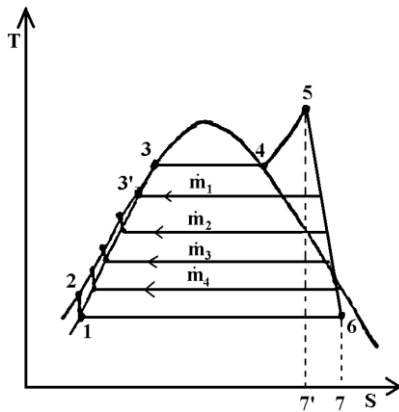
Kuva 5.8. Höyryvoimalaitoksen vältulistus.

Kuten kuviosta ilmenee, ei vältulistus johda keskilämpötilan  $\bar{T}$  kasvuun, eikä siis paranna hyötysuhdetta jos  $T_5 = T_3$  ja  $T_4$  on pieni. Vältulistusprosessin keskilämpötilaa voidaan nostaa lisäämällä vältulistusten määrää. Tällöin päädyttäisiin lopulta isotermissen prosessiin maksimilämpötilassa. Käytännössä se ei kuitenkaan ole mahdollista. Normaalisti voimalaitoksissa käytetään vain yhtä vältulistusta. Kahta vältulistusta kannattaa käyttää ainoastaan ylikriittisissä voimalaitosprosesseissa.

Vältulistuksen ideana ei siis ole suoranaisesti parantaa hyötysuhdetta, vaan vähentää paisunnan lopun kosteuspitoisuutta. Mikäli materiaalirajoituksia ei olisi, kannattaisi käyttää vain yhtä tulistusta korkeampaan lämpötilaan.

### 5.3.3 Syöttöveden esilämmitys

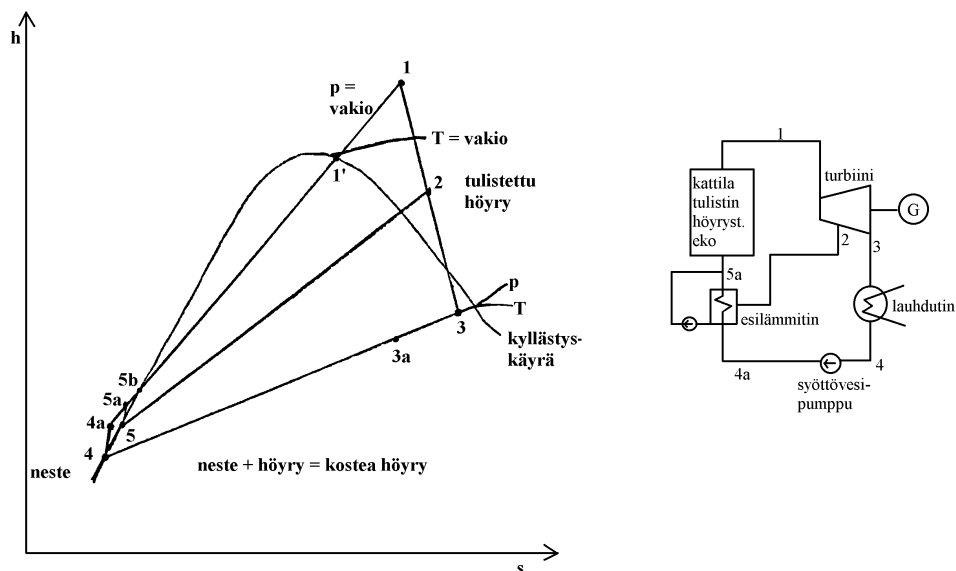
Rankine-prosessin Ts-kuvaajaa tarkastelemalla on helppo huomata, että lämmöntuonti syöttövesipumpun jälkeen tapahtuu melko matalassa keskilämpötilassa. Vaikutus on erityisen selkeä kattilapainetta nostettaessa. Kuten kuvasta 5.9. voi päätellä, lämmitys-vaiheen 2 - 3 osuus koko tuodusta lämpömäärästä  $Q_1$  kasvaa ja tämän epäedullinen vaikutus hyötysuhteeseen kasvaa vastaavasti. Tästä syystä yksi keino parantaa hyötysuhdetta on kasvattaa syöttöveden lämpötilaa ennen kattilaa. Tämä voidaan toteuttaa siirtämällä osa paisuvan höyryn lämmöstä syöttöveten eli käyttämällä regeneraatiota. Tällöin kattilaan on tuotava lämpöä vain välillä 3 - 5 ja keskilämpötila  $\bar{T}$  siis nousee. Tätä keinoa kutsutaan syöttöveden esilämmitykseksi väliottohöyryjen avulla. Koska  $\dot{m}_6 \leq \dot{m}_5$  niin myöskin poistettava lämpömäärä pienenee. Ts-tasosta on helppo todeta, että syöttöveden esilämmitys höyryllä merkitsee saadun tehon pienenemistä, vaikka hyötysuhde kasvaakin. Tämä johtuu siitä, että turbiinin läpi kulkeva höyryn määrä vähenee.



Kuva 5.9. Esilämmityksen vaikutus.

Syöttöveden esilämmitys järjestetään väliottohöyryllä turbiinista ja valitaan siten, että vesi kussakin vaiheessa kuumenee suunnilleen yhtä paljon. Tällöin oletetaan lämmönsiirtopintojen olevan niin suuria, että syöttöveden poistolämpötilan (esilämmittimestä) ja väliottohöyryn lauhtumislämpötilan ero on mahdollisimman pieni. Tämä ns. asteisuus (josta käytetään myös nimitystä lämpötilavajaus) on tavallisesti noin 4...5 K.

Kuvassa 5.10. on esitetty yksinkertainen höyryprosessi, jossa käytetään yhtä esilämmittintä. Samassa kuvassa on prosessi hs-tasossa.

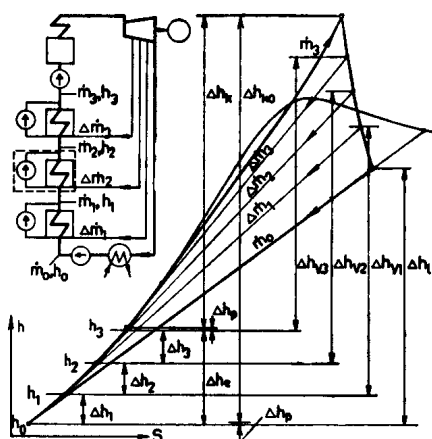


Kuva 5.10. Yksinkertainen höyryprosessi yhdellä esilämmittimellä.

Kuvan osaprosessit ovat:

- 1 – 3 Paisunta turbiinissa  $\eta_{st} = \frac{\Delta h}{\Delta h_s}$ . Adiabaattinen. (Huom!  $\Delta h_s = h_1 - h_{3s}$ )
- 3 – 4 Höyryn lauhtuminen. Asema 3 on 2 – faasialueella (kosteaa höyryä). Isobaarinen prosessi teoreettisesti, koska 2 – faasialueella  $p = f(T)$  prosessi on myöskin isoterminen. Lämmönsiirto jäähdytysveteen.
- 4 – 4a Syöttövesipumppu. Nesteen puristus kattilapaineeseen.
- $$\eta_{sp} = \frac{\Delta h_s}{\Delta h} = \frac{v\Delta p}{\Delta h} \text{ . Adiabaattinen.}$$
- 2 – 5 Syöttöveden esilämmitys väliottohöyryllä. Lämmönsiirto.
- 5 – 5a Lauhtuneen välioton puristus pumpussa kattilapaineeseen. Adiabaattinen.
- 5a – 1 Kattila. Isobaarinen teoreettisesti, todellisuudessa painehäviöitä esim. kitkasta johtuen.
- 1' – 1 Kylläisen höyryn tulistus.
- 4a – 5a Syöttöveden lämmittäminen väliottohöyryllä esilämmittimessä.
- 5a – 5b Syöttöveden lämmittäminen savukaasuilla kattilassa.

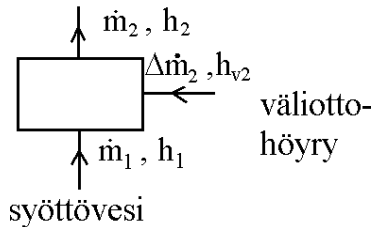
Kuvassa 5.11 on puolestaan useammalla väliotolla varustetun höyryvoimalaitoksen hspiiirros sekä prosessikaavio.



Kuva 5.11. Höyryvoimalaitoksen esilämmitysjärjestelmä.

Esilämmittimen energiatase voidaan laskea periaatteella ”mikä menee sisään, tulee myös ulos”, eli sisään menevien virtausten entalpia on yhtä suuri kuin ulostulevien virtausten entalpia.

$$\dot{m}_1 h_1 + \Delta \dot{m}_2 h_{v2} = \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \Delta \dot{m}_2) h_2 \quad (5.11)$$



Kaavasta voidaan johtaa lämmityshöyryn ja syöttöveden massavirtojen suhde

$$\Delta \dot{m}_2 (h_{v2} - h_2) = \dot{m}_1 \Delta h_2 \quad (5.12)$$

$$\Delta \dot{m}_2 \Delta h_{v2} = \dot{m}_1 \Delta h_2 \quad (5.13)$$

$$\therefore \frac{\Delta \dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \frac{\Delta h_2}{\Delta h_{v2}} \quad (5.14)$$

Yhtälöön 4.13 päädytään myös kirjoittamalla esilämmittimessä luovutetut ja vastaanotetut lämpötehot yhtä suuriksi.

Seuraavassa käytetään esilämmittimille lyhennyksiä 1...i...n. Jos merkitään sekoitus-esilämmittimessä tulevan ja lähtevän syöttöveden massavirtojen suhdetta  $F_i$ llä, saadaan

$$F_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{i-1}} = \frac{\dot{m}_{i-1} + \Delta \dot{m}_i}{\dot{m}_{i-1}} = 1 + \frac{\Delta h_i}{\Delta h_{vi}} \quad (5.15)$$

$$G_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_0} = F_1 F_2 \dots F_i \quad (5.16)$$

Tässä tapauksessa poistettu lämpöteho on  $\dot{m}_0 \Delta h_l$ , jossa  $\Delta h_l$  = lauhduttimeen menevän höyryn ja syöttöveden (piste 0) entalpiaero. Tuotu lämpö on puolestaan  $\dot{m}_n \Delta h_k = G_n \dot{m}_0 \Delta h_k$ . Näin ollen prosessin hyötysuhde käytettäessä n kappaletta esilämmittimiä on

$$\eta_{pr} = 1 - \frac{\Delta h_l}{\Delta h_k G_n} = 1 - \frac{\Phi_l}{\Phi_k} = 1 - \frac{\dot{m}_0 \Delta h_l}{\dot{m}_n \Delta h_k} \quad (4.17)$$

Varsinaiseksi esilämmittimeksi ei lasketa kattilassa olevaa ekonomaiseria. Optimaalisessa ekonomaiserissa syöttöveden entalpia nousee likimain yhtä paljon kuin kussakin höyryesilämmittimessä ja optimaalinen entalpian nousu esilämmitysjärjestelmässä on

$$\Delta h_{e,opt} = \frac{n}{n+1} (\Delta h_{ko} - \Delta h_v) \quad (5.18)$$

Kaavoissa (kuvan 4.11. merkinnät)

$\Delta h_l$  = lauhduttimeen menevän höyryn ja syöttöveden entalpiaero (piste 0)

$\Delta h_k$  =  $\Delta h_{ko} - \Delta h_e$  = entalpian nousu kattilassa

$\Delta h_e$  = entalpian nousu esilämmitysjärjestelmässä

$\Delta h_{ko}$  = entalpian nousu kattilassa ilman esilämmitystä

$\Delta h_v$  = keskimääräinen entalpian lasku väliottohöyrylle esilämmittimissä

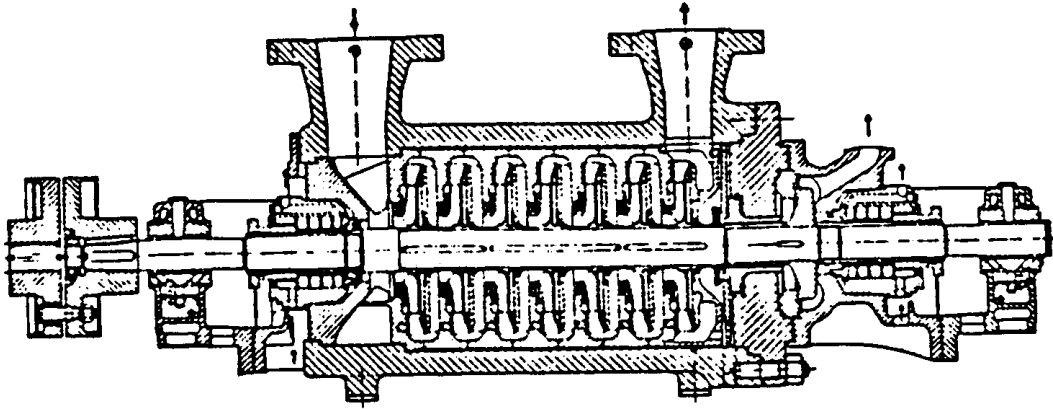
$n$  = esilämmittimien lukumäärä

## 5.4 Höyryvoimalaitoksen komponentit

Seuraavassa käydään läpi tärkeimmät voimalaitoksen komponentit, joita ovat syöttövesipumppu, syöttöveden esilämmittimet, turbiini, lauhdutin, ilman esilämmitin (=luvo), savukaasupuhallin sekä savukaasun puhdistuslaitteistot. Lisäksi käsitellään tuorehöyryn lämpötilan säätöä.

### 5.4.1 Syöttövesipumppu

Syöttövesipumppuja sijoitetaan yleensä kaksi (100%) tai kolme (50%) rinnakkain. Syöttövesipumppu on yleensä toiminnaltaan moniportainen pumppu. Suurvoimaloissa se voi olla myös höyryturbiinikäyttöinen, jolloin varapumppu on sähkökäyttöinen 30 – 50 % pumppu. Höyryturbiinikäyttöisessä syöttövesipumpussa kierroslukusäätö on yleensä helpompaa kuin sähkökäyttöisessä.



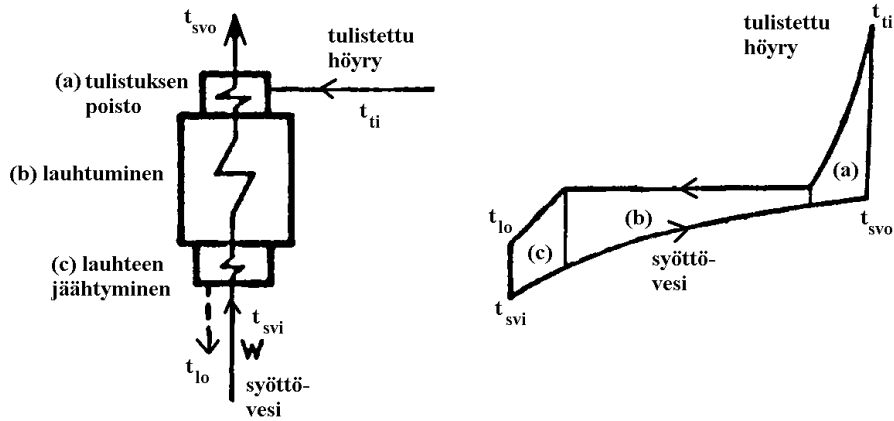
Kuva 5.12. Syöttövesipumppu.

### 5.4.2 Syöttöveden esilämmittimet

Esilämmityksen käyttö mahdollistaa laitoksen hyötysuhteen nostamisen. Esilämmittintyyppisiä on kaksi: pintaesilämmitin ja sekoitusesilämmitin. Sekoitusesilämmittimessä turbiinin väliottohöyry sekoitetaan suoraan lauhduttimesta tulevaan veteen. Yleensä höyryvoimalaitoksessa sekoitusesilämmittimenä on syöttövesisäiliö. Sekoituksessa paineet eivät muutu, joten esilämmittimestä lähtevän virran paine on sama kuin tulevien virtojen paine. Ideaalisessa sekoitusesilämmittimessä lähtevä virta on kylläistä vettä väliottohöyryn paineessa. Pintaesilämmitin on tavallinen lämmönsiirrin. Lämmittävä ja lämmitettävä virta eivät sekoitu, joten ne voivat olla eri paineessa. Lämmittävä aine (höyry) on yleensä vaipassa ja lämpiävä aine (vesi) menee putkissa vaipan läpi. Höyry lauhtuu kylmempien putkien pinnoille ja luovuttaa höyrystymislämpönsä, joka siirtyy lämpenevän veden entalpiaksi. Ideaalitapauksessa poistuvan veden lämpötila on sama kuin lauhtuneen väliottohöyryn lämpötila. Todellisuudessa veden lämpötila on lämpötilavajauksen verran alhaisempi. (Wikstén, 1996, s. 63 – 64.) Lämpötilavajauksia kutsutaan myös nimellä asteisuus, ja se on yleensä n. 2...4 K. Korkeapaine-esilämmittimien asteisuus voi olla muutaman asteen negatiivinenkin (jopa -5 K), mikäli väliottohöyry on kovasti tulistettua.

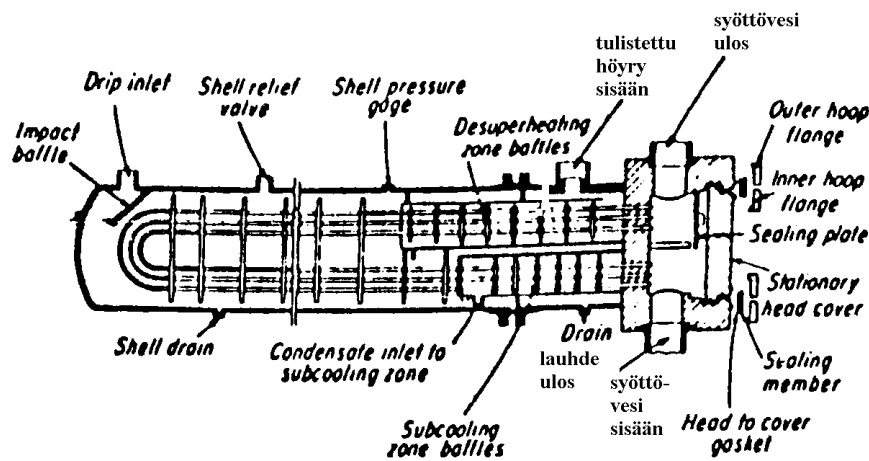
Yleensä höyryvoimalassa on 8 – 9 esilämmittintä, joista puolet on matalapaine-esilämmittimiä. Korkeapaine-esilämmitin eroaa matalapaine-esilämmittimestä siten, että lämmitettävä höyry on tulistettua. Korkeapaine-esilämmittimet sijoitetaan syöttövesisäiliön jälkeen ja matalapaine-esilämmittimet ennen syöttövesisäiliötä mutta syöttövesipumpun jälkeen. Kuvassa 4.13. on korkeapaine-esilämmittimen virtauskaavio ja lämpötilaprofiilit.





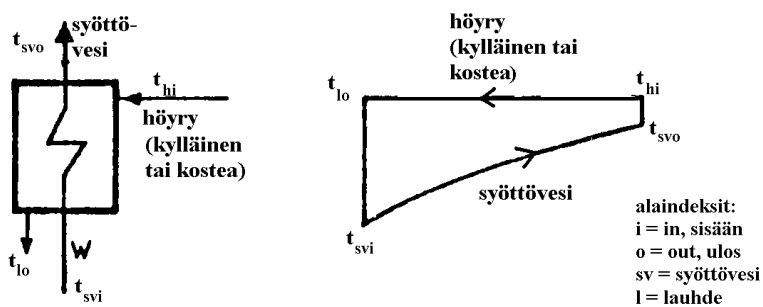
Kuva 5.13. Korkeapaine-esilämmittin.

Korkeapaine-esilämmittimen rakenne esitetään kuvassa 5.14.



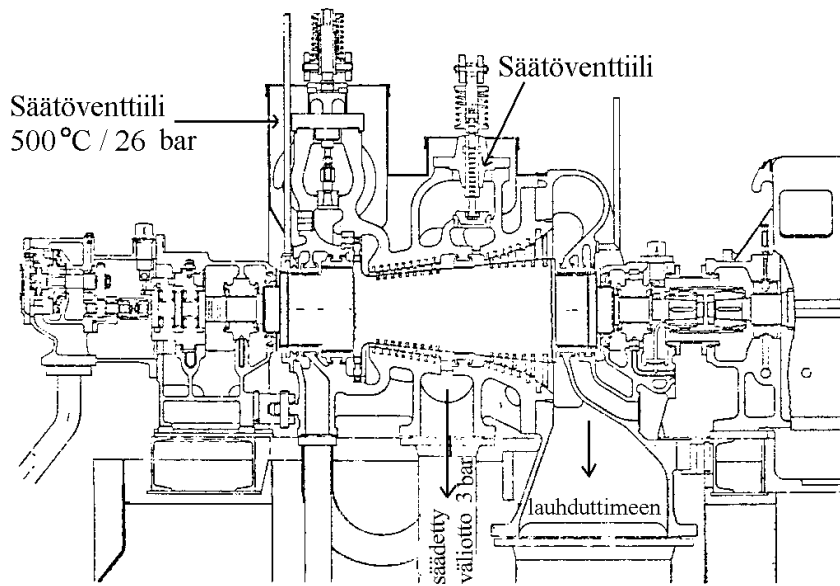
Kuva 5.14. Korkeapaine-esilämmittimen rakenne.

Kuvassa 5.15 on puolestaan matalapaine-esilämmittimen virtauskaavio ja lämpötilaprofiilit. Matalapaine-esilämmittimessä lämmittävä höyry on kylläistä tai kostea.

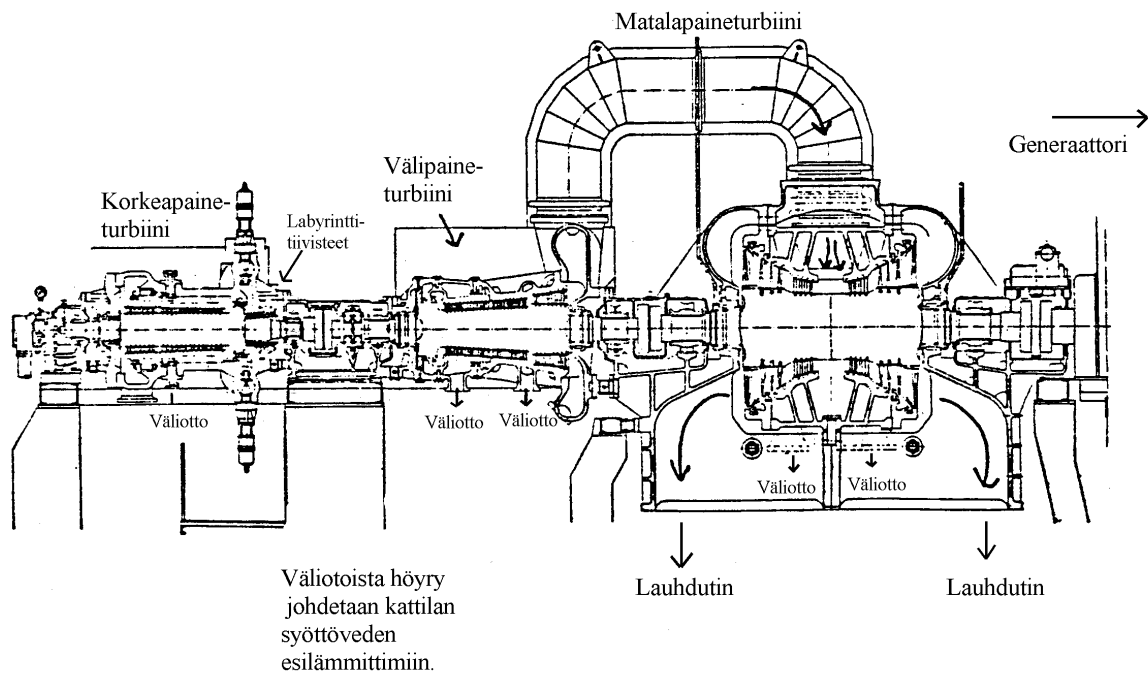


Kuva 5.15. Matalapaine-esilämmittin.

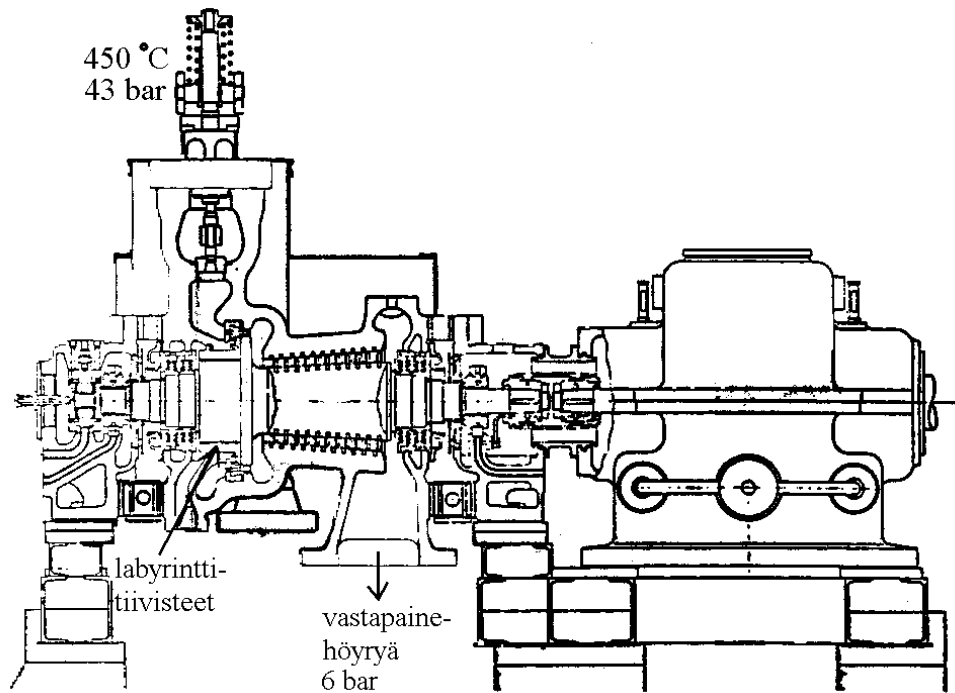
### 5.4.3 Turbiini



Kuva 5.16. Säädetyllä väliotolla varustettu pieni lauhdutusturbiini. Väliotosta saatavaa höyryä voidaan käyttää syöttöveden esilämmitykseen tai esim. teollisuusprosessissa.



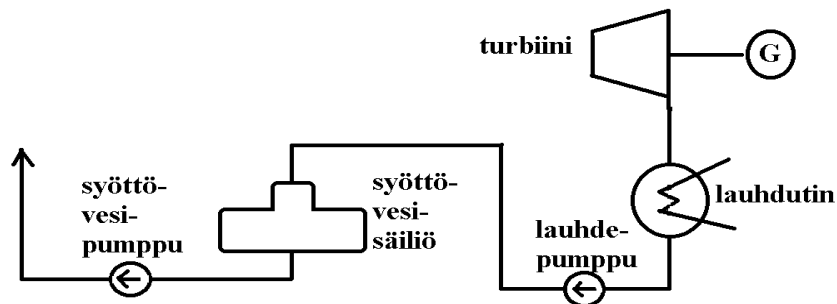
Kuva 5.17. Suuri lauhdutusturbiini (64 MW). 190 bar, 535 °C, välitulistus 525 °C.



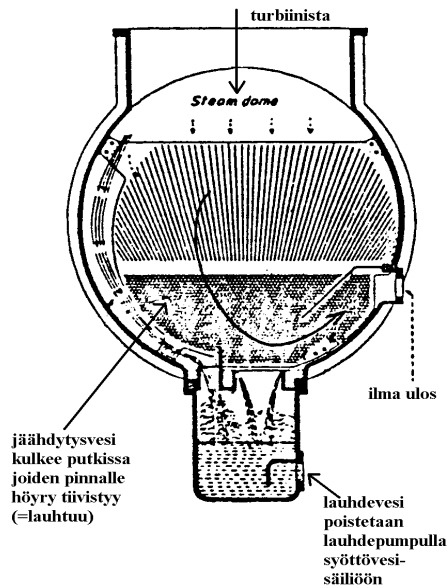
Kuva 5.18. Pieni vastapaineturbiini (800 kW). Vastapainehöyryä voidaan käyttää teollisuusprosesseissa tai kaukolämpönä (=höyry lauhdutetaan kaukolämmönvaihtimessa).

#### 5.4.4 Lauhdutin

Lauhdutin sijoitetaan normaalisti aivan turbiinin alapuolelle.



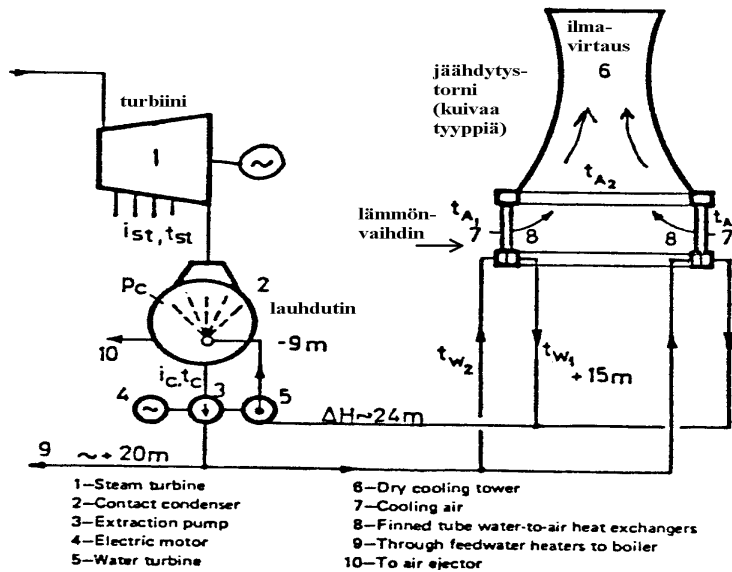
Kuva 5.19. Lauhduttimen sijainti.



Turbiinin loppupäässä tai lauhduttimessa voi ilmaa vuotaa lauhduttimeen, koska lauhduttimen paine on alle ulkoilman paineen. Ilman poistamiseksi on lauhdutin varustettava alipaine-pumpulla (yleensä höyrykäyttöinen ejektori), joka estää ilmaa kerääntymästä lauhduttimeen. Ilmaa poistetaan myös syöttövesisäiliöstä. Ilman poistaminen lauhduttimesta ja syöttövesisäiliöstä perustuu siihen, että kylmävesi ei pysty liuottamaan itseensä kaasuja. Kuvassa 4.20 ilmenee lauhduttimen rakenne.

Kuva 5.20. Lauhduttimen rakenne.

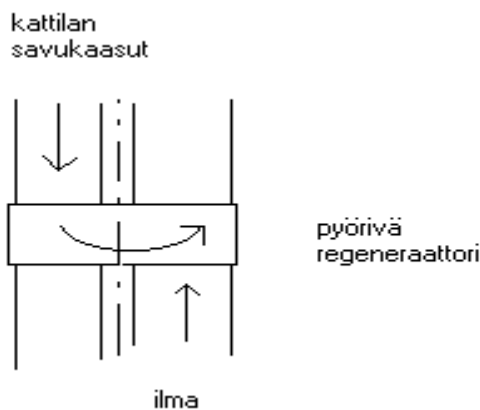
Jos lauhduttimen jäähdytykseen ei ole käytettävissä kylmää vettä riittävästi, voidaan lauhdutinta jäähdyttää ilmalla. Kuvan 4.21 systeemissä ilma virtaa jäähdytystorniin pohjalla olevien lämmönvaihtimien kautta jäähdyttäen lauhduttimen vettä, joka palautetaan takaisin lauhduttimeen suuttimien läpi vesipisaroina, joiden pinnalle höyry lauhtuu. Osa lauhdesta pumpataan kattilaan ja loppu jäähdytystorniin. Tornin korkean rakenteen ansiosta torniin aiheutuu voimakas luonnollinen veto, koska lämmennyt ilma pyrkii kohoamaan ylöspäin. Märkäjäähdytystornissa jäähdytystä tehostetaan kostuttamalla ilmajäähdytyslämmönvaihtimen pinta, jolloin haihtuva vesi jäähdyttää pintaa. Lauhduttimen kiertovesi voidaan myös ruiskuttaa jäähdytystornin ilmavirtaukseen, jolloin osan vedestä höyrystyessä loppuvesi jäähtyy ja palautetaan lauhduttimeen. Yleisempi ratkaisu on kuitenkin käyttää putkirakenteista lauhdutinta, jolloin jäähdytystornissa kiertävä vesi ei sekoitu voimalaitosprosessin veteen. Höyrypiiri ja jäähdytysaine-piiri rakennetaan omiksi erillisiksi piireikseen, jolloin jäähdytysainepiiriin voidaan tarpeen tullen lisätä mm. pakkasen kestoa parantavia aineita.



Kuva 5.21. Jäähdytystornin toimintaperiaate.

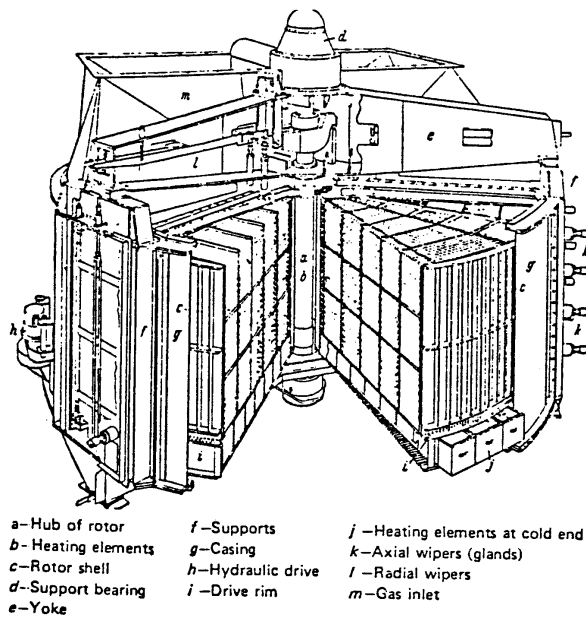
### 5.4.5 Ilman esilämmitin

Nykyaikaiset höyrykattilat varustetaan yleensä palamisilman esilämmityksellä. Ilman esilämmitintä kutsutaan myös luvoksi, mikä muodostuu saksankielisistä sanoista ”luft vorwärmer”. Esilämmitetyn ilman käyttö parantaa palamista. Ilman esilämmitykseen voidaan käyttää kattilasta poistuneita savukaasuja. Esilämmitetyn palamisilman ansiosta kattilassa tapahtuvan palamisen loppulämpötila nousee ja lämpöpintoja tarvitaan parantuneen lämmönsiirron takia vähemmän. Yleisin esilämmitintyyppi voimalaitoskäytössä on Ljungström. Lämmitin muodostuu pyörivästä peltilevyistä rakennetusta sylinteristä, jonka läpi sekä savukaasut että ilman kulkevat kuvan 4.22 mukaisesti. Ilman puolella on korkeampi paine, jotta savukaasuja ei pääsisi vuotamaan polttoilman joukkoon, mikä huonontaisi palamista.



Kuva 5.22. Regeneraattori-tyyppinen luvu.

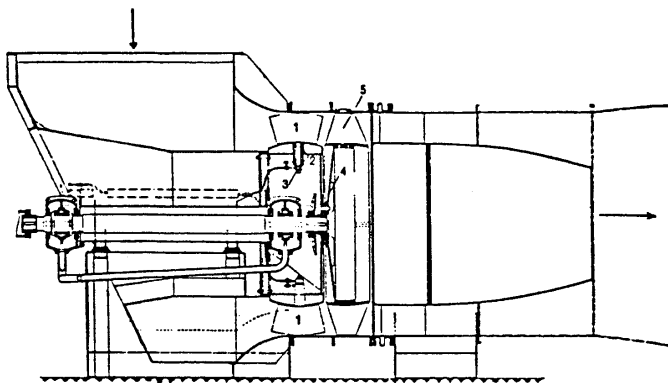
Kuvassa 5.23. on esitetty luvon rakenne.



Kuva 5.23. Ljungström-luvo.

### 5.4.6 Savukaasupuhallin

Savukaasupuhaltimen tehtävänä on imeä kattilan savukaasuja siten, että kattilassa ja savukanavassa säilyy jatkuvasti hieman ulkoilman painetta alhaisempi paine. Tällöin kattilasta ei vuoda savukaasuja ulospäin kattilahuoneeseen. Savukaasupuhaltimen virtausta säädetään yleensä säädettävillä johto- tai juoksusiivillä, kuristamalla tai muuttamalla puhaltimen kierroslukua. Suurissa kattiloissa käytetään yleensä aksiaalipuhaltimia (pienissä radiaalipuhaltimia).



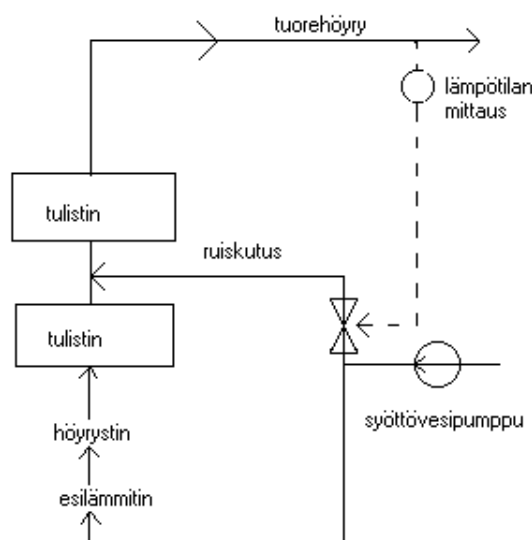
Kuva 5.24. Aksiaalinen savukaasupuhallin.

### 5.4.7 Savukaasun puhdistus kiintoaineista

Savukaasujen puhdistus on esitelty tarkemmin kappaleessa 12.

### 5.4.8 Tuorehöyryn lämpötilan säätö

Kattilan kuormituksen muuttuessa muuttuvat kattilan lämpöpintojen lämmönsiirtoker-  
toimet eri tavalla kattilan eri osissa. Tämän seurauksena tuotetun höyryn lämpötila  
muuttuu. Voimalaitoskäytössä kuitenkin höyryn lämpötilan on oltava kuormituksesta  
riippumatta lähes vakio. Tuorehöyryn lämpötilaa voidaan säätää ruiskutuksella. Ruis-  
kutuksessa tulistimen keskivaiheilla jäähdytetään höyryä ruiskuttamalla höyryn jouk-  
koon hieman syöttövesipumpusta johdettua syöttövettä. Ruiskutusvesimäärää ohjataan  
tuorehöyryn lämpötilalla. Koska ruiskutuksen avulla voidaan vain laskea höyryn läm-  
pötilaa, on säätöreservin aikaansaamiseksi jatkuvasti ruiskutettava hiukan vettä. Näin  
ruiskutusvesivirtausta pienentämällä saadaan tuorehöyryn lämpötila tarvittaessa myös  
nousemaan.

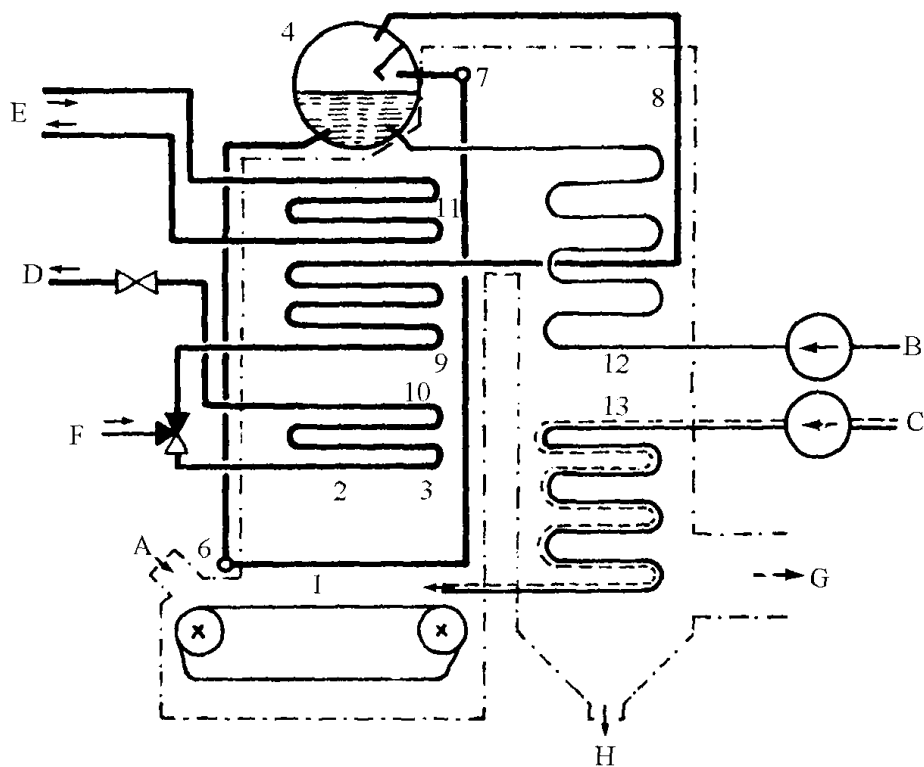


Kuva 5.25. Tuorehöyryn lämpötilan säätö.

## 5.5 Höyrykattilat

Höyrykattilaa voidaan pitää lämmönsiirtimenä, jossa lämpöä luovuttavana virtauksena  
on polttoaineen palaessa syntyvä kuuma savukaasu sekä vastaanottajana kattilassa höy-  
rystyvä vesi. Kattilan lämpöpinnat jakaantuvat seuraavasti: ilman esilämmitin (luvo),  
syöttöveden esilämmitin (eko), höyrystin, tulistin. Voimalaitoskäytössä on vielä useim-  
miten välitulistus, jolla tarkoitetaan höyryn palauttamista korkeapaineturbiinin jälkeen

kattilaan tulistettavaksi ennen väli- tai matalapaineturbiinia. Välitulistuksen avulla voidaan höyry paisuttaa matalapaineturbiinissa pienempään paineeseen kosteuspitöisuuden nousematta liaksi.

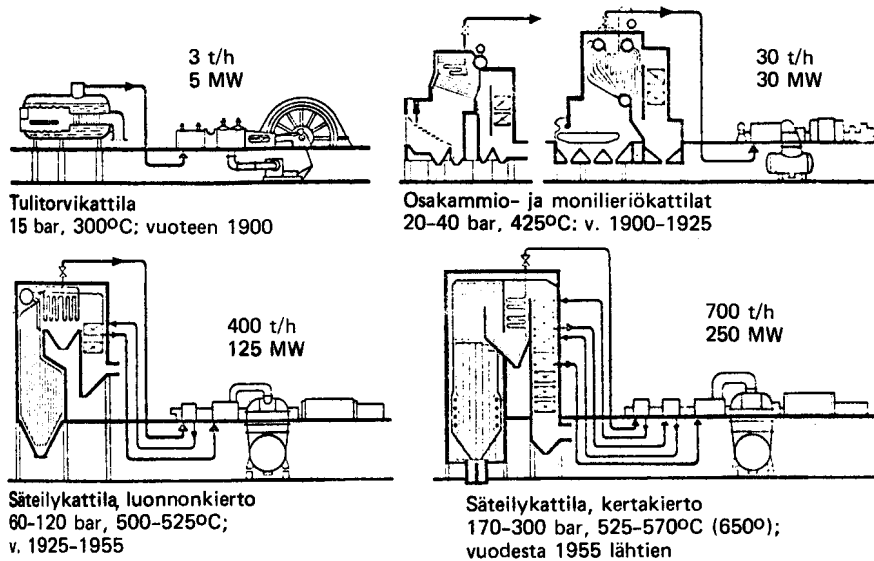


A polttoaine	1 arina	9 1. säteilytulistin
B syöttövesi	2 tulipesä	10 2. säteilytulistin
C palamisilma	3 keittoputkisto	11 välitulistin
D tulistettu höyry	4 höyrylierö	12 veden esilämmitin
E höyry välitulistukseen	5 laskuputket	13 ilman esilämmitin
F tulistuksen säätö	6 jakokammiot	
G palamiskaasujen poisto	7 kokoojakammiot	
H tuhkan poisto	8 konvektiotulistin	

Kuva 5.26. Höyrykattilan osat (Ahonen, 1978, 11).

Kuvassa 5.27 kuvataan höyrykattiloiden, tehojen ja tuorehöyryn tilojen kehittyminen nykyvaiheeseensa.





Kuva 5.27. Höyrykattiloiden kehitys nykyvaiheeseensa (Ojala, 1976, 117).

### 5.5.1 Eri tyyppisiä höyrykattiloita

Höyrykattilat voidaan toimintatapansa perusteella jakaa ryhmiin, joissa jokaisessa kattilan toiminta omaa erityisiä piirteitä. Samalla tämä jako johtaa myös kattilan ryhmitteilyyn koon eli höyryn tuoton perusteella. Polttoaineen valinta sen sijaan ei vaikuta ryhmittelyyn, vaan se on vapaasti valittavissa kullekin kattilatyypille. (Ahonen, 1980, 17.) Kuvassa 4.30 on esitetty yleisimmät meillä käytössä olevat kattilatyypit.

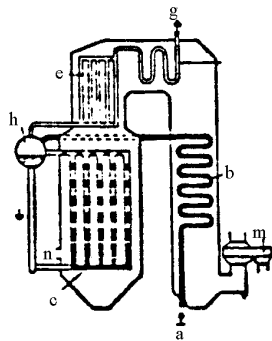
Luonnonkiertokattila soveltuu pienille höyrynpaineen arvoille (max. 14...17 MPa). Veden kierto aiheutuu höyrystyvän veden tiheyseroista, joten erillistä pumppua ei tarvita. Kattilan yksinkertainen toiminta on hyvin sopiva höyryn tuottoon. Kattilatyypin onkin käytössä teollisuudessa, jossa höyrytehot eivät ole suuria, mutta käyttövarmuudelle asetetaan suuret vaatimukset.

Suuremmilla paineilla on höyrystinpiiri varustettava kiertovesipumpulla. Tällöin on kyseessä pakkokiertokattila. Yleisin pakkokiertokattila on La-Mont –kattila. Kiertoveden virtaus on n. 3...10 kertaa tuorehöyryvirta. Seurauksena on kattilan suurimman osan eli tulipesän pieneneminen, mistä seuraa keittoputkien lukumäärän ja koon pieneneminen ja edelleen hinnan halpeneminen. Suolojen rikastumisen estämiseksi on näiden kattiloiden lieriöstä johdettava ulos jatkuvasti vettä (2...4 % syöttövesivirrasta).

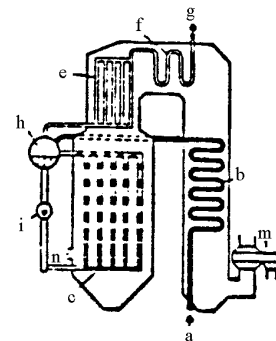
Benson-kattila on tyypiltään läpivirtauskattila. Siinä höyrystettävä vesi pakotetaan syöttövesipumpulla kattilan putkiston eri vaiheiden läpi ilman kiertoa. Kattilaa voi-

daankin kutsua myös nimellä kertakiertokattila. Se soveltuu suuren mittakaavan voimalaitoskäyttöön (esim. Inkoossa on Benson-kattilat). Haittana on syöttövedelle asetettavat erittäin korkeat puhtausvaatimukset, koska siitä puuttuu lieriö, johon epäpuhtaudet voisivat kertyä. Benson-kattila voi olla ali- tai ylikriittinen.

Sulzer-kattila eroaa Benson-kattilasta vain siten, että siinä on höyrystimen jälkeen sijoitettu vedeneroitin (Sulzer-pullo), josta on ulospuhallus. Kattilan syöttöveden puhtausvaatimukset eivät ole niin ankarat kuin Benson-kattilalla. Suolanpoistopullon käyttö alikriittisillä arvoilla on suuri etu, koska juuri tulistimen suojaaminen sisäpuolisilta epäpuhtauksilta on tärkeätä. Sulzer-kattila soveltuu vain alikriittisille höyryn arvoille.

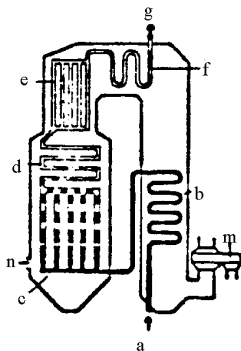


1) Luonnonkiertokattila

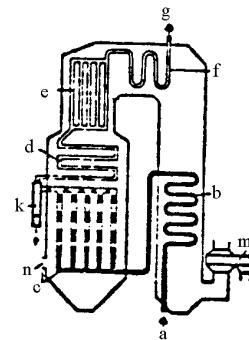


2) Pakkokiertokattila

## 3) Läpivirtauskattilat



Benson - kattila



Sulzer - kattila

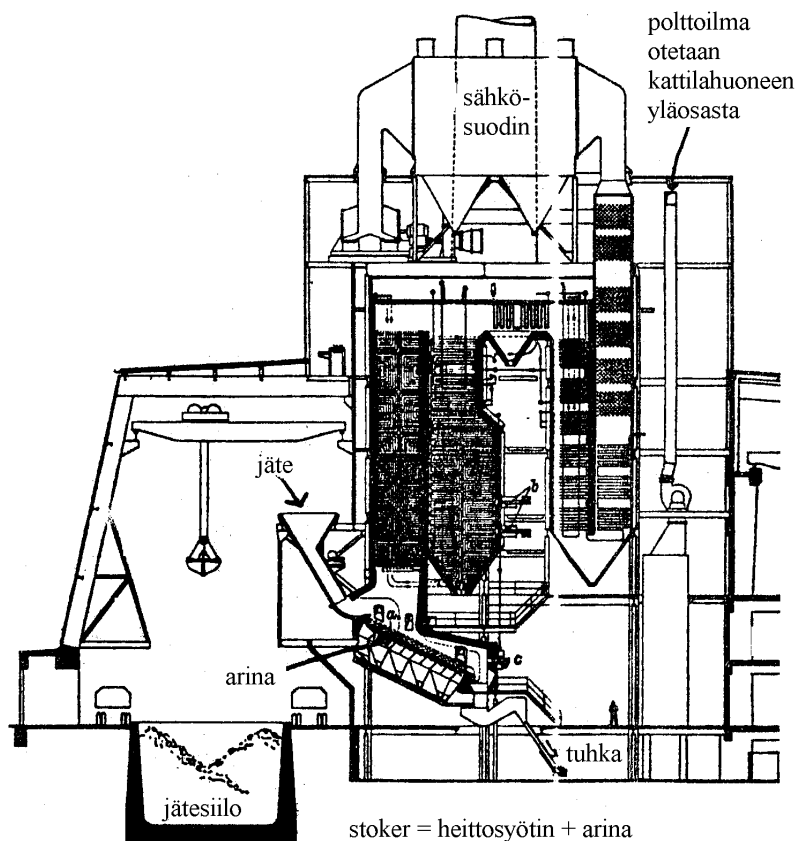
- |                         |                                |
|-------------------------|--------------------------------|
| a. syöttövesi           | g. tuorehöyry                  |
| b. ekonomaiser          | h. lieriö                      |
| c. höyrystin            | i. kiertovesipumppu            |
| d. höyrystin / tulistin | k. vedeneroitin (Sulzer-pullo) |
| e. säteilytulistin      | m. luvo                        |
| f. konvektiotulistin    | n. poltin                      |

Kuva 5.28. Yleisimmät höyrykattilatyypit (jako höyrypuolen virtauksen mukaan).

## 5.5.2 Polttotavat

### 1. Arinapoltto

Vanhin polttomuoto on arinapoltto. Menetelmässä kiinteä polttoaine poltetaan kattilan pohjalla olevan arinan päällä. Palamisilma (usein esilämmitetty) puhalletaan arinan läpi sekä arinan yläpuolelta. Arinalla voidaan polttaa vain kiinteitä riittävän raekoon omaavia polttoaineita (esim. puuta, kuorta, palaturvetta, jätettä, kivihiiltä). Arina voidaan rakentaa viistoksi tai liikkuvaksi, jolloin polttoaineen syöttö voidaan tehdä jatkuvaksi. Tuhka putoaa joko arinan läpi tai valuu sen viereen, josta se poistetaan. Esimerkkinä arinapollostta on kuvassa 4.31 jätteenpolttolaitos.



Kuva 5.29. Jätteenpolttolaitos (Benson-kattila, höyrystyskyky 100 t/h, 187 bar/540 °C). Kattilassa kaksi polttotapaa: jätteen arinapolton (a) lisäksi kattilassa on mahdollista polttaa hiiltä pölypolttona (b).

### 2. Syklonipoltto

Syklonipolttoa käytetään ns. vaikeiden polttoaineiden polttoon. Siinä palaminen on korkean palamislämpötilan sekä polttoaineen ja polttoilman suuren nopeuseron vuoksi varsin tehokasta. Syklonipoltossa käytettävä tulipesä on sylinterimäinen. Ilma (yleensä esilämmitetty) syötetään pesään tangentialisesti suurella nopeudella. Polttoaine syöte-

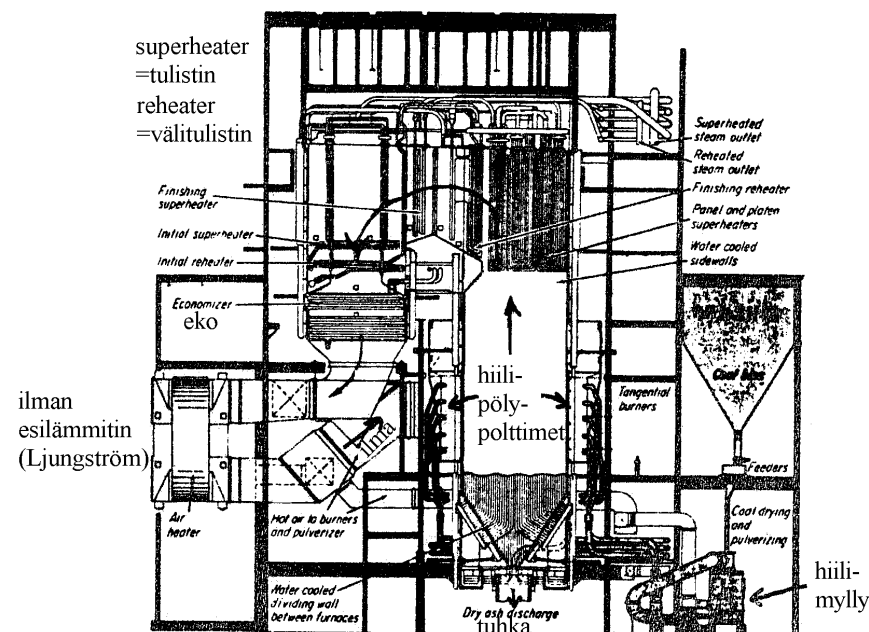
tään samaten tangentialisesti suurella nopeudella pölynä tai joskus kiinteänä esim. ruu-  
villa. Syklonipoltossa palaminen tapahtuu syklonin seinien lähellä kiertävässä liekissä.  
Savukaasut poistuvat syklonin päästä tulipesään. Tuhka poistetaan syklonista yleensä  
sulana. Sykloni on asetettu yleensä vaakasuoraan (vaakasykloni) tai joskus myös pys-  
tysuoraan (pystysykloni). Syklonipolttoa on käytetty tuhkapitoisen hiilen, jätteiden  
sekä ruskohiilen polttoon.

### 3. Kaasun ja öljyn poltto

Kaasua ja öljyä voidaan polttaa tulipesässä varsin yksinkertaisella polttimella. Poltti-  
messä polttoaineeseen sekoitetaan sopiva määrä ilmaa. Yleensä polttimessa ilma ja  
polttoaine saatetaan pyörivään liikkeeseen toisiinsa nähden, jolloin saavutetaan tehokas  
palaminen.

### 4. Pölypoltto

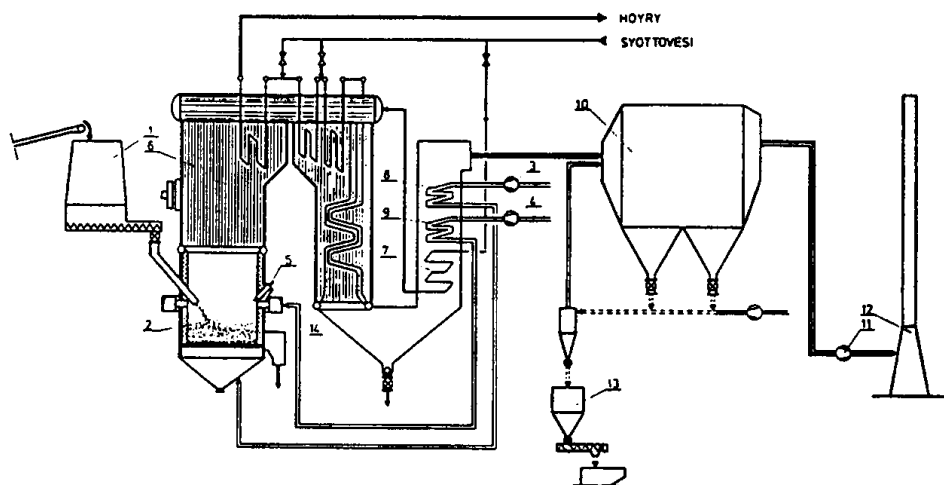
Menetelmä soveltuu parhaiten suuriin kattiloihin. Polttoaine jauhetaan hienoksi pö-  
lyksi, joka puhalletaan yhdessä palamisilman kanssa tulipesään. Pölypoltossa käytetään  
yleensä palamisilman esilämmitystä sekä tarvittaessa polttoaineen kuivaamista kuu-  
milla savukaasuilla. Pölypoltolla poltetaan pääasiassa hiiltä. Pääosa tuhkasta saadaan  
talteen vasta kattilan jälkeisessä savukaasun puhdistuksessa. Kuvassa 4.32 on esi-  
merkki hiilipölykattilasta.



Kuva 5.30. Hiilipölykattila (3000 t/h, 248 ata, 538 °C/538 °C, välitulistus). Kattila on tyypiltään ylikriittinen läpivirtauskattila.

## 5. Leijupoltto

Leijukerros-poltossa palava aine saatetaan leijuvaan tilaan tulipesässä jauhemaisen inertin aineen seassa. Tyypillistä leijukerrostekniikalle on varsin erilaatuisten polttoaineiden käyttömahdollisuus ja nimenomaisesti matala-lämpöarvoisten polttoaineiden käyttö. Tyypillistä on myös palamiseen tarvittavan ilman johtaminen polttoainekerrokseen siten, että polttoainekerros muodostuu vilkkaasti pyörteiseksi. Polttoaine syötetään tulipesässä olevaan leijukerrokseen pneumaattisesti ja polttoaine voi olla verrattain karkearakeista ja myös suhteellisen epätasaista laadultaan. Polttoaine pyritään levittämään tasaisesti tulipesän poikkipinnalle. Inerttinä leijutusmateriaalina käytetään usein polttoaineesta syntyvää tuhkaa tai muuta mineraalia, kuten dolomiittia, jne. Leijukerros-poltto voidaan toteuttaa joko leijupetinä (kerrosleijukattila) tai kiertopetinä (kiertoleijukattilat). Kuvassa 4.33 on esitetty leijupetikattilan periaate.



- |                                      |                                 |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| 1. Kiinteän polttoaineen syöttösiilo | 8. Primääri-ilman esilämmitin   |
| 2. Leijupeti                         | 9. Sekundääri-ilman esilämmitin |
| 3. Primääri-ilmapuhallin             | 10. Sähkösuodin                 |
| 4. Sekundääri-ilmapuhallin           | 11. Savukaasupuhallin           |
| 5. Käynnistysöljypoltin              | 12. Savupiippu                  |
| 6. Höyrystin                         | 13. Tuhkasiilo                  |
| 7. Ekonomaiseri                      | 14. Hiekan poisto               |

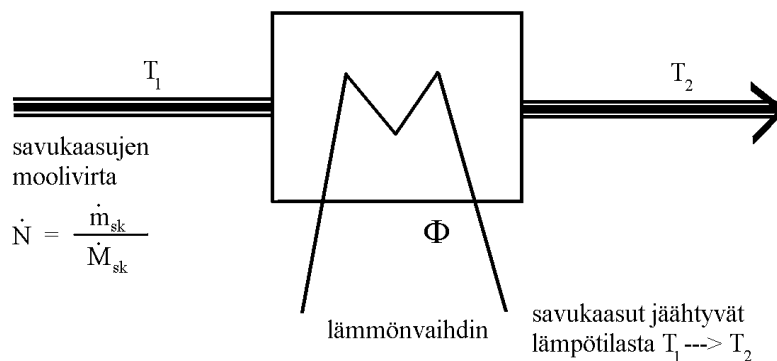
Kuva 5.31. Leijukattilan periaate. (Huhtinen, ym. 1991, 144.)

Edellä luetellut polttotavat harvoin esiintyvät kattiloissa täysin puhtaina. Käytännön polttotavat ovat joskus yhdistelmiä edellä luetelluista – esimerkiksi kattilassa voi esiintyä samanaikaisesti pölypolttoa sekä arina- tai leijupolttoa. Lisäksi kattilat varustetaan useasti vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttömahdollisuudella, esim. kattilassa on sekä

hiilipöly- että öljypolttimet. Kattilaa suunniteltaessa on varauduttava erilaisten polttoaineiden käyttömahdollisuuden mitoittamalla kattilan lämpöpinnat eri polttoainevaihtoehtojen mukaisesti.

### 5.5.3 Kattilalaskut

Savukaasuista saatava lämpöteho voidaan ajatella siirtyvän kuvan 4.34 mukaisesti lämmönsiirtimessä.



Kuva 5.32. Kattilassa siirtyvän lämpömäärän laskeminen.

Savukaasuista saatavissa oleva lämpöteho voidaan vakiopaineprosessissa ( $p_1 = p_2$ ) laskea seuraavasti

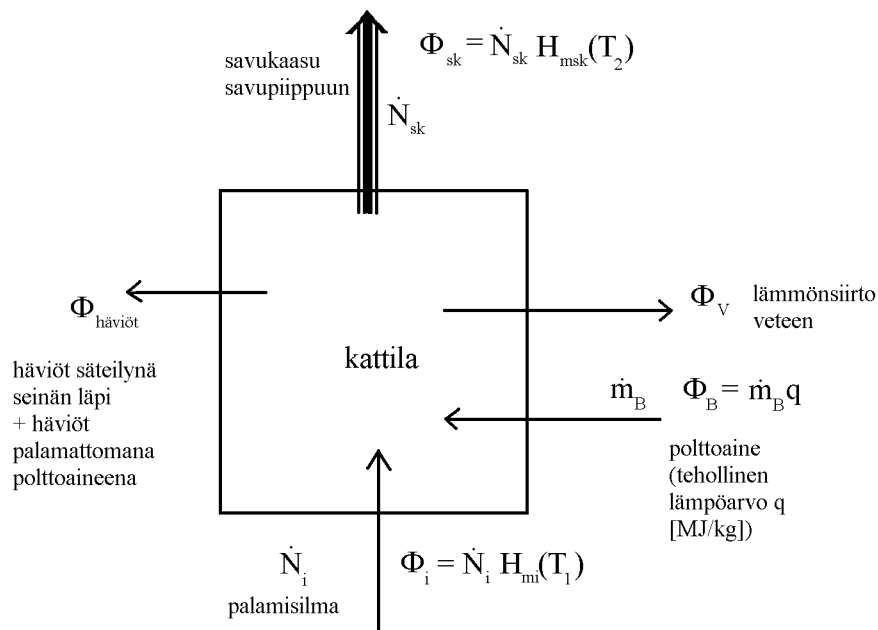
$$\Phi = \dot{N}_{sk} (H_{mt}(T_1) - H_{mt}(T_2)) \quad (5.19)$$

missä

$$H_{mt}(T) = \sum_j X_j H_{mj}(T) \quad (5.20)$$

eli savukaasun kokonaisentalpia on sen komponenttien entalpioiden summa kyseisessä lämpötilassa.

Kattilan energiatase voidaan laatia kuvan 5.33 perusteella



Kuva 5.33. Kattilan energiataseen laskeminen.

Energiatase:

$$\Phi_B + \Phi_i = \Phi_v + \Phi_{\text{haviot}} + \Phi_{sk} \quad (5.21)$$

missä

tulevan ilman sisältämä lämpöteho  $\Phi_i = \dot{N}_i H_{mi}(T_1) \quad (5.22)$

polttoaineteho  $\Phi_B = \dot{m}_B q \quad (5.23)$

savukaasun mukana poistuva lämpöteho  $\Phi_{sk} = \dot{N}_{sk} H_{msk}(T_2) \quad (5.24)$

haviot  $\Phi_{\text{haviot}}$

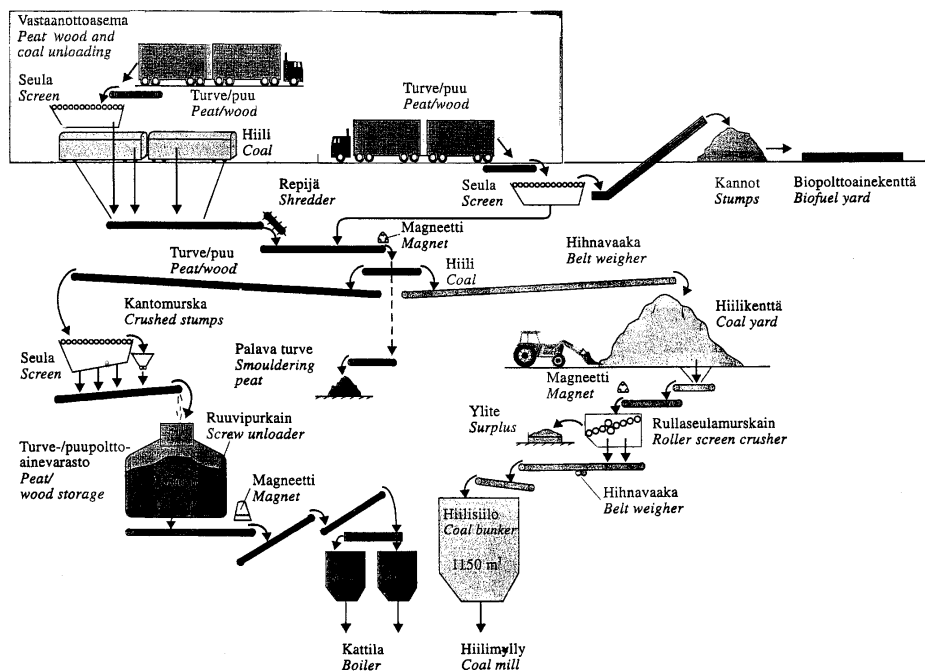
lämmönsiirto veteen  $\Phi_v$

Häviöt poistuvat joko säteilynä seinän läpi tai palamattomana polttoaineena.

Polttoaineen tehollisen lämpöarvon laskemista käsiteltiin aiemmin palamisen yhteydessä luvussa 2.8.

## 5.5.4 Polttoaineen käsittely

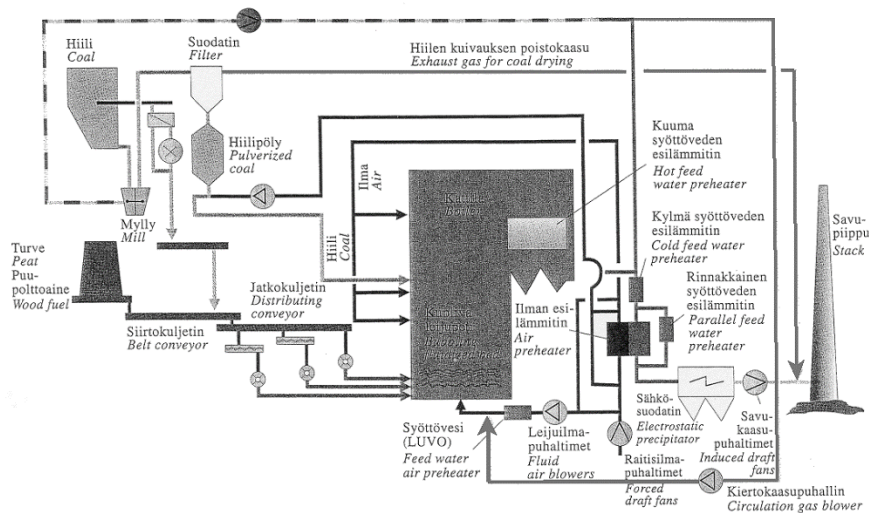
Yleisenä esimerkkinä polttoaineen käsittelystä on Jyväskylän Rauhalahden voimalaitoksen polttoainejärjestelmä, joka on esitetty kuvassa 4.36. Laitoksen kattila on kerroleijukattila, jossa on myös kivihiilen pölypolttimia.



Kuva 5.34. Rauhalahden voimalaitoksen polttoaineiden käsittelyjärjestelmä.

Seuraavassa kuvassa on esitetty saman Rauhalahden voimalaitoksen kattilan polttoainejärjestelmän kaaviokuva.

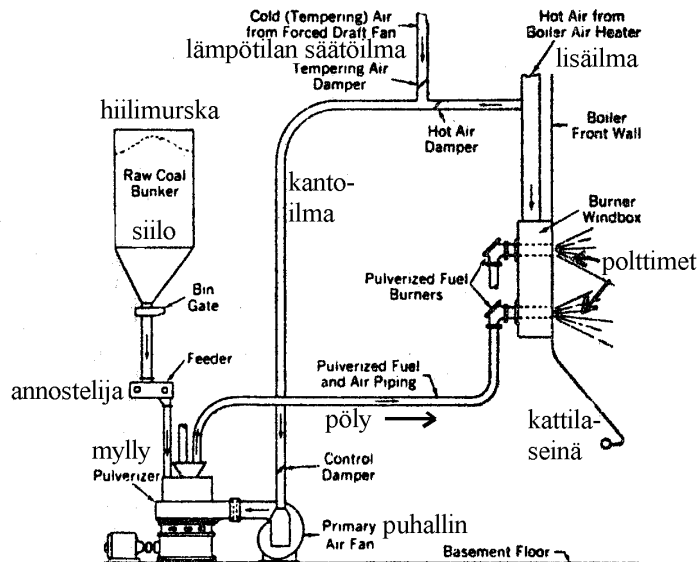




Kuva 5.35. Rauhalahden leijukattilan polttoainejärjestelmän kaaviokuva.

### Hiili

Hiilen pölypoltto vaatii järjestelmän hiilen jauhamiseksi pölypoltoon sopivaksi. Yksi tapa toteuttaa pölypoltto on esitetty kuvassa 4.38. Siinä syöttölaitteesta tuleva jauhetta- vaksi tarkoitettu polttoaine siirtyy myllyyn, johon samanaikaisesti tuodaan polttoaineen kuivaamiseen tarpeellinen kantoilma. Pölyksi jauhettu polttoaine siirtyy puhaltimien avulla tulipesään. Ennen tulipesään siirtymistä siihen sekoitetaan vielä lisäilmaa, jolla varmistetaan polttoaineen täydellinen palaminen. (Ahonen, 1978, 113.)



Kuva 5.36. Hiilen pölypoltojärjestelmä.

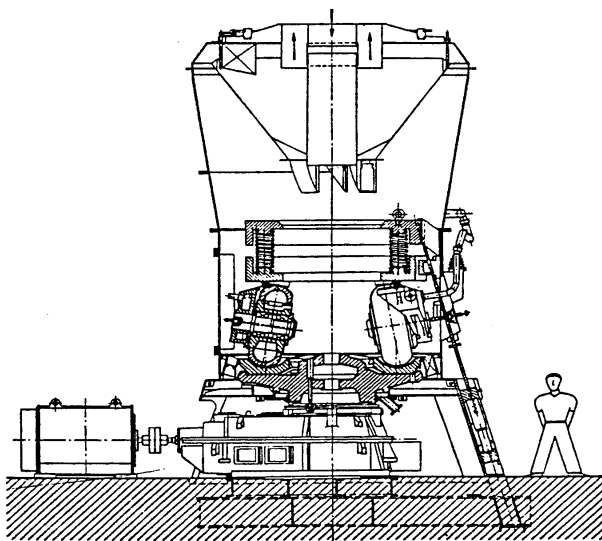
Hiilimyllyt voidaan rakenteensa perusteella jakaa kolmeen ryhmään:

- 1) rumpumyllyt
- 2) kuula- ja valssimyllyt
- 3) vasara- ja iskulevymyllyt

Rumpumyllyjen toiminta perustuu painovoimaan. Itse mylly on onttojen akselitappien varassa pyörivä ontto lieriö. Hiili syötetään rumpuun toisesta päästä akselintapin kautta kuuman kantoilman kanssa. Polttoaineen jauhautuminen tapahtuu sylinterissä olevien teräskuulien avulla. Rumpun pyöriessä hitaasti sisällä olevat kuulat painovoiman vaikutuksesta pyöriessään jauhavat hiilen hienoksi. Kantoilma poistuu rumpun toisen pään ontton akselin kautta vieden mukanaan hienontuneen hiilipölyn. (Huhtinen, ym. 1991, 55.)



Valssimyllyssä pyörivät jousikuormitteiset rullat hienontavat hiilen rullien alla vaakasuorassa tasossa pyörivää valssirengasta vasten. Renkaan puristusvoimaa voidaan säätää. Valssimylly on esitetty kuvassa 4.39. Kuulamylly on hyvin samantapainen kuin valssimyllykin. Kuulamyllyssä kahden jauhinrenkaan välisessä urassa on lisäksi muutamia teräskuulia.



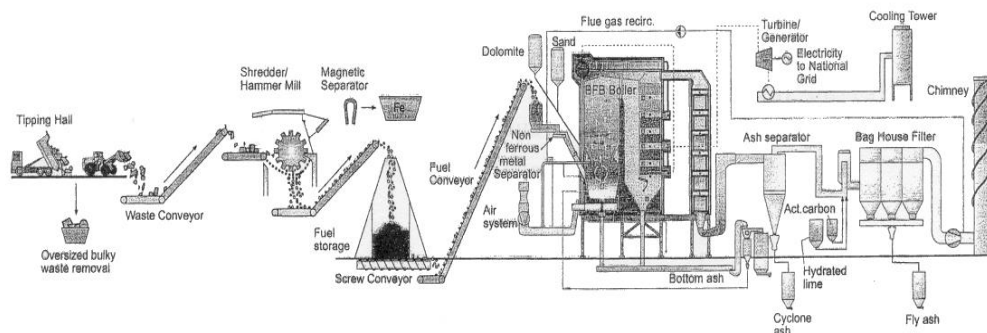
Kuva 5.37. Valssimylly. Pyörivät jousikuormitteiset rullat hienontavat hiilen.

Vasara- ja iskulevymyllyissä polttoaine jauhautuu osuessaan nopeasti pyörivään akseliin kiinnitettyihin vasarapäihin tai iskulevyihin ja sinkoutuessaan osuman vaikutuksesta myllyn jauhinpesän kehälle. Myllyissä syntyy sen verran puhallinvaikutusta, ettei erillistä kantoilmapuhallinta tarvita. Tämän tyyppisiä myllyjä käytetään ulkomailla

etenkin ruskohiilen jauhamiseen. Suomessa sillä jauhetaan ja kuivataan tyypillisesti jyr-sinturvetta.

### ***Jätteenpolton käsittelyjärjestelmä***

Kuvassa 5.38 on esitetty jätteen käsittelyjärjestelmä leijupolttokattilalle.



Kuva 5.38. Jätteen leijupoltto.

## **5.6 Eri tyyppisiä höyryvoimalaitoksia**

Höyryvoimalaitokset voidaan jakaa seuraavasti:

- 1) Lauhdevoimalaitokset, laitos tuottaa vain sähköä.
- 2) Lämmitysvoimalaitokset, laitos tuottaa sähköä sekä kaukolämpöä.
- 3) Vastapainevoimalaitokset, laitos tuottaa sähköä sekä höyryä, joka kuljetetaan turbiiniltä höyrynä lämmönkulutuskohteeseen (esim. teollisuusprosessi).

Lauhdevoimalaitoksen lauhdutin ja lämmitysvoimalaitoksen vastapainelauhduitin eroavat toisistaan vain siinä, että lauhduttimen jäädytysveden lämpötilataso on erilainen. Lauhduttimessa lämpötilataso on välillä 10...20 °C, kun taas vastapainelauhduttimessa eli kaukolämmönvaihtimessa lämpötilataso on välillä 70...120 °C. Seuraavissa luvuissa käsitellään tarkemmin kukin höyryvoimalaitostyyppi.

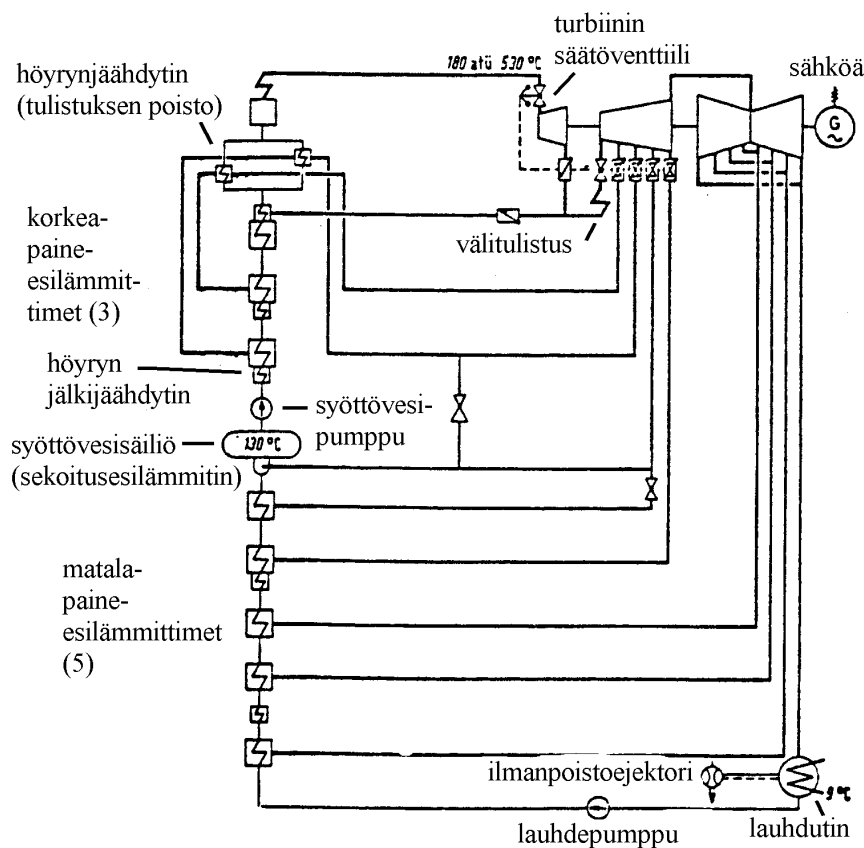
### **5.6.1 Lauhdevoimalaitos**

Lauhdutusvoimalaitoksissa tuotetaan yli puolet Suomessa tuotettavasta sähköstä. Tavallisella lauhdutusvoimalaitoksella tarkoitetaan fossiilisia polttoaineita käyttäviä lauhdutusvoimalaitoksia. Myös ydinvoimalat ovat lauhdutusvoimalaitoksia, mutta niissä lämpöenergia kehitetään kattilan sijasta ydinreaktorissa.

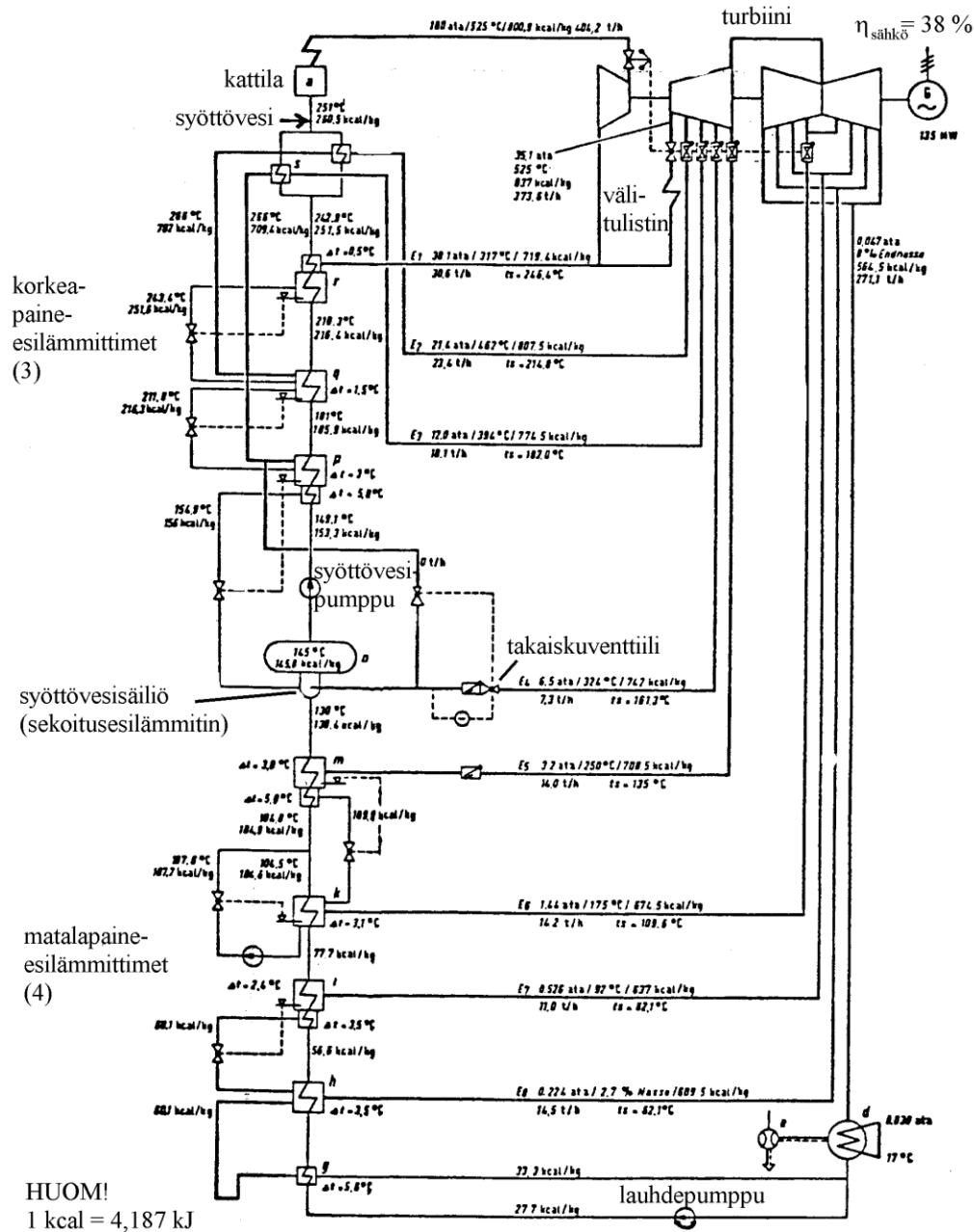
Lauhdutusvoimalaitokset toimivat nykyään usein peruskuormalaitoksina, jolloin on toivottavaa, että niiden sähköntuotannon hyötysuhde on mahdollisimman hyvä. Hyötysuhdetta voidaan parantaa nostamalla tuorehöyryn painetta, laskemalla lauhdutinpainetta, välitulistuksella, syöttöveden turbiinien väliottohöyryllä tapahtuvalla esilämmityksellä tai komponenttien hyötysuhdetta parantamalla.

Viimeisimmät Suomeen rakennetut suuret lauhdutusvoimalaitokset ovat valmistuneet Haapavedelle ja Meri-Poriin. Haapaveden laitoksen sähköteho on 150 MW ja Meri-Porin laitoksen 560 MW. Sisämaahan rakennetun Haapaveden voimalaitoksen polttoaineena on jyrshinturve, rannikolla sijaitsevien lauhdutusvoimaloiden polttoaine on yleensä kivihiihi.

Kuvissa 5.39 ja 5.40 on esitetty tyypillisten lauhdevoimalaitosten prosessikaavioita.



Kuva 5.39. Suuri lauhdevoimalaitos.



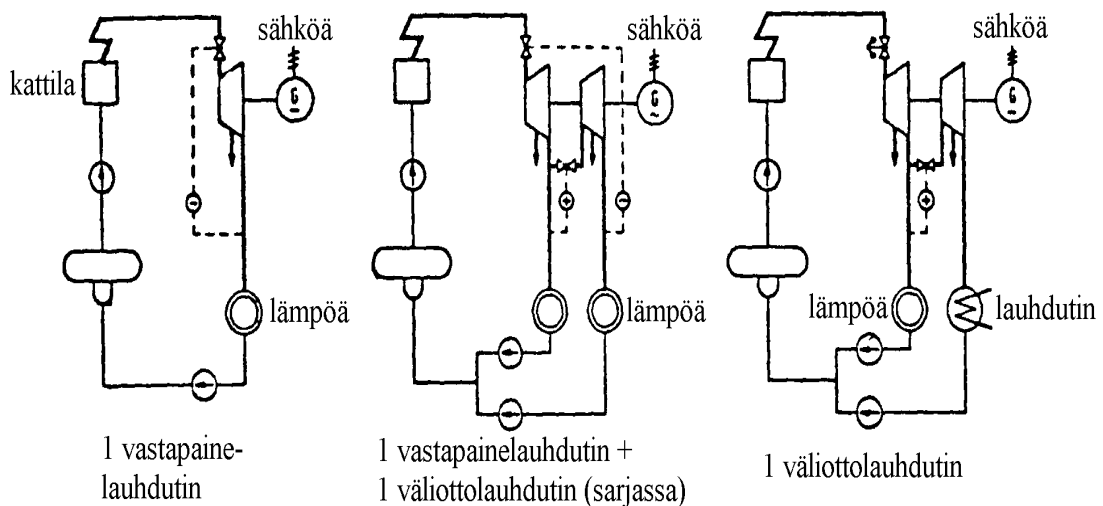
Kuva 5.40. Tyypillisiä lauhdutusvoimalaitoksen prosessiarvoja.

## 5.6.2 Lämmitysvoimalaitos

Polttoaineen käyttöä pystytään voimaloissa tehostamaan, jos lauhduttimessa vapautuvalla lämmöllä löydetään käyttöä. Yksi mahdollisuus on hyödyntää vapautuva lämpö kaukolämmön tuotantoon. Erilaisten kaukolämpöä tuottavien vastapainevoimalaitosten periaatteellisia prosessikaavioita on esitetty kuvassa 4.43. Turbiinin jälkeinen höyry lauhdutetaan kaukolämmönsiirtimessä, jossa vallitsee tarvittavasta lämpötilasta ( $t = 120 \dots 50 \text{ °C}$ ) riippuva vastapaine.

Lauhdutusvoimalaitoksen kokonaishyötysuhde on parhaimmillaan n. 44 – 46 % ja kaukolämpöä tuottavan vastapainevoimalaitoksen n. 90 %. Häviöt, joista suurin on kattilan savukaasuhäviö, ovat noin 10 %. Kuitenkin turbiinin jälkeisen höyryn korkeamman paineen takia on kaukolämpövoimalaitoksen sähköteho n. 10 % pienempi kuin vastaavilla tuorehöyryn arvoilla toimivan lauhdutusvoimalaitoksen.

Kaukolämpövoimala tuottaa sähköä sivutuotteena ja voimalaitosta käytetään yleensä lämmöntarpeen mukaan. Tämä merkitsee sitä, että sähköä tuotetaan pääasiassa talvella. Tämä sopii hyvin yhteen sähkön kulutusvaihteluiden kanssa, sillä myös sähkön tarpeen kulutushuiput osuvat talvikuukausiin sähkön valaistus- ja lämmityskäytön vuoksi. Mikäli halutaan varautua sähkö- ja lämpökuormien erilaisuuteen, voidaan kaukolämpöverkkoon rakentaa lämminvesivaraaja, tai apujäähdytin tai turbiini voidaan varustaa lauhdehännällä. (Huhtinen et al. 1991, s. 13.)

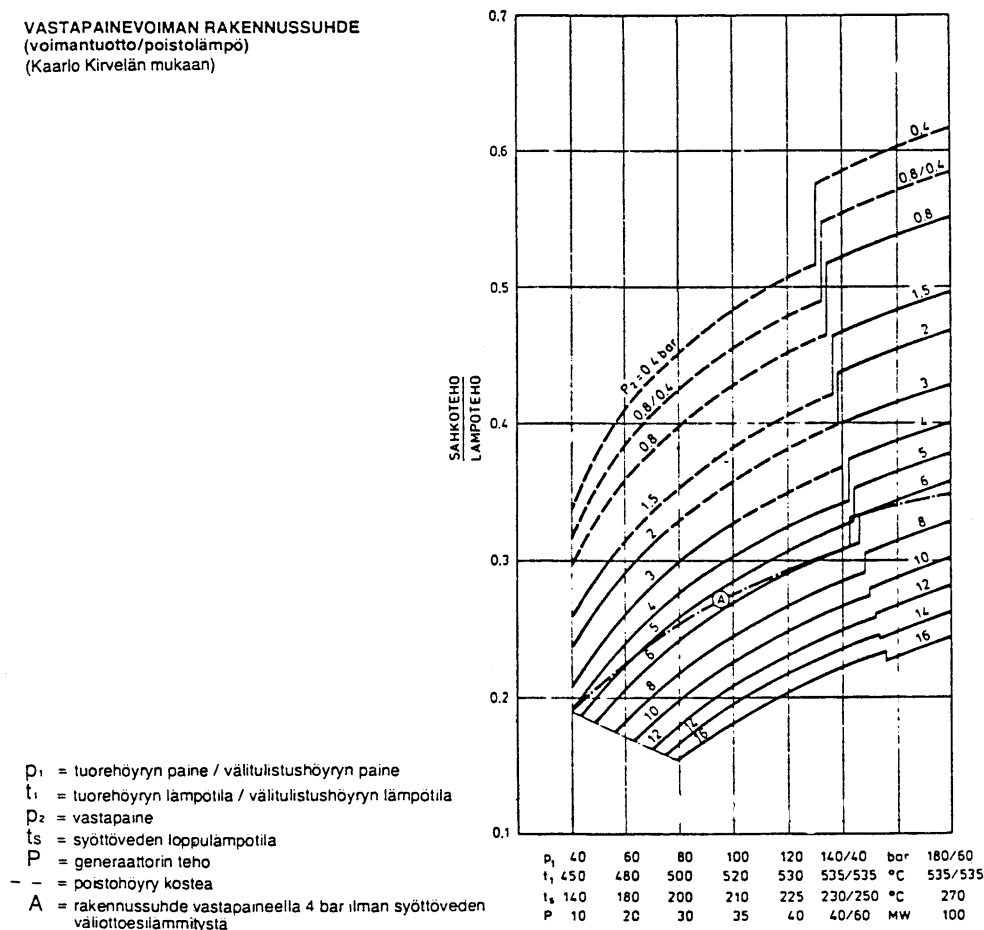


Kuva 5.41. Erilaisia lämmitysvoimalaitoksia.

### ***ΦP* –karakteristika**

Kuten edellä lauhdutusvoimalaitoksen yhteydessä on selitetty, lauhdutusvoimalaitoksen teknisen tason mittana on sen ominaislämmönkulutus eli kulutussuhde, jolla tarkoitetaan tuotetun sähköenergian suhdetta polttoainelämpöön. Vastapainelaitoksissa on välttämätöntä käyttää useampaa karakteristikkaa, koska tuotteita on kaksi, sähkö- ja lämpöenergia. Vastapainelaitoksen tärkeimpänä karakteristikkana on kehitetyn sähköenergian ja prosessi- tai kaukolämmön suhde, jota kutsutaan vastapainevoiman rakennusasteeksi (tai rakennussuhteeksi). Vastapainevoiman rakennusasteen riippuvuutta tuorehöyryn paineesta, lämpötilasta sekä vastapaineesta voidaan tarkastella kuvasta 5.42.

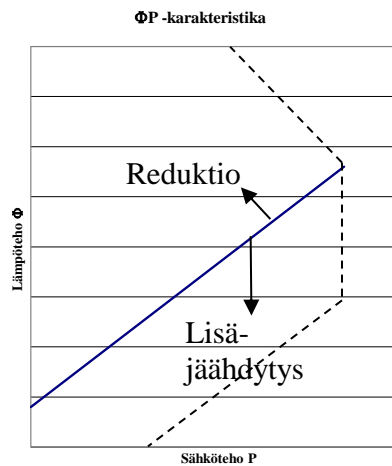
VASTAPAINOVOIMAN RAKENNUSSUHDE  
(voimantuotto/poistolämpö)  
(Kaarlo Kirvelän mukaan)



Kuva 5.42. Vastapainovoiman rakennussuhde.

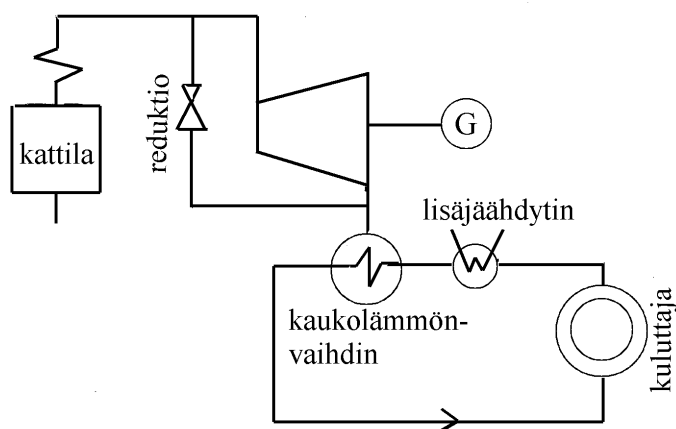
Käyttämällä sarjaan kytkettyjä kaukolämmön vaihtimia nousee rakennusaste edellisen kuvan vastapainelauhdutinkytkennän arvoista hieman. Suurissa höyrylaitoksissa on yleensä aina useita kaukolämmönvaihtimia sarjassa ja rakennusaste luokkaa 0,5. Yhdistämällä höyryvoimalaitokseen polttomoottori- tai kaasuturbiinivoimalaitos saadaan kombivoimalaitos, jonka rakennusaste on jopa yli 1.

Sähkötehon ja lämpötehon riippuvuutta toisistaan voidaan kuvata ns.  $\Phi P$ -karakteristikan avulla, jossa toisena akselina on sähköteho ja toisena lämpöteho. Kuvassa 5.43 on esimerkki yhdenlaisesta  $\Phi P$ -karakteristikasta, sekä periaatteet sähkö- ja lämpötehon välisen riippuvuuden muokkaamiselle.



Kuva 5.43.  $\Phi P$  –karakteristika.

Toimintapistettä voidaan siirtää  $\Phi P$  –karakteristikalta reduktiota tai lisäjähdytystä käyttämällä. Reduktiossa tuorehöyry ohjataan turbiinin ohi. Höyry kuristetaan venttiilillä pienempään paineeseen ja ruiskuttamalla vettä höyryn joukkoon alennetaan höyryn lämpötila halutuksi. Reduktio avulla laitoksen sähkötehoa voidaan muuttaa lämpötehoksi. Reduktio mahdollistaa myös lämmöntuotannon turbiinirikon aikana. Lisäjähdytyksellä voidaan toimintapistettä siirtää alaspäin, eli mahdollistaa lisäsähkön tuottaminen vaikka lämmöntarve ei kasvaisikaan. Yhdessä lisäjähdytys ja reduktio mahdollistavat sähkötehon ”priimauksen”. ”Priima-sähkö” on sähköä, jonka tuotantoa voidaan säätää vapaasti lämmöntuotannosta riippumatta. Priima-sähkön osuus lämmitysvoimalaitoksen sähköntuotannosta riippuu lisäjähdyttimen koosta. Lisäjähdytys korvataan nykyisin usein lämpöakulla (=suuri kuumavesivarasto).



Kuva 5.44. Reduktioventtiilin ja lisäjähdyttimen sijainti.

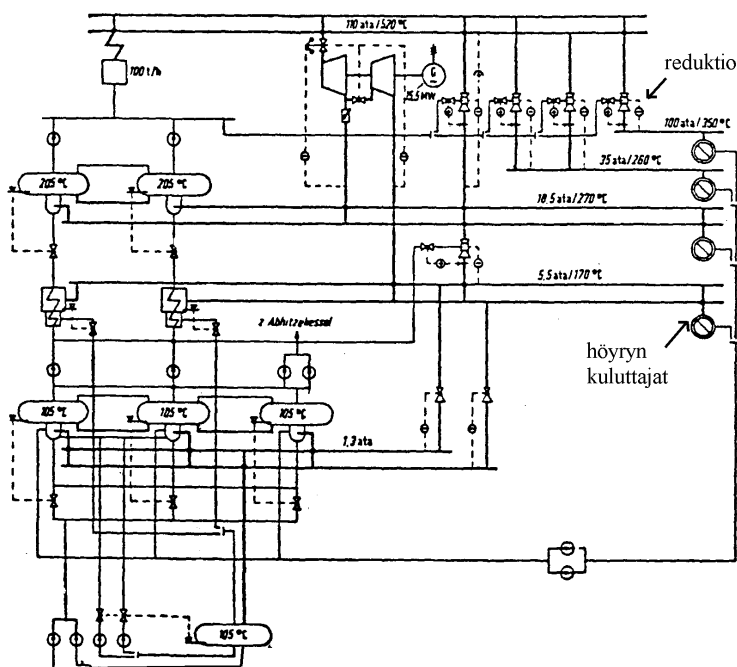


### 5.6.3 Teollisuuden vastapainevoimalaitos

Myös teollisuudessa esiintyy suuria lämpökuormia. Teollisuusprosessien lämmitys on yleensä toteutettu käyttäen lämmönsiirtoaineena höyryä, koska höyryn avulla saadaan helposti siirrettyksi suuria lämpötehoja ja kohde lämmitetyksi nopeasti höyryn hyvien lämmönsiirto-ominaisuuksien ansioista. Höyry sopii myös kohteiden suoraan lämmitykseen. Teollisuuden vastapainevoimalaitoksen edullisuus perustuu siihen, että höyryä lämmitykseen tuottavan kattilalaitoksen yhteyteen voidaan suhteellisen pienin lisäinvestoinnein rakentaa sähkövoimala. Sähkön tuotantoa varten on kattilan painetasoa nostettava ja lisäksi tarvitaan turbiinilaitos. Teollisuuden vastapainevoimalaitoksen periaatekaavio on kuvassa 5.45.

Tavallisesti teollisuusprosesseissa tarvitaan eripaineisia lämmityshöyryjä. Siksi höyryä voidaan ottaa myös turbiinin välitoista. Teollisuuden vastapainevoimalan kokonaisyhtöysuhde on samaa tasoa kuin kaukolämpövoimalan. Koska teollisuusprosesseissa tarvitaan korkeampia lämpötiloja ja sen vuoksi korkeampipaineisia lämmityshöyryjä, on lämmityshöyryn tuotannosta aiheutuva turbiinin sähkötehon menetys lauhdutusvoimalaitokseen verrattuna suurempi kuin kaukolämpövoimalaitoksen.

Teollisuuden vastapainevoimalaitoksissa käytetään polttoaineena usein teollisuusprosesseissa syntyviä jätteitä, esimerkiksi puunjalostusteollisuuden voimaloissa kuorta ja mustalipeää. (Huhtinen et al, 1997, 15.)



Kuva 5.45. Vastapainevoimalaitos. Prosessissa tuotetaan monen paineista vastapainehöyryä. Höyryä saadaan reduktioista, välitosta ja vastapainehöyrynä.



## 6 KAUKOLÄMPÖ JA RAKENNUSTEN LÄMMITYS

### 6.1 Yleistä

Kaukolämmitys on rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen, teollisuusprosesseihin yms. tarvittavan lämmön tuotantoa ja jakelua yleiseen kulutukseen laajalle alueelle, useille kaupungin osille tai koko kaupungille. Vuonna 1997 kaukolämmön kulutus oli Suomessa 27 TWh, joka jakautui seuraavasti: 55% asuinrakennukset, 11% teollisuus ja 34% muut. Kaukolämmön 30 TWh:n tuotannosta n. 77% saatiin yhdistetyllä sähkön ja lämmön tuotannolla. Lukumääräisesti lämmityskattiloita on kuitenkin lämmitysvoimalaitoksia enemmän.

### 6.2 Kaukolämmön tuottaminen

#### 6.2.1 Hankintalähteet

Kaukolämmön tarve voidaan peittää joko aiemmin voimalaitosten yhteydessä käsitellyillä vastapaine- eli lämmitysvoimalaitoksilla tai lämpökeskuksilla, jollaisia ovat höyry- ja vesikattilat.

Sähkön ja lämmön yhteistuotannon taloudellinen perusedellytys on luonnollisesti riittävän suuri ja tasainen lämpökuorma. Mikäli vastapainevoimalaitoksella on myös lauhdutusturbiini joko erillisenä tai vastapaineturbiinin osana, voidaan sähköä kehittää täydellä teholla pienenkin lämpökuorman aikana. Vastapainevoiman tuotanto on Suomen olosuhteissa erityisen hyvin soveltuva ratkaisu, koska sekä sähkön että lämmön suurin tarve ajoittuu talveen. Suomi onkin maailmanlaajuisesti lämmön ja sähkön yhteistuotannon johtava maa. Lämmön ja sähkön yhteistuotanto katsotaan Euroopan unionissa merkittävimmäksi yksittäiseksi keinoksi vähentää kasvihuonekaasujen syntymistä. EU onkin asettanut tavoitteekseen yhteistuotannon kaksinkertaistamisen vuoteen 2010 mennessä. Suomessakin yhteistuotannon merkitys kasvaa vielä entisestään.

Lämpökeskuskattilassa kaukolämpövesi lämmitetään polttoaineella tulipintojen läpi. Polttoteho säädetään siten, että nimellisvirtaamalla saavutetaan asetettu kaukolämpöveden ulostulolämpötila 120-130 °C. Kattilan polttimeen käyntiajalla säädetään lämpötilan pito.

#### 6.2.2 Tarvittava lämpömäärä

Tarvittava alueellinen lämmitysenergia on kyseisen alueen rakennuksissa kulutetun lämmitysenergian summa lisättynä siirtoverkostossa tapahtuvalla lämpöhäviöenergiamäärällä. Kaukolämpöjärjestelmän kokonaishäviö oli 2,6 TWh vuonna 1997 eli 8.8 %

tuotetusta lämmöstä. Häviö koostuu lämpöhäviöistä ja pumppausenergian tuotantoon kuluneesta sähköstä. Energiaa tarkastellaan yleensä niin pitkällä aikavälillä, että tuotannon, siirron ja kulutuksen hetkellisissä tehoissa esiintyvät viiveet ja energian varastointi eivät näy energiataseissa.

Tuotettu lämpömäärä  $Q$  tietyllä ajanjaksolla saadaan seuraavasti:

$$Q = (\bar{\Phi}_l + \bar{\Phi}_h)\Delta t = Q_t + Q_h \quad (6.1)$$

missä

$\bar{\Phi}_l$  on lämmityksessä tarvittu keskiteho ko. ajanjaksolla

$\bar{\Phi}_h$  keskimääräinen lämpöhäviöteho ko. ajanjaksolla

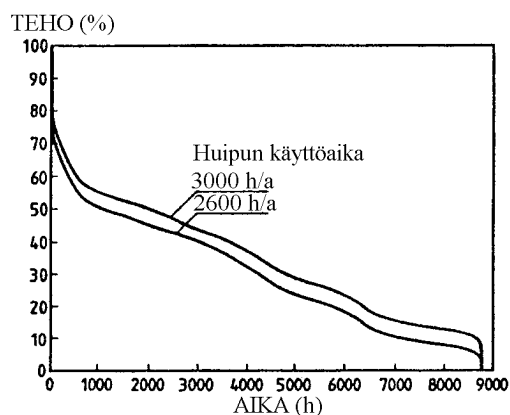
$\Delta t$  ajanjakson pituus

$Q_t$  lämmitysenergia ko. ajanjaksolla

$Q_h$  lämpöhäviöenergia ko. ajanjaksolla.

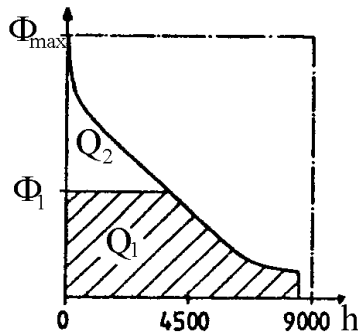
Varsin tärkeitä laskennallisia käsitteitä ovat tehon pysyvyyskäyrä, tietyn tehon, esim. huipputehon käyttöaika ja laitoksen käyttöaika.

Kuten sähköenergialle, voidaan myös keskitetylle lämmöntuotannolle määrittää tehon pysyvyyskäyrä. Kaukolämmityksessä vuoden ajanjaksolla tuotannon suhteellisen lämpökuorman pysyvyyskäyrä vaihtelee kuvan 6.1 mukaisesti riippuen mm. alueen koosta, erikoiskuluttajista, lämpöhäviöistä, alueen sijainnista jne.



Kuva 6.1 Kaukolämmityksen pysyvyyskäyrä.

Tietyn lämpötehon käyttöajan tai pysyvyyden määrittämiseksi tarkastella kuvaa 6.2, jossa on tietyn ajanjakson (vuoden) lämpökuorman pysyvyyskäyrä sekä tehon  $\Phi_1$  siitä rajoittama energiaosa  $Q_1$ . Kokonaisenergia  $Q$  on  $Q_1 + Q_2$ .



Kuva 6.2. Lämpötehon käyttöaika ja pysyvyyskäyrä.

Tällöin tehoa  $\Phi_1$  vastaava käyttöaika  $t_k$  ja pysyvyys  $p_k$  ovat

$$t_k = \frac{Q_1}{\Phi_1} \quad (6.2)$$

$$p_k = \frac{t_k [h]}{8760} \quad (6.3)$$

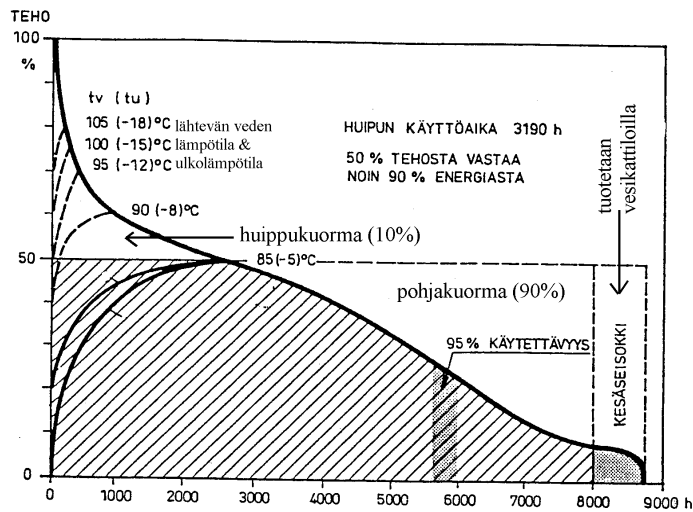
Vastaavasti huipputehon käyttöaika eli huipun käyttöaika on

$$t_{kh} = \frac{Q}{\Phi_{\max}} \quad (6.4)$$

Edellä olleessa kuvassa (6.1) oleville lämpökuorman pysyvyyskäyrille huipputehon käyttöajat ovat 2600 ja 3000 tuntia vuodessa. Tälle välille asettuu yleensä kaukolämpöjärjestelmän lämpötehon pysyvyys normaalivuonna. Isoissa järjestelmissä se on lähempänä 2600 h/a ja kasvaa pienemmillä järjestelmillä. Kuitenkin muutaman megawatin kokoluokassa erikoiskuluttajat (esim. suuri lämpimän käyttöveden kulutus) voivat muuttaa tilannetta suuntaan tai toiseen. Lisäksi energiasäästötoimenpiteiden vaikutuksesta huipunkäyttöaika voi ajan mittaan muuttua jonkin verran.

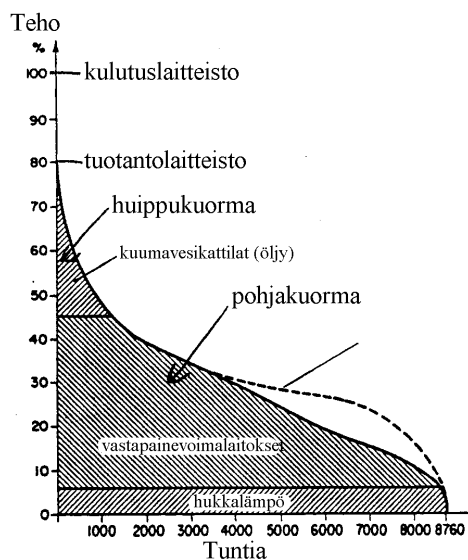
Vastapainevoimalaitoksilla edullinen sähköntuotanto seuraa lämmöntarvetta. Pienillä lämpökuormilla mm. kesäaikana edullinen sähköntuotanto vähentyy. Koska huipputehon tarve on lyhytaikainen, rakennetaan kalliit vastapainevoimalaitokset ja kiinteän polttoaineen lämpökeskukset noin 50 % huipputehosta. Loppuosa tehontarpeesta hoidetaan pääasiassa öljykäyttöisillä lämpökeskuksilla. Öljyn osuus koko energiasta on

tällöin kuitenkin vain 10 – 15 %. Kuvassa 5.3 pyritään selventämään asiaa. (Kaukolämmityksen käsikirja, 1989, 8.)



Kuva 6.1. Kaukolämmöntuotannon pysyvyyskäyrä.

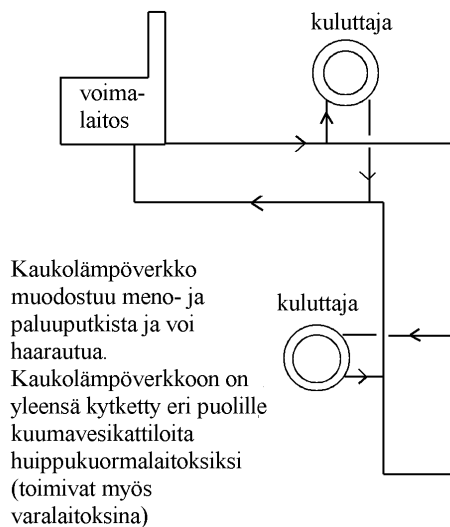
Vastaavasti kuvassa 6.4. tarkastellaan tyypillisiä mitoitusperusteita pysyvyyskäyrällä. 100 % teho tarkoittaa verkostoon liitettyjen kuluttajien laitteiden maksimitehoa. Laitokset mitoitetaan kuitenkin siten, että 80 % tästä kokonaistehosta on kaukolämpölaitosten maksimiteho, koska käytännössä maksimitehoa ei koskaan saavuteta. Kuvasta 5.4. ilmenee myös edellä mainittu kaukolämpöä tuottavien pohjakuormalaitosten tyypillinen mitoitusperuste eli n. 50 % lämmöntarpeen maksimitehosta.



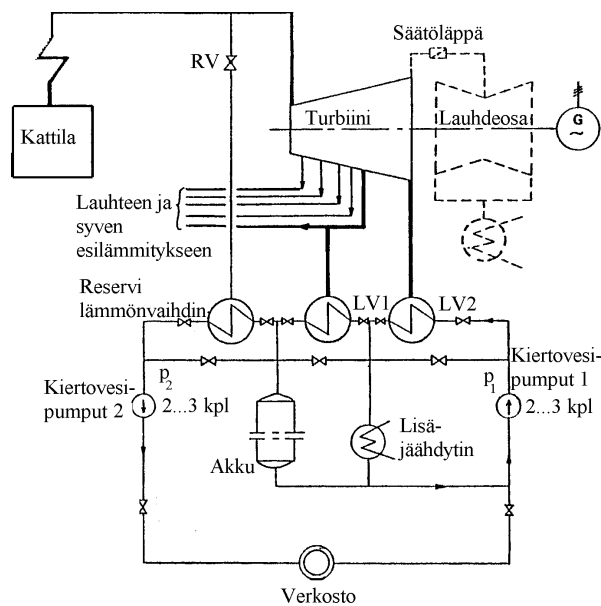
Kuva 6.4. Tyypillinen mitoitusperuste pysyvyyskäyrällä.

### 6.3 Kaukolämmön siirtoverkko

Kaukolämpö siirretään tuotantolaitoksilta asiakkaille kuumana vetenä suljetussa kaksiputkisessa (meno- ja paluujohto) kaukolämpöverkossa. Menojohdossa kiertävä kaukolämpövesi luovuttaa lämpöä asiakkaille kaukolämpölaitteiden välityksellä ja palaa jäähtyneenä paluujohdossa takaisin tuotantolaitokseen uudelleen lämmitettäväksi. Lisäksi verkkoon on yleensä kytketty eri puolille kuumavesikattiloita huippukuormalaitoksiksi. Nämä kattilat toimivat myös varalaitoksina. Kuvassa 6.5. on esitetty kaukolämpöverkon periaate. Kuvassa 6.6. on tarkemmin voimalaitoksen kytkeminen kaukolämpöverkkoon, lisänä mahdollinen lämpöakku ja lisäjäähdytin.

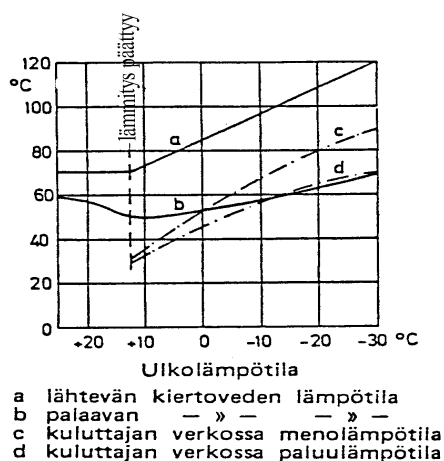


Kuva 6.5. Kaukolämpöverkko.



Kuva 6.6. Voimalaitoksen kytkeminen kaukolämpöverkkoon.

Kaukolämpöveden lämpötila vaihtelee sään mukaan 65 ... 115 °C välillä. Paluuveden lämpötila on 40-50 °C riippuen vuodenajasta ja vuorokauden ajasta. Kiertävän veden massavirtaa säädetään pumppauksella ja sillä vaikutetaan kaukolämpöverkon siirtokykyyn. Verkon siirtokykyyn vaikutetaan myös menoveden lämpötilalla, mitä suurempi jäähdytys sitä suurempi siirtokyky. Kuvasta 6.7. ilmenee ulkolämpötilan vaikutus kaukolämpöveden lämpötilaan. Kaukolämpöveden tarve päättyy kuvan mukaan ulkoilman lämpötilan lämmitessä hieman yli kymmeneen asteeseen. Kuvasta käyvät ilmi myös kuluttajan verkossa kiertävän veden lämpötilat.



Kuva 6.7. Kaukolämpöveden lämpötilat ja ulkolämpötilat.

Kaukolämpöjohdot asennetaan maahan yleensä 0,5 - 1 m syvyyteen. Johdot on lämpöeristetty tehokkaasti. Johtojen siirtämästä energiasta kuluu jakeluverkon lämpöhäviöihin keskimäärin vajaa 10 %.

Lämpökeskuksen pumpuilla aikaansaatu paine-ero mahdollistaa kaukolämpöveden kiertämisen kaukolämpöverkossa ja asiakkaan kaukolämpölaitteissa. Kaukolämpöverkon paine ja paine-ero vaihtelevat jatkuvasti. Talvella ne ovat yleensä korkeammat kuin kesällä. Korkeimmillaan menojohdon paine voi olla noin 1,5 MPa (15 bar). Asiakkaan kaukolämpölaitteet mitoitetaan lämmönmyyjän ilmoittamalla, normaaleissa käyttöolosuhteissa vallitsevalla paine-erolla, joka on vähintään 60 kPa (0,6 bar).

Kaukolämmön toimitus on hyvin luotettavaa. Kaukolämpöverkon vaurioista ja niiden korjaustoista johtuvien käyttökeskeytysten takia kaukolämpöasiakas on keskimäärin ainoastaan yhden tunnin vuodessa ilman lämpöä. Toimitusvarmuus on lähes sataprosenttinen.

Kaukolämpöverkon kokonaispituus Suomessa on 8 200 km. Johtojen koko vaihtelee talojen liittymisjohtojen 20 mm:stä Helsingin Vuosaaren voimalaitokselta lähteviin 1000 mm putkiin. Taulukossa 6.1. on olemassa olevien kaukolämpöjohtojen teknisiä



tietoja. Kaupungeissa ja muissa suuremmissa taajamissa verkot kattavat käytännössä koko kaukolämmitykseen taloudellisesti liitettävissä olevan alueen. Vuosittain verkon pituus kasvaa n 200 km pääasiassa olemassa olevan verkon täydennysrakentamisena ja uudisrakennusten järjestelmään liittämisenä.

Taulukko 6.1. Kaukolämpöjohdot.

Ns [mm]	700	600	500	400	300	200	150	125	100	80	65	50	40
Siirtoteho [MW]	280	190	116	65	35	12	6,0	3,8	2,1	1,1	0,7	0,4	0,8
Veden nopeus [m/s]	3,6	3,3	3,0	2,6	2,2	1,8	1,5	1,3	1,2	1,0	0,9	0,2	0,7
Vesivirta, kun $\Delta t = 50^{\circ}\text{C}$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	1,33			0,36									
	pääjohtoja			runkojohtoja				kortteli-johtoja		talojohtoja			

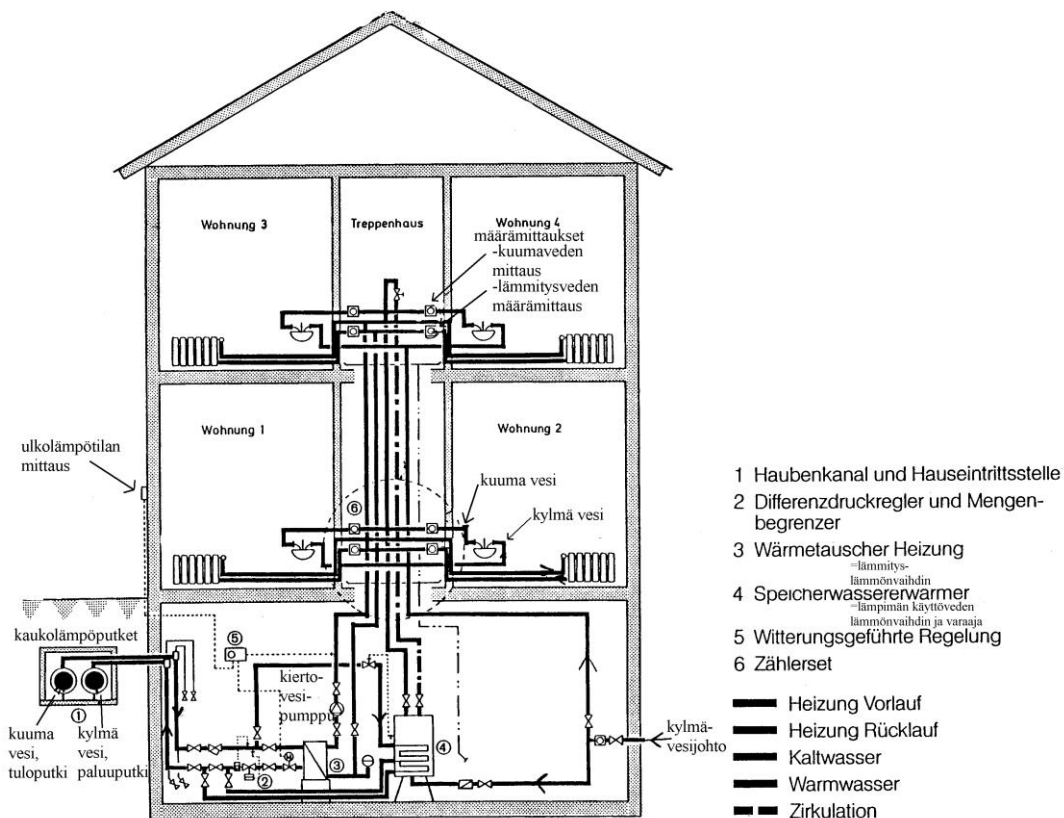
Taloissa oleviin energia- tai kaukolämpöyrityksen omistamiin kaukolämpölaitteisiin kuuluvat kaukolämpöputket, lämmönmyyjän sulkuventtiilit, lianerotin ja lämpöenergiamittari. Kaukolämpövesi ei kierrä talojen lämmitysverkossa, vaan välissä on lämmönvaihdin. Kaukolämpöverkon puolella maksimi tulolämpötila on  $115^{\circ}\text{C}$  ja käyttövesisiirtimelle  $70\text{--}65^{\circ}\text{C}$ . Käyttöveden lämpötila on  $55^{\circ}\text{C}$ . Patteriverkon lämpötilat ovat  $70/40^{\circ}\text{C}$ . Kuvassa 6.8. on esimerkki kerrostalon kytkemisestä kaukolämpöverkkoon. Taulukossa 6.2. on puolestaan rakennusten vuotuisia keskimääräisiä energian ja veden ominaiskulutuksia.

Suomessa on otettu käyttöön rakennusten energiatehokkuusluku (ET-luku), jonka avulla voidaan rakennukset luokitella energiatehokkuuden perusteella. Nykyisin parhaaseen luokkaan eli A-luokkaan kuuluvat rakennukset, joiden vuosienergiankulutus on alle  $150 \text{ kWh/m}^2/\text{vuosi}$ . Lähivuosina luokittelun vaatimustason odotetaan kiristyvän noin  $30\text{--}40\%$ . Energiatehokkuudessa keskinkertaisen ( $230 \text{ kWh/m}^2/\text{vuosi}$ ) ja energialuokaltaan A olevien rakennusten rakentamiskustannukset poikkesivat vuonna 2008 toisistaan noin  $10\text{--}20\%$ .

## Taulukko 6.2. Rakennusten ominaiskulutuksia.

**Rakennusten vuotuisia keskimääräisiä energian ja veden ominaiskulutuksia Suomessa rakennustilavuutta kohti laskettuna (Energialoudellisesti hyvin rakennettujen, uusien rakennusten lämmönkulutus alittaa usein taulukon alarajat)**

	Kaukolämpö kWh/m <sup>3</sup> (MJ/m <sup>3</sup> )	Kevytöljy l/m <sup>3</sup> (MJ/m <sup>3</sup> brutto)	Sähkö kWh/m <sup>3</sup>	Vesi m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> /d, asukas)
Asuinkerrostalot	45...70 (160...250)	6...10 (220...360)	6...12	0,4...1,0 (0,14...0,22)
Asuinpienitalot	45...80 (160...290)	6...11 (220...400)	8...14 40...80*	0,3...1,0 (0,10...0,25)
Teollisuusrakennukset	30...70 (110...250)	4...9 (140...320)	Vaihtelu suuri	Vaihtelu suuri
Myyvälät, toimistot, virastot, koulut jne.	30...60 (110...220)	5...9 (180...320)	10...50	0,1...0,6
Sairaalat ja terveyskeskukset	60...100 (220...360)	8...12 (290...430)	10...25	0,5...1,0



Kuva 6.8. Kerrostalon kytkeminen kaukolämpöön.

## 6.4 Rakennusten energiankulutus

Rakennuksen lämmitysenergia kuluu kahteen lämpöhäviöön eli rakennuksen rakenteiden läpi menevään lämpöhäviöön sekä rakennuksen ilmanvaihdon aiheuttamaan lämpöhäviöön. Lisäksi rakennuksen lämmitysenergiaa tarvitaan myös lämpimän veden tuottamiseen.

Rakennuksen lämmittämiseen tarvittava lämpöteho  $\phi_t$  saadaan kaavasta

$$\phi_t = (G + C_i) (T_s - T_u) \quad (6.5)$$

jossa

- $G$  = rakenteiden lämpökonduktanssi (W/K), (seinät, lattia, katto, ikkunat)
- $C_i$  = ilmanvaihdon lämpökapasiteettivirta (W/K)
- $T_s$  = sisäilman lämpötila (K)
- $T_u$  = ulkoilman lämpötila (K)

Rakenteiden lämpökonduktanssi saadaan seuraavasta kaavasta

N

$$G = \sum_i k_i A_i = k_1 A_1 + k_2 A_2 + \dots + k_N A_N \quad (6.6)$$

i

jossa

- $N$  = rakennuksen ulkopinnan osien lukumäärä
- $k_i$  = rakennuksen pintaosan  $i$  lämmönläpäisykerroin (W/m<sup>2</sup>K) (kts. lämmönsiirron kurssit)
- $A_i$  = rakennuksen pintaosan  $i$  pinta-ala (m<sup>2</sup>)

Rakennuksen ilmanvaihdon lämpökapasiteettivirta lasketaan kaavalla

$$C_i = \rho_i c_i V_i \quad (6.7)$$

jossa

- $\rho_i$  = ilman tiheys (kg/m<sup>3</sup>)
- $c_i$  = ilman ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)
- $V_i$  = ilman tilavuusvirta (m<sup>3</sup>/s)

Ilman tilavuusvirta lausutaan usein ilman vaihtuvuuden avulla seuraavasti

$$V_i = n V_s / 3600 \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (6.8)$$

jossa

- $n$  = ilman vaihtuvuus tunnissa (1/h) (ohjearvo  $n > 0,5$ )
- $V_s$  = rakennuksen ilmatilavuus ( $\text{m}^3$ )

Lisäksi rakennuksessa kuluu lämpöä lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Tämä energiamäärä voidaan laskea seuraavasti kulutetun keskimääräisen lämpimän vesivirran avulla seuraavasti

$$\phi_v = m_v c_v \Delta T_v \quad (6.9)$$

jossa

- $m_v$  = lämpimän käyttöveden massavirta (kg/s)
- $c_v$  = veden ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)
- $\Delta T_v$  = veden lämpötilan nousu (K)

Rakennuksen kokonaislämmöntarve  $\phi_l$  on siis

$$\phi_l = \phi_t + \phi_v \quad (6.10)$$

Edellä esitetyllä teoriolla saadaan laskettua rakennuksen lämmitysteho ulkolämpötilan ollessa vakio, kun auringon lämpösäteily ikkunoista  $\phi_{aur}$  ja rakennuksen sisäinen lämmöntuotto  $\phi_{sis}$  (ihmiset, valaistus, koneet) jätetään huomiotta. Tarkasteltaessa pitkän aikavälin  $t_1$ - $t_2$  lämmitysenergian nettotarvetta  $Q$  joudutaan ulkolämpötilan vaihtelun vaikutus lämmitystehoon ottamaan huomioon.  $Q$  saadaan integroimalla seuraavasti (mukana lämminvesi)

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} (\phi_l - \phi_{sis} - \phi_{aur}) dt = \int_{t_1}^{t_2} ((G + C_i)(T_s - T_u) - \phi_{sis} - \phi_{aur}) dt \quad (6.11)$$

Sisä- ja ulkolämpötilan erotuksen integraali  $S$  lämmityskauden aikana on nimeltään as-  
tepäiväluku, jonka laatu on (Kd). Ulkolämpötilamittausten avulla on eri paikkakuntien keskimääräiset astepäiväluvut saatu selville. Astepäivälukuja voidaan käyttää rakennuksen lämmitystarpeen ennustamiseen. Astepäiväluvut annetaan yleensä sisälämpötilan  $17^\circ\text{C}$  mukaisesti. Tällöin on oletettu, että rakennuksen sisäinen lämmöntuotto ja auringon säteily lämmittävät tilaa  $3^\circ\text{C}$ .

Taulukko 6.3. Eri paikkakuntien keskimääräisiä astepäivälukuja S<sub>17</sub>.

Vuosi/kuukausi	Helsinki- Vantaa	Tampere	Jyväskylä	Joensuu	Oulu	Sodankylä
tammikuu	783	772	818	853	821	983
helmikuu	683	700	734	767	760	857
maaliskuu	654	676	694	725	744	815
huhtikuu	444	444	468	483	513	576
toukokuu	183	211	249	265	310	388
kesäkuu	-	-	-	-	7	75
heinäkuu	-	-	-	-	-	-
elokuu	-	-	-	-	16	108
syyskuu	154	193	268	224	243	324
lokakuu	378	394	434	431	446	539
marraskuu	492	507	558	567	573	702
joulukuu	626	648	707	729	713	877
<b>Yhteensä</b>	<b>4370</b>	<b>4550</b>	<b>4930</b>	<b>5040</b>	<b>5150</b>	<b>6244</b>

## 7 YDINENERGIA

Maailmassa on käytössä lähes 420 ydinvoimalaa, joiden asennettu teho on yhteensä 345 GW. Niiden osuus sähkön tuotannosta on 17% koko maailmassa, 35% Euroopan unionissa ja 30% Suomessa. (Energia Suomessa, 1999, 247.)

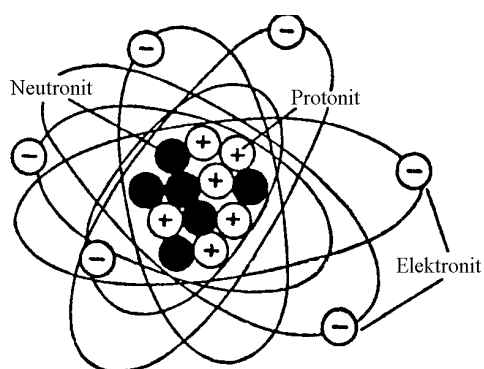
### 7.1 Reaktoritekniikan perusteet

Ydinenergiaa eli atomiytimien sidosenergiaa saadaan käyttöön joko halkaisemalla raskaita atomiytimiä tai yhdistämällä kevyitä atomiytimiä. Ytimien halkeamista kutsutaan fissioksi, halkeavina ytiminä ovat uraanin ja plutoniumin tietyt isotoopit. Kevyiden atomiytimien yhdistyminen on fuusio, yhdistyvinä ytiminä ovat vedyn tavallista raskaammat isotoopit deuterium ja tritium.

Fissioreaktioon perustuva energiantuotanto on kaupallisessa käytössä, fuusioteknologia sen sijaan vasta kehitteillä. Ensimmäisenä fissiossa vapautuvan energian havaitsi Hahn vuonna 1938. Fissiossa vapautuu myös neutroneja, jotka tekevät mahdolliseksi fissioiden tapahtumisen ilman ulkoisia neutroneja ketjureaktiona. Laitetta, jossa tapahtuu kontrolloitu ketjureaktio kutsutaan ydinreaktoriksi. Ensimmäisen kontrolloidun ketjureaktion sai aikaan Enrico Fermi johdolla toiminut työryhmä Chicagon yliopiston stadionilla joulukuun 2. päivänä 1942.

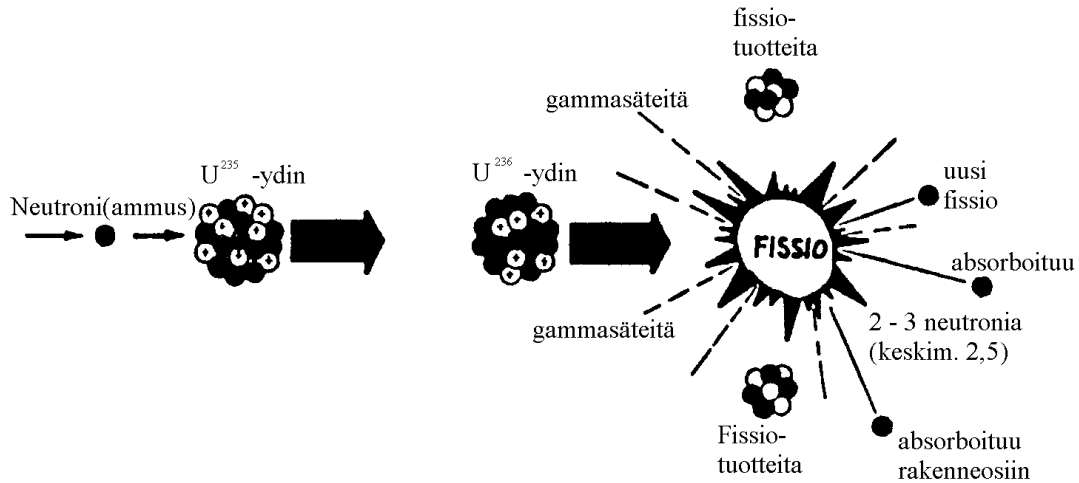
#### 7.1.1 Fissio

Atomiytimen tärkeimmät rakenneosat ovat neutronit (varauksettomia), protonit (positiivisesti varattuja) ja elektronit (negatiivisesti varattuja).



Ensi näkemältä tuntuu, että saman-merkkisten protonien väliset työntövoimat hajottaisivat ytimen. Näin ei kuitenkaan käy, koska pienillä etäisyyksillä osa protonien massasta muuttuu ns. Sidos-energiaksi, joka maan vetovoimakentän tavoin (useita 10 potensseja voimakkaampi) vaikuttaa neutronien ja protonien välillä. Ytimen alkeishiukkasta kohti on sidosenergian määrä eri aineilla erilainen, joten sidosenergiaa vapautuu tai sitoutuu muutettaessa alkuaineita toisiksi aineiksi.

Luonnossa olevista aineista vain  $U^{235}$  täyttää asetettavat vaatimukset.  $U^{235}$  -ytimen ketjureaktion kulku ilmenee kuvasta 7.1.



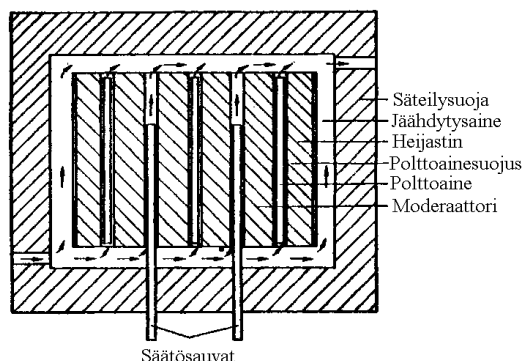
Kuva 7.1. Uraaniytimen halkeama (fissio) kaavamaisesti esitettynä. Fissiossa vapautuu atomeja kohti energiaa noin 50 milj. kertaa enemmän kuin palamisessa.

Fissiossa vapautuva energia, joka  $U^{235}$ :n tapauksessa on 206 MeV (  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ), jakautuu seuraavasti:

Fissiotuotteiden kineettinen energia	165 Mev
Gammakvanttien energia	8 ”
Neutronien energia	5 ”
Fissiotuotteiden hajotessa vapautuva $\beta$ -säteilyenergia	9 ”
Fissiotuotteiden hajotessa vapautuva $\gamma$ -säteilyenergia	7 ”
Antineutrinojen energia	12 ”
Yhteensä	206 MeV

## 7.1.2 Ydinreaktorin periaate

Nk. termisen ydinreaktorin periaatteellista rakennetta esittää kuva 7.2.



Kuva 7.2. Ydinreaktorin toimintaperiaate.

Reaktorin keskeinen osa on reaktorisydän, joka koostuu polttoaineesta ja moderaattorista. Fissioreaktiot tapahtuvat polttoaineen sisältämässä fissiokelpoisessa aineessa, tavallisimmin uraanissa. Polttoaine koostuu elementeistä, jotka taas muodostuvat joukosta polttoainelevyjä tai –sauvoja. Jotta fissiossa syntyvä neutroni saataisiin osumaan  $U^{235}$ -yttimeen, on neutronin fissiossa saama nopeus saatava hidastumaan. Hidastuminen tapahtuu siten, että neutroni törmää hidastinaineen eli ns. moderaattorin ytimeen, jolle se luovuttaa osan energiastaan. Neutronien hidastuessa todennäköisyys neutronin aiheuttamaan fissioon kasvaa. Reaktorisydäntä ympäröi heijastin, jonka tehtävänä on pienentää reaktorisydämessä syntyvien neutronien vuotoa ulos reaktorista. Reaktorisydän ja heijastin sijaitsevat reaktorin (paine)astiassa, jota ympäröi säteilysuoja reaktorisydämessä syntyvän säteilyn haitallisten vaikutusten eliminoimiseksi. Ketjureaktion nopeutta voidaan säätää säätösauvojen avulla.

Fissiossa vapautuva energia ilmenee pääasiassa halkeamistuloksena syntyvien fissiotuoteatomien liike-energiana, joka makroskooppisessa muodossa näkyy polttoaineessa syntyvänä lämpöenergiana. Lämpöenergia johdetaan pois tehon kehitykseen käytettävästä reaktorista jäähdytysaineen avulla. (Saastamoinen 1974, 2; Ojala 1971, 89 – 91)

## 7.2 Reaktorityypit

Ensimmäiset energiantuotantoon tarkoitetut reaktorit kehitettiin 1950-luvun alussa Yhdysvalloissa. Ne olivat tyypiltään termisiä kevytvesireaktoreita, ja aluksi niitä käytettiin sukellusveneiden voimanlähteenä. Ensimmäinen varsinainen ydinvoimalaitosreaktori käynnistettiin Obninskissa Neuvostoliitossa vuonna 1954. Myös muissa ydinvoimaa

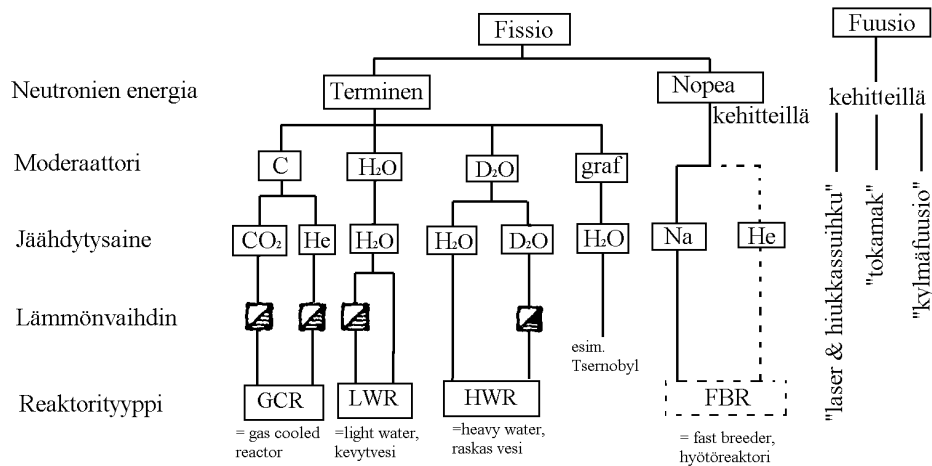


runsaasti käytävissä maissa, esimerkiksi Englannissa ja Ranskassa, 1950-luku ja 1960-luku olivat vilkkaan kehitystyön aikaa. Laajaan kaupalliseen käyttöön päässeet ydinvoimalaitostyyppit valikoituivat 1960-luvulla. Sen jälkeen reaktoreiden rakenne on pysynyt periaatteessa samanlaisena, mutta turvajärjestelmiä on vahvistettu ja kehitetty huomattavasti.

Termiset reaktorit luokitellaan niissä syntyviä neutroneita hidastavan aineen sekä reaktoria jäähdyttävän aineen perusteella. Yleisimpiä ovat kevytvesireaktorit. Niissä vesi toimii samalla sekä neutronien hidastimena että reaktorin jäähdytteenä. Näitä on kahta eri tyyppiä. Suomessa on kummankin tyyppisiä kevytvesireaktoreita. Loviisan ydinvoimalaitoksen reaktorit ovat painevesireaktoreita (PWR) ja Olkiluodon kiehumusvesireaktoreita (BWR). Kevytvesireaktoreita on eniten käytössä Yhdysvalloissa, Ranskassa, Saksassa, Japanissa ja entisessä Neuvostoliitossa. Kevytvesireaktoreista PWR ja sen venäläisversio VVER on huomattavasti yleisempi kuin kiehumusvesireaktori BWR. Kanadalaisten CANDU-painevesireaktori käyttää jäähdytteenä ja moderaattorina raskasta vettä ( $D_2O$ ), jolloin luonnonuraanikin käy polttoaineeksi. Kaasujäähdytteisiä reaktoreita (GCR), joissa moderaattorina on grafiitti, rakennettiin ydinvoiman kaupallisen käytön alussa runsaasti erityisesti Englantiin. Tsernobyliissa ja mm. Suomen lähellä Sosnovy Borissa olevat RBMK-laitokset ovat periaatteessa kiehumusvesireaktoreita mutta niiden sydän on merkittävästi BWR-laitoksista poikkeava siinä, että moderaattorina toimii grafiitti (mistä nimitys grafiittimoderoidut laitokset). Uraania olennaisesti paremmin hyödyntävissä nopeissa hyötöreaktoreissa (FBR, fast breeder) jäähdytteenä toimii sulaa natriummetalli. Eri tyyppisiä voimalaitoksia on koottu kuvaan 6.3.

Reaktoreiden koko vaihtelee käytettävän hidasteen ja polttoaineen rikastusasteen mukaan. Kevytvesireaktorit ovat kooltaan pienimpiä, halkaisijaltaan ja korkeudeltaan noin 3,5 metriä. Isoin on RBMK-laitoksen reaktori, jonka halkaisija on noin 12 metriä ja korkeus noin 7 metriä. (Lähde [www.stuk.fi](http://www.stuk.fi).)

Monista mahdollisista moderaattori- ja jäähdytysainevaihtoehdoista ovat nykyisin jäljellä seuraavat reaktorityypit:



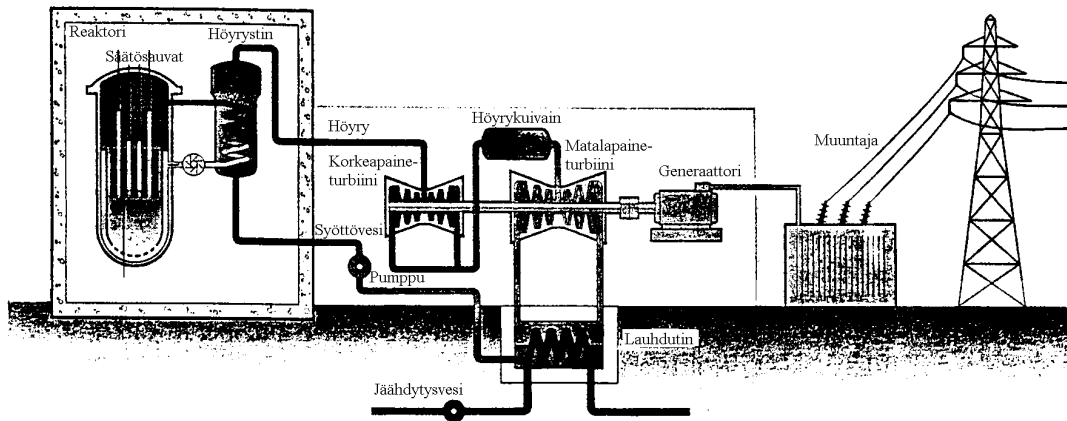
Kuva 7.3. Nykyisin käytössä ja kehitteillä olevat reaktorityypit.

Fuusioteknologian kehittämiseen käytetään paljon julkisia tutkimusvaroja. Tärkeäksi kaupalliseksi energianlähteeksi fuusion ennustetaan ehtivän aikaisintaan noin 50 vuoden kuluttua. Valtaosa fuusioreaktorin kehittämistyöstä kohdistuu tokamak-laitteisiin, joissa fuusiopolttoainetta sisältävä kuuma plasma pidetään koossa magneettisesti. Toinen päävaihtoehto on inertiaalifuusio, jossa fuusiopolttoaine puristetaan kokoon voimakkaan laservalon tai hiukkassuihkujen avulla. (Energia Suomessa, 1999, 256)

Seuraavassa käsitellään tarkemmin Suomessa käytössä olevia reaktorityyppejä, kevytvesireaktoreita.

## 7.2.1 Painevesireaktori

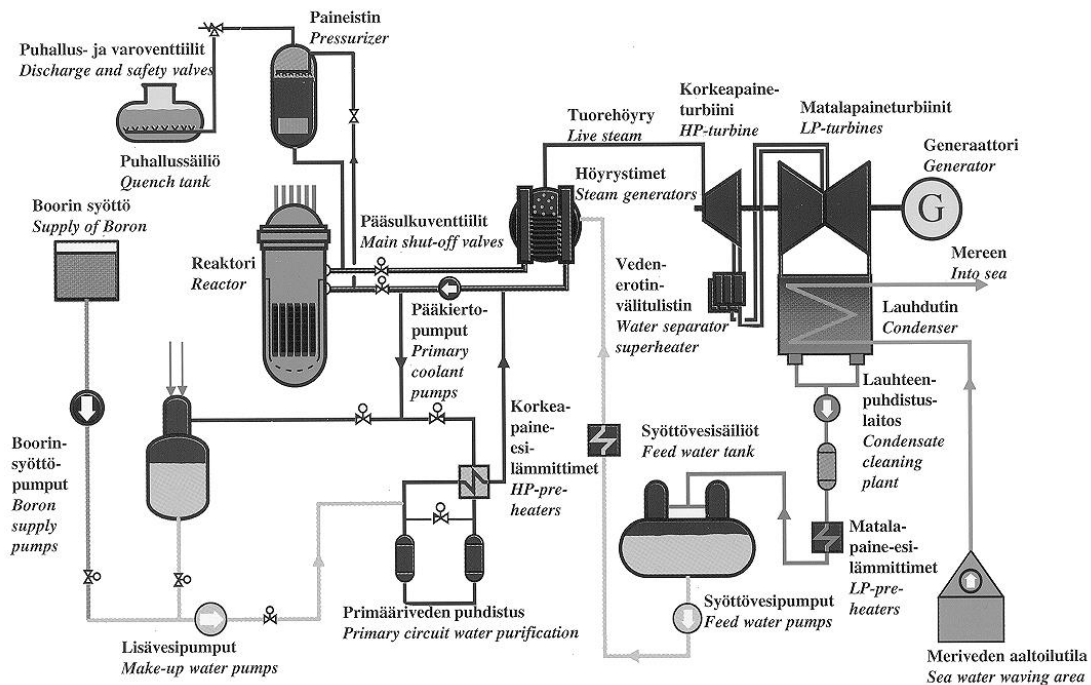
Painevesireaktorissa ylläpidetään niin korkeaa painetta, että vesi ei kiehu huolimatta noin 300 asteen lämpötilasta. Tavallisimmin paine on 150 bar (15 MPa). Kuuma vesi pumpataan reaktorista nesteinä lämmönvaihtimeen, jossa se luovuttaa lämpönsä putkiston seinämien läpi lämmönvaihtimen toisiopuolella kulkevalle vedelle. Tämän veden paine on noin 70 bar (7 MPa). Se kiehuu höyryksi ja johdetaan turbiiniin. Lämmönvaihdin erottaa reaktorijärjestelmän ja turbiinijärjestelmän vedet toisistaan, minkä vuoksi painevesireaktorin turbiinilaitoksessa ei ole radioaktiivisuutta. Kuvassa 6.4 esitetään painevesilaitoksen toimintaperiaate.



Kuva 7.4. Painevesilaitoksen toimintakaavio.

Polttoaineena painevesilaitoksessa ja kevytvesireaktoreissa (LWR) yleensäkin käytetään luonnonuraanista isotoopin  $U^{235}$  suhteen 3 %:ksi väkevöityä uraania. Reaktoripaineastian sisälle sijoitetussa reaktorisydämessä on nipuiksi koottuina polttoainesauvoina noin 100 tonnia uraania  $UO_2$ -muodossa.

Suomen laitoksista Loviisan molemmissa yksiköissä on painevesireaktori. Loviisan voimalaitosyksikön pääkiertokaavio on kuvassa 6.5. Siitä ilmenevät keskeiset laitoksen voimantuotossa tarvittavat osaprosessit.



Kuva 7.5. Loviisan voimalaitoksen pääkiertokaavio. (Fortumin esite)

Loviisan yhden yksikön tekniset tiedot löytyvät taulukosta 6.1.

Taulukko 7.1.

**Yhden yksikön teknisiä tietoja:**

**Painevesireaktori (PWR)**

*Sähköteho, brutto	465 MW
*Sähköteho, netto	445 MW
*Vuotuinen sähköntuotanto	noin 3,3 TWh
*Kokonaishyötysuhde	33 %
*Lämpöteho	1375 MW
<b>*Reaktorisydän</b>	
- korkeus	2,4 m
- halkaisija	2,8 m
- polttoainemittien lukumäärä	313 kpl
- teräselementtien lukumäärä	36 kpl
- polttoainesauvoja/nippu	126 kpl
- polttoainemäärä	37,3 tU
- tuoreen polttoaineen väkevöinti	3,6 %
- vuosittain vaihdettava polttoainemäärä	12,5 tU
- latausjakson nimellispituus	7 800 h
- booriteräksisiä säätösauvoja	37 kpl
- poistopalama keskimäärin	33 000 MWd/tU
<b>*Reaktorin jäähdytysvesi</b> (kuusi kiertopiiriä)	
- booripitoinen tislattu vesi	
- virtaus	6 x 7 100 t/h
- tulolämpötila reaktoriin	267 °C
- lähtölämpötila reaktorista	296 °C
- paine	123 bar

**\*Reaktorin paineastia VVER-440**

- CrMoV-seosteinen hiiliteräs ruostumattomalla teräsvuorauksella	
- korkeus	13,4 m
- halkaisija	4,1 m
- seinämän vahvuus sylinteriosassa	148 mm

**\*Suojarakennus**

- sisempänä vapaasti seisova jäälauhduttimella varustettu teräsuojakuori, ulompana betoniseinä	
- korkeus	64 m
- teräsuojakuoren halkaisija	44 m
- jäälauhdutin	835 t jäätä (lämpötila -9 °C)

**\*Turbiinit (2 kpl)**

- nimellisteho	235 MW
- kierrosnopeus	3 000 r/min
- höyryn virtaus	400 kg/s
- höyrynpaine	44 bar
- höyryn lämpötila	255 °C

**\*Generaattori (2 kpl)**

- nimellisteho	220 MW
- nimellispännite	15,75 kV
- nimellisvirta	8960 A
- tehokerroin	cos φ 0,9
- hyötysuhde	98,7 %

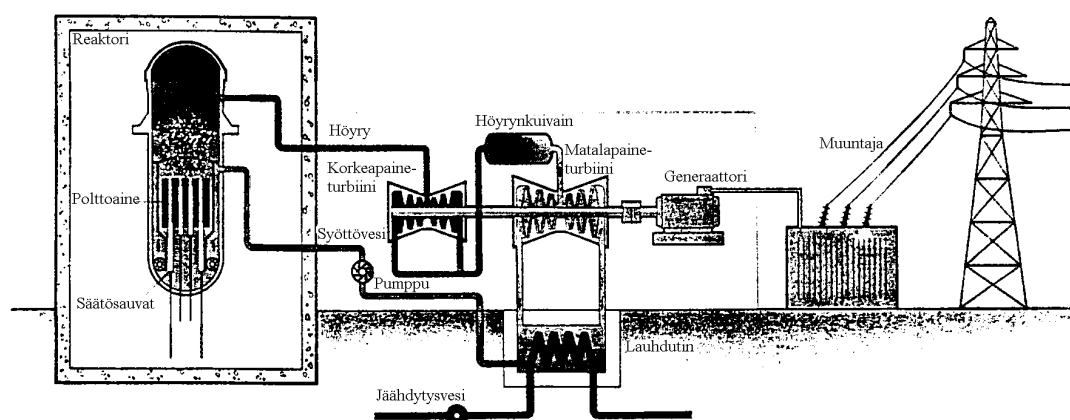
Vuosina 1997-2000 voimalaitoksella toteutetaan tehonkorotus- ja modernisointiprojekti, minkä aikana prosessin arvot muuttuvat jonkin verran. Yksikön lopulliseksi sähkötehoksi arvioidaan noin 500 megawattia.

Reaktorissa kuumentunut vesi johdetaan 296 °C ja 123 barin paineisena kuudessa eri putkilinjassa höyrystimiin, joissa turbiinilaitokselta tuleva syöttövesi höyrystyy 47 barin kylläiseksi höyryksi. Tämä ns. primääripiiri siirtää siis ydinreaktiossa syntyneen lämpöenergian höyrystimiin. Höyrystymistä höyry siirtyy erillisessä sekundääripiirissä turbiineihin, jotka pyörittävät akselleilleen kytkettyjä sähköenergiaa tuottavia päägeneraattoreita. Sekundääripiiri muuttaa siis primääripiiristä siirtyneen lämpöenergian mekaaniseksi energiaksi. Turbiineissa työnsä tehneen höyryn lauhduttamiseksi takaisin vedeksi tarvitaan suuri määrä merivettä (25 m<sup>3</sup>/s), joka kulkee lauhduttimien kautta erillisenä merivesipiirinä.

Loviisa 1:n reaktori on neuvostoliittolainen painevesireaktori tyyppimerkinnältään VVER-440. Painevesireaktoreissa jäähdytteenä ja samalla myös neutronifysikaalisena hidasteena on tavallinen vesi. Reaktorisydän polttoaineineen on sijoitettu teräksiseen (CrMOV-seosteinen hiiliteräs, jossa ruostumaton teräsverhous) paineastiaan.

## 7.2.2 Kiehtusvesireaktori

Kiehtusvesireaktorissa paine on 70 baria (7 MPa). Vesi kiehuu reaktorin sisällä polttoainesauvojen välissä kulkiessaan. Turbiini saa siten höyrynsä suoraan reaktorista. Höyry on lievästi radioaktiivista, eikä turbiinin lähellä voi oleskella laitoksen käydessä. Heti laitoksen pysäyttämisen jälkeen turbiini on luoksepäästävässä. Kiehtusvesireaktorista puuttuvat höyryn kehittämiseen tarvittavat putkistot sekä paineen ylläpitämiseen tarvittavat laitteet, mikä tekee laitoksesta painevesireaktoria yksinkertaisemman. Kiehtusvesilaitoksen toimintaperiaate ilmenee kuvasta 6.6.

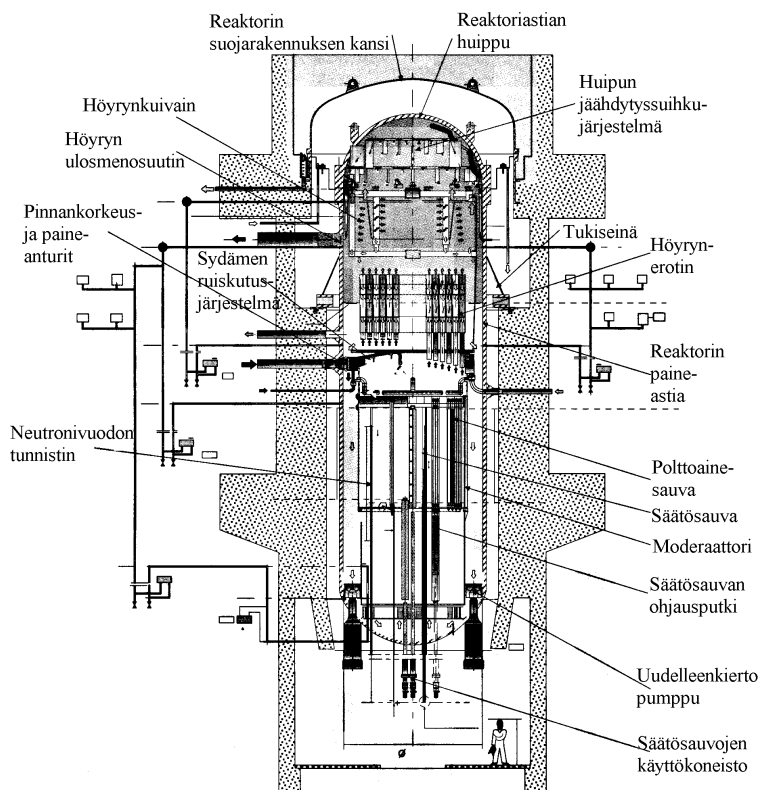


Kuva 7.6. Kiehtusvesilaitoksen toimintakaavio.

Teollisuuden Voima Oy:n (TVO) omistama Olkiluodon voimalaitos sijaitsee Eurajoen kunnassa Rauman lähellä. Olkiluodon ensimmäinen reaktori valmistui 1978 ja toinen vuonna 1982. Olkiluodon voimalaitoksen molemmat reaktorit ovat kiehtusvesireaktoreita. Laitosten tehoja on nostettu useita kertoja. Taulukosta 6.2. ilmenevät voimalaitoksen yhden yksikön vuoden 2000 mukaiset tekniset tiedot. Parhaillaan Olkiluotoon rakennetaan vuonna 2009 valmistuvaa 1600 MW:n painevesireaktoria.

Taulukko 7.2.

Sähköteho, brutto	870 MWe	Suojarakennus	
Sähköteho, netto	840 MWe	lauhdutusaltaalla varustettu betoninen suojarakennus	
Vuotuinen sähköntuotanto	~7,0 TWh	korkeus	41,5 m
Lämpöteho	2500 MWth	teräsuojakuoren halkaisija	22,5 m
Kokonaishyötysuhde	33 %		
Reaktorisydän		Turbiini	
Korkeus	3,7 m	Nimellisteho	870 MW
Halkaisija	3,9 m	Kierros-luku	3 000 r/min
polttoaineniippujen lukumäärä	500 kpl	höyryn virtaus	1260 kg/s
polttoainesauvoja/nippu	64-100 kpl	höyrynpaine	67 bar
polttoainemäärä	86000 kgU	höyryn lämpötila	283 °C
booriteräksisiä säätösauvoja	121 kpl		
poistopalama max.	40 MWd/kgU	Generaattori	
		nimellinen näennäisteho	
Reaktorin jäähdytysvesi		Olkiluoto 1:	950 MVA
kiertovirtaus reaktorissa	7800 kg/s	Olkiluoto 2:	905 MVA
höyryvirtaus reaktorista	1260 kg/s	Nimellisjännite	20 kV
tulolämpötila reaktoriin (syöttövesi)	185 °C	Tehokerroin	0,9
tulolämpötila reaktorisydämeen	274 °C		
lähtölämpötila reaktorista	286 °C		
paine	70 bar		
Reaktorin paineastia			
ASTM 302B hiiliteräs ruostumattomalla teräsvuorauksella			
Korkeus	20,6 m		
Halkaisija	5,5 m		
seinämän vahvuus sylinteriosassa	134 mm		

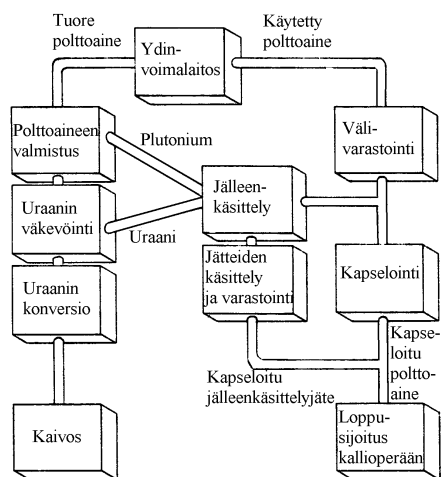


Kuva 7.7. Olkiluodon reaktori.

## 7.3 Ydinpolttoaine

### 7.3.1 Valmistus ja käyttö

Uraanin matka ydinpolttoaineeksi alkaa kaivokselta, jonka yhteydessä uraanimalmi ri-



kastetaan ja puhdistetaan 60-70 % uraania sisältäväksi uraanioksidiksi ( $U_3O_8$ ). Seuraavaa käsittelyvaihetta, väkevöintiä varten uraani muunnetaan toiseen kemialliseen muotoon, uraaniheksafluoridiksi ( $UF_6$ ), joka yli  $56\text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa on kaasumainen aine. Tässä muodossa sitä voidaan käsitellä ns. kaasudiffuusio- tai sentrifugilaitoksissa. Näissä kevyemmän uraani-isotoopin  $U^{235}$ :n pitoisuus nostetaan ydinreaktorin vaatimaan noin 3 %:iin. Luonnonuraanin  $U^{235}$ -pitoisuus on vain 0,7 %. Yhteen tonniin 3 %:ksi väkevöityä uraania tarvitaan luonnonuraania 5,5 tonnia. Polttoaineen kierto ilmenee kuvassa 7.8.

Kuva 7.8. Ydinpolttoainehuollon vaiheet.

Väkevöity uraani muutetaan kemiallisesti uraanioksidiksi. Siitä puristetaan 8-12 mm:n läpimittaisia ja noin 10 mm:n korkuisia tabletteja, jotka pannaan pitkiin metalliputkiin. Putket suljetaan kaasutiiviisti molemmista päistään. Useita kymmeniä sauvoja kiinnitetään toisiinsa poikkileikkaukseltaan neliön tai kuusikulmion muotoisiksi nipuiksi, polttoaine-elementeiksi. Ydinvoimalaitokselle polttoaine saapuu tällaisina elementteinä.

Reaktorissa uraani-235 ytimiä halkeaa puoliraskaiksi atomiytimiksi. Polttoaineen uraani-235 pitoisuus siis alenee ja kun polttoaine loppuun palaneena poistetaan reaktorista, sen uraani-235 pitoisuus on noin 0,7 %.

Reaktorista poistettu ydinpolttoaine varastoidaan aluksi väliaikaisesti voimalaitoksella. Tavallisin välivarasto on noin 10 metriä syvä vesiallas, jossa oleviin telineisiin polttoaineputket sijoitetaan. Altaan vesi pidetään jäähdytysjärjestelmällä suunnitelleen huoneenlämpöisenä. Lisäksi vesi pidetään suodattamalla hyvin puhtaana, jotta polttoaineen kuorimateriaalin syöpyminen estetään.

Välivarastossa polttoaine vaatii valvontaa ja huolenpitoa. Tämä vaihe suunnitellaan sen takia enintään muutaman kymmenen vuoden mittaiseksi. Sen jälkeen polttoaine loppsijoitetaan siten, että sen sisältämät radioaktiiviset aineet eivät ilman valvontaakaan pääse aiheuttamaan vaaraa.

Käytetty ydinpolttoaine vastaa uraani-235-pitoisuudeltaan luonnonuraania. Lisäksi polttoaineeseen syntynyt plutonium, 0,5-1 %, on käyttökelpoista ydinpolttoainetta. Nämä osat voidaan ottaa talteen käytetyn polttoaineen jälleen käsittelyssä ja käyttää uuden polttoaineen valmistuksessa. Varsinaiseksi jätteeksi jäävät uraanitonista tällöin vain 30 kg halkeamistuotteita ja polttoainepun metalliset rakenneosat. Toinen vaihtoehto on, että polttoainetta ei jälleen käsitellä. Tällöin käytetty polttoaine sellaisenaan on jätettä. Tässä "kertakäyttövaihtoehdossa" ei hyödynnetä käytetyn polttoaineen sisältämiä käyttökelpoisia aineksia.

Vain pieni osa käytetystä ydinpolttoaineesta jälleen käsitellään nykyisin. Vähäinen kiinnostus jälleen käsittelyyn johtuu lähinnä raakauraanin toistaiseksi edullisesta hinnasta kalliiseen jälleen käsittelyvaihtoehtoon verrattuna.

### 7.3.2 Loppusijoitus

Suomen oloissa loppusijoitus voidaan parhaiten suorittaa sijoittamalla jäte syväälle kallioperään. Samaa ratkaisua on esitetty käytettäväksi myös mm. Ruotsissa, Sveitsissä, Kanadassa ja Yhdysvalloissa. Loppusijoitustila muodostuu noin 500 metrin syvyydelle kallioperään louhitusta tunneliverkostosta. Metallikapseleihin pakattu polttoaine sijoitetaan tunnelin pohjaan porattuihin pystysuoriin reikiin. Kapselin ja reiän seinämän välit täytetään savella, joka paisuu pohjaveden imeytyessä siihen. Paisunut savi muodostaa tiiviin suojakerroksen kapselin ympärille.

Kun kaikki kapselit on sijoitettu, täytetään tunnelit ja maan pinnalle johtavat kuilut hiekan ja saven sekoituksella. Loppusijoituksesta ei jää pysyviä merkkejä maan pinnalle eikä se aiheuta rajoituksia maankäytölle. Aluetta ei tarvitse vartioida.

Ydinenergialain mukaan valtioneuvosto säätelee ydinenergian käyttöä Suomessa, kauppa- ja teollisuusministeriö myöntää siihen tarvittavat luvat ja Säteilyturvakeskus valvoo sen turvallisuutta. Suomen eduskunta päätti v. 1994 ydinenergialain muutoksesta, joka kieltää ydinjätteiden viennin maasta. Laki astui voimaan 1997. Ydinjätehuollon tutkimus-, selvitys- ja suunnittelutyön tavoitteeksi määriteltiin, että Suomessa on varauduttava käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoittamiseen noin vuodesta 2020 lähtien. Valtioneuvoston periaatepäätöksen mukaan tulee varautua siihen, että vuoden 2000 loppuun mennessä on valittu ja selvitetty sijoituspaikka, johon loppusijoitustilat voidaan rakentaa. Tämä mainitaan myös kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksissä sekä vuoden 1997 valtioneuvoston energiapoliittisessa selonteossa.

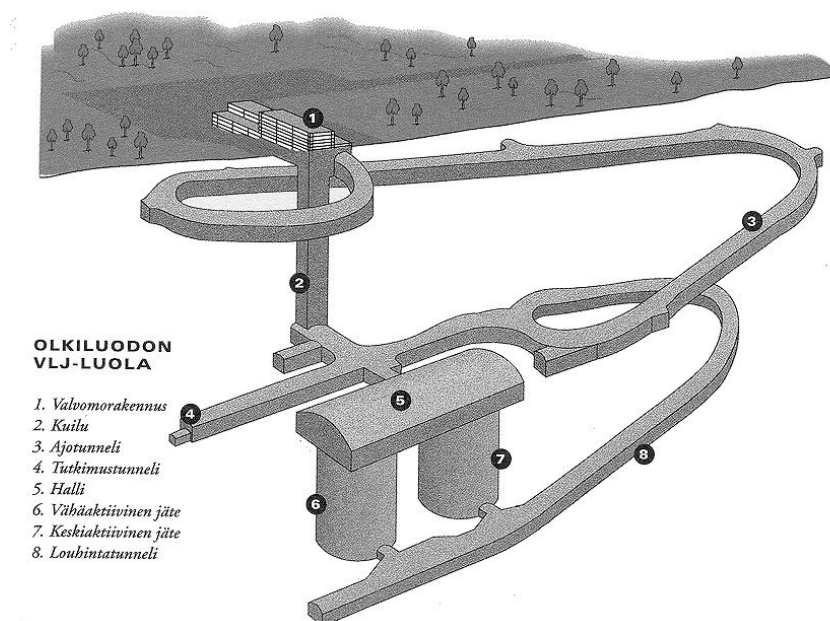
Suomen kaksi miljardia vuotta vanhaan, seismisesti vakaaseen peruskallioon rakennettu loppusijoitustila tarjoaa turvalliset olosuhteet käytetyn polttoaineen sijoitukseen. Syvällä kallioperässä vallitsevissa pohjaveden kemiallisissa olosuhteissa voidaan kapselin kestoiksi hyvällä varmuudella arvioida vähintään miljoona vuotta. Kun kapselin



suojaava vaikutus lakkaa, on jäte ehtinyt menettää käytännöllisesti kaiken aktiivisuutensa. Jäljellä olevien radioaktiivisten aineiden liukeneminen pohjaveteen on hyvin hidasta sijoitustilan läpi virtaavan veden vähäisyyden takia. Radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen on myös hidasta, koska pohjavedessä olevat aineet pidättyvät rakojen pinnoille ja kallion huokosiin.

Suunnitellun loppusijoitusratkaisun turvallisuus on järjestelmällisesti tutkittu. Turvallisuusanalyysi osoittaa, että loppusijoituksesta aiheutuvat säteilyannokset ovat pieniä luonnon taustasäteilystä aiheutuviin annoksiin verrattuna. Analysoituihin tapauksiin kuuluvat pienelläkin todennäköisyydellä odotettavissa olevat häiriötilanteet kuten jääkaudet siirrosliikuntoineen, maankohoaminen, maanjäristykset ja uusien heikkousvyöhykkeiden syntyminen. Myöskään ihmisen tahaton toiminta sijoituspaikan läheisyydessä ei vaaranna sijoituksen turvallisuutta.

Matala- ja keskiaktiiviset voimalaitosjätteet loppusijoitetaan Suomessa laitosalueen kallioperään rakennettaviin tiloihin. Olkiluodossa tällainen loppusijoituslaitos on ollut käytössä vuodesta 1992. Kuvassa 6.9 on kuvattu Olkiluodon VLJ-luolan rakenne.



Kuva 7.9. Olkiluodon vähä- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoitusluola. (Posiva)

Loviisan loppusijoituslaitos otettiin käyttöön vuonna 1998. Olkiluodon voimalaitosjätteen loppusijoituslaitos on toiminut vuodesta 1997 myös säteilylain alaisten jätteiden keskusvälivarastona. Tätä ennen jätteet olivat varastoituna puolustusvoimien alueelle Santahaminaan. Näiden jätteiden määrä oli vuoden 1995 lopussa noin 30 kuutiometriä ja kokonaisaktiivisuus 30 terabecquerelia (TBq).

## 7.4 Ydinvoiman turvallisuus

Suomen lainsäädännön mukaan ydinenergian käyttöön luvan saaneella on velvollisuus huolehtia käytön turvallisuudesta. Säteilyturvakeskus on ydinenergian käytön turvallisuutta valvova viranomaisena. Säteilyturvakeskuksen tehtävänä on lisäksi huolehtia turva- ja valmiusjärjestelyjen valvonnasta sekä ydinaseiden leviämisen estämiseksi tarpeellisesta ydinenergian käytön valvonnasta.

Ydinenergian käytön edellytyksenä on ympäristön turvallisuudesta huolehtiminen sekä normaalikäytön että onnettomuustilanteiden aikana. Ydinturvallisuuden varmistaminen läntisissä teollisuusmaissa perustuu kokemuksen ja tutkimustoiminnan pohjalta muotoutuneisiin yleisiin periaatteisiin. Niiden mukaan turvallisuus varmistetaan ns. syvyys-suuntaisella puolustuksella ja moninkertaisin järjestelyin. Vaaratilanne voisi syntyä vasta silloin, jos useita vikoja ja käyttöhenkilökunnan virheitä sattuisi samanaikaisesti. Reaktorin sammuttaminen ja saattaminen turvalliseen tilaan onnettomuuden tai käyttöhäiriön yhteydessä edellyttää turvajärjestelmien toimintaa. Turvajärjestelmien suunnittelu ja mitoitus perustuvat laskennallisiin onnettomuusanalyysiin ja kokeelliseen tietoon.

Ydinvoimalaitokseen liittyvä riski aiheutuu reaktorin polttoaineeseen käytön aikana kertyvistä radioaktiivisista aineista. Niiden säteilyenergia kehittää lämpöä vielä reaktorin sammuttamisen jälkeenkin. Tämä ns. jälkilämpö on aluksi muutama prosentti reaktorin toiminnan aikaisesta lämpötehosta mutta pienenee vähitellen. Jos lämpöä ei kuljetettaisi pois reaktorin sydäntä jäähdyttämällä, lämpö riittäisi sulattamaan polttoaineen kaasutiiviit suojakuoret ja itse polttoaineen. Radioaktiivisilla aineilla olisi tällöin mahdollisuus vapautua. Näin ollen ydinvoimalaitoksen turvallisuuden edellytys on polttoaineen jäähdytyksestä huolehtiminen kaikissa tilanteissa.

Ydinvoimalaitosten kaikki laitteet ja toiminnot suunnitellaan erityisten turvallisuustarkastelujen pohjalta, joissa sovelletaan korkeita laatuvaatimuksia ja riittäviä turvallisuusmarginaaleja. Tästä huolimatta lähdetään siitä olettamuksesta, että laitevikoja voi esiintyä tai laitoksen käyttäjä voi tehdä virheitä. Näiden varalta laitos varustetaan sen toimintaa valvovilla turvallisuusjärjestelmillä. Kaikki turvallisuudelle merkitykselliset toiminnot toteutetaan useilla rinnakkaisilla järjestelmillä ja laitteilla, jotta saavutettaisiin korkea luotettavuustaso. Erityisillä suojauslaitteilla ja -rakenteilla lievennetään mahdollisesti tapahtuvan onnettomuuden vaikutuksia. Laitteiden ohella kiinnitetään huomiota näiden käytön luotettavuuteen ylläpitämällä henkilökunnan korkeaa osaamistasoa jatkuvalta koulutuksella.

Polttoaineen radioaktiivisuuden sisältävän vaaratekijän ympärille muodostetaan useiden sisäkkäisten suojavyöhykkeiden kokonaisuus. Ensimmäisenä vapautumisestaan on itse uraanioksidi-polttoaine, joka pidättää itsessään syntyneitä halkeamistuotteita.

Toisena suojamuurina on polttoainesauvojen kuorena käytetty metalliputki ja kolmantena reaktorin paineastia. Viimeisenä esteenä on reaktoria ympäröivä kaasutiivis suojarakennus. Turvallisuusajattelun lähtökohtana on, että joku suojavyöhykkeistä voi pettää, mutta muut suojavyöhykkeet ovat silti varmistamassa turvallisuutta. Vaaditaan monen yhtäaikaisen vaurion sarja, jotta turvallisuusjärjestelmä kokonaisuudessaan olisi tehoton.

### 7.4.1 Reaktorin suojausjärjestelmät

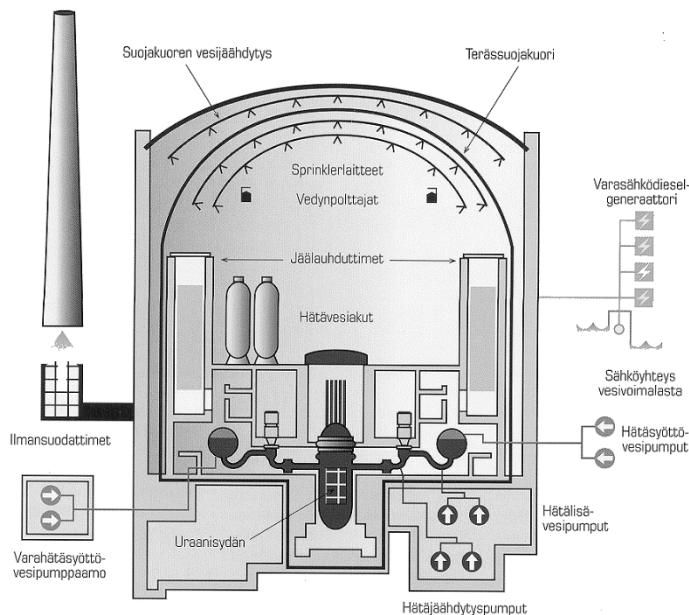
Reaktorin suojausjärjestelmien tehtävänä on estää sydämen vaurioituminen tilanteissa, joissa reaktorin normaali jäähdytystoiminta häiriytyy. Tällainen häiriötilanne syntyy esimerkiksi silloin, jos reaktorijärjestelmään tulee vuoto. Laitteiden mitoituksen lähtökohtana on vuototilanne, joka syntyy, kun suurin reaktorin vettä johtava putki katkeaa. Reaktorijärjestelmässä vallitsevan korkean paineen takia vesi purkautuisi tällaisessa tapauksessa suurella nopeudella katkeamiskohdasta. 300-asteinen vesi höyrystyisi samalla ja kohottaisi suojarakennuksen painetta ja lämpötilaa. Niitä mittaavat laitteet havaitsevat epänormaalin tilanteen ja käynnistävät suojaustoiminnat.

Ensimmäisenä käynnistyy reaktorin pikasulku, joka työntää säätösauvat muutamassa sekunnissa reaktoriin pysäyttäen sen toiminnan. Samalla käynnistyvät hätäjäähdytysjärjestelmät, jotka ovat valmiina pumppaamaan vettä reaktoriin sen vedenpinnan laskeessa. Riittävän toimintavarmuuden saavuttamiseksi järjestelmät ovat runsaasti ylimitoitettuja niin, että jo osa laitteista pystyy takaamaan jäähdytyksen. Joukko dieselgeneraattoreita saa myös käynnistyskäskyn, jotta turvalaitteet saavat sähköä, vaikka laitos menettäisi yhteytensä sähköverkkoon.

Suojaustoimintojen käynnistäminen on tapahtuma, josta automatiikka huolehtii itsenäisesti. Käyttöhenkilökunnan ei tarvitse puuttua tapahtumien kulkuun tilanteen alkuvaiheessa, jolloin runsaasti toimenpiteitä on tehtävä lyhyessä ajassa. Tällä varmistetaan se, ettei mikään toimenpide jää suorittamatta inhimillisen virheen takia. Reaktorin suojarakennus on mitoitettu kestämään se paine, jonka reaktorista purkautunut vesihöyry aiheuttaa. Paineen nousun suuruus riippuu reaktorijärjestelmän vesimäärästä ja suojarakennuksen tilavuudesta sekä suojarakennukseen mahdollisesti kuuluvista paineenalennusjärjestelmistä. Eri laitosten suojarakennusten suunnittelupaine voi siten olla hyvin erilainen. Silti ne täyttävät sen yhteisen suunnitteluvaatimuksen, että suunnittelun perustana olevan onnettomuuden vaikutukset rajoittuvat käytännöllisesti katsoen kokonaan suojarakennuksen sisälle.

Kuvassa 7.10 on esitetty esimerkkinä Loviisan ydinvoimalaitoksen turvajärjestelmä.

## Loviisan ydinvoimalaitoksen turvajärjestelmät



Kuva 7.10. Loviisan ydinvoimalaitoksen turvajärjestelmä.

### 7.4.2 Säteilyn vaikutukset ihmiseen

Säteilyn biologiset vaikutukset perustuvat sen soluissa aiheuttamiin ionisaatioihin eli sähkövarattujen atomien syntymiseen. Ne voivat joko suoraan tai epäsuorasti vahingoittaa soluja ja erityisesti solutuman DNA-molekyylejä.

Säteily aiheuttaa välittömiä sairausoireita, jos annos ylittää 1000 millisievertiä ja jos se saadaan lyhyenä, enintään noin vuorokauden pituisena aikana. Oireita ovat pahoinvointi ja kuume sekä suuremmilla annoksilla sisäiset verenvuodot. Oireet ilmenevät muutaman tunnin kuluessa säteilyn saamisesta, jos annos on ollut 1000-2000 millisievertiä. Jos annos on suurempi, oireet ilmenevät nopeammin.

1000-2000 millisievertin annoksen saaneen henkilön toipumisen todennäköisyys on 100 %. Ennuste huononee annoksen kasvaessa. 6000 millisievertin annoksen saaneista toipuu vain noin 20 % ja yli 10.000 mikrosievertin annos johtaa aina kuolemaan.

Noin 1000 millisievertin annos on raja, jonka alapuolella ei synny mitään säteilyä saaneen yksilön havaitsemia oireita. Pienempikin säteilyannos voidaan kuitenkin todeta tutkimalla henkilön verenkuvaa. Punaisten ja valkoisten verisolujen suhteellisissa määrissä on havaittavissa ohimenevä muutos. Verenkuvankin muutokset jäävät pois, kun annos on alle 200 millisievertiä.

Edelläkuvattujen välittömien vaikutusten ohella säteilyllä tiedetään olevan myöhäisvaikutuksia, jotka voivat ilmetä vasta vuosikymmenien jälkeen säteilylle altistumisesta. Näitä ovat mahdollisuus sairastua syöpään ja mahdollisuus perinnöllisten vaurioiden ilmenemiseen jälkeläisissä. Säteilyn ja syövän välistä yhteyttä ihmisellä on voitu tutkia vain eräitten tilastollisten materiaalien pohjalta, joita ovat Hiroshiman ja Nagasakin uhreja ja mm. vuosisadan alun röntgenlääkäreitä koskevat tilastot. Näistäkin saadut tiedot koskevat kuitenkin suhteellisen suuria, noin 1000 millisievertin annoksia. Niiden perusteella tiedetään, että noin pari henkilöä sadasta kuolee myöhemmin syöpään, jos kaikki ovat saaneet 1000 millisievertin säteilyannoksen.

Edellistä paljon pienempien, siis esimerkiksi normaalista taustasäteilystä aiheutuvien muutaman millisievertin suuruisen säteilyannosten biologisista vaikutuksista ei ole mitään näyttöä. Lukuisat epidemiologiset tutkimukset osoittavat esimerkiksi, että maapallon sellaisilla alueilla, joilla luonnon taustasäteily on moninkertainen keskimääräiseen verrattuna, ei ole havaittavissa poikkeuksellisen paljon syöpätapauksia. Säteilyn perinnöllisten vaikutusten määrä pienillä säteilyannoksilla on syöpätapausten määrää vähäisempi. Esimerkiksi Hiroshimassa ja Nagasakissa ei ole voitu todeta säteilyn tuottamia perinnöllisiä vaurioita.

Säteilyannos	Vaikutus tai raja
3000 – 4000 mSv	Noin puolet annoksen saaneista kuolee muutaman viikon kuluessa ellei tehokasta hoitoa anneta.
1000 mSv	Säteilytauti oireita alkaa esiintyä
250 mSv	Terveystieteellisiä vaikutuksia ei juuri havaittavissa
50 mSv / vuosi	Säteilyalaisen työn tekijöille vuodessa sallittu enimmäisannos.
6 mSv / vuosi	Tyypillinen säteilyannos Suomessa. Moninkertainen joillakin alueilla huoneilman radonin takia.
5 mSv / vuosi	Elintarvikkeiden sallittujen pitoisuuksien lähtökohtana oleva vuosiansa lyhytaikaisessa altistuksessa.
2 mSv	Suomessa 50 vuoden kuluessa saatava kokonaisannos Tshernobylin laskeumasta.

### 7.4.3 Riskin suuruuden arvioinnista

Ydinvoimalaitoksesta ympäristön asukkaille aiheutuva riski on hyvin pieni verrattuna muihin muihin riskeihin, joille ihmiset ovat alttiina jokapäiväisessä elämässään. Ympäristöön vaikuttaneita onnettomuuksia ydinvoimalaitoksilla on tapahtunut hyvin vähän. Sen vuoksi niiden aiheuttamaa riskiä ei voi arvioida onnettomuustilastojen avulla, kuten monilla muilla aloilla tehdään.

Riskillä ymmärrämme sitä todennäköisyyttä, millä meille tapahtuu jotakin ei toivottua määrätyn ajan kuluessa. Noin 500 suomalaista kuolee vuosittain liikenteessä. Tilastojen

perusteella voidaan siis sanoa, että itse kunkin suomalaisen mahdollisuus kuolla seuraavan vuoden aikana liikenneonnettomuudessa on 500 viidestä miljoonasta. Liikenteen aiheuttama yksilön kuoleman riski vuotta kohti on siten  $1 / 10.000$ .

Ydinvoimalaitosten aiheuttamat riskit on tilastopohjan puuttuessa arvioitava laskennallisesti. On määritettävä ydinvoimalaitoksella mahdollisesti esiintyvät onnettomuustyyppit ja niiden aiheuttamat seurausvaikutukset ympäristössä. Kunkin onnettomuustyyppin aiheuttama riski saadaan yhdistämällä seurausten suuruus ja vastaavan onnettomuustilanteen todennäköisyys. Menettelyä kutsutaan todennäköisyyspohjaiseksi turvallisuusanalyysiksi. Sellainen on suoritettu hyvin monille maailman ydinvoimalaitoksille, mm. Suomessa sekä Loviisan että Olkiluodon laitoksille. Laskelmat osoittavat, että ydinvoimalaitoksesta aiheutuva riski on murto-osa muunlaisiin riskeihin verrattuna.

Ydinvoimaan liittyvä riski koetaan usein paljon todellista suurempana. Riski ei ensinkään ole vapaaehtoinen. Hyväksymme tupakoinnin aiheuttaman monin verroin suuremman riskin, koska saamme itse päättää siihen ryhtymisestä. Moniin ihmisiin yhtä aikaa vaikuttava riski koetaan myös paljon vaarallisempana kuin vain yhtä ihmistä kerrallaan koskeva uhka. Uusiin ja tuntemattomiin riskeihin suhtaudutaan luonnollisesti myös epäluuloisemmin kuin vanhoihin tuttuihin vaaratekijöihin.

## 7.5 Käsitteitä

### AKTIIVISUUS

Aktiivisuus on suure, joka ilmaisee radioaktiivisessa aineessa tietyssä ajassa tapahtuvien ydinhajoamisten lukumäärän. Aktiivisuuden yksikkö on becquerel (Bq), joka tarkoittaa yhtä hajoamista sekunnissa.

### AKTIVOITUMINEN

Aineen atomien muuttuminen radioaktiiviseksi neutronien atomiytimissä aikaan- saamien muutosten takia.

### ALFASÄTEILY, ALFAHIUKKANEN

Heliumytimen (2 protonia + 2 neutronia) sinkoutuminen radioaktiivisesti hajoavasta atomiytimeistä. Alfäsäteily liittyy raskaiden atomiytimien esim. uraanin ja plutoniumin radioaktiiviseen hajoamiseen.

### ANNOS, SÄTEILYANNOS

Säteilynalaiseen aineeseen säteilystä siirtyvää energiaa ilmaiseva suure. Energia-absorptiota mittaava annosyksikkö on gray (Gy). Biologiset vaikutukset huomioon ottava annosyksikkö on sievert (Sv).

### ATOMIYDIN

Atomin keskushiukkanen, jonka rakenneosia ovat protonit ja neutronit.

### BECQUEREL

Aktiivisuuden (radioaktiivisuuden) yksikkö. Aineen aktiivisuus on yksi becquerel, jos siinä tapahtuu yksi hajoaminen sekunnissa.

### BETASÄTEILY

Betasäteily on negatiivisella sähköllä varattuja hiukkasia (elektroneja), jotka sinkoutuvat atomiytimeistä radioaktiivisen hajoamisen yhteydessä.

### DEKONTAMINOINTI

Esineen tai aineen puhdistaminen siihen tarttuneesta radioaktiivisesta aineesta.

### FISSIO (YTIMEN HALKEAMINEN)

Raskaan atomiytimen hajoaminen kahteen likimain samansuuruiseen osaan, jolloin vapautuu suuri määrä energiaa.

**FISSIOTUOTTEET (HALKEAMISTUOTTEET)**

Atomiytimen halkeamisessa eli fissiossa syntyvät keskiraskeat atomit. Useimmat fissiotuotteet ovat radioaktiivisia.

**FOSSIILINEN POLTTOAINE**

Maaperässä eloperäisistä aineista muodostuneet polttoaineet; hiili, öljy ja maakaasu.

**FUUSIO (FUUSIOENERGIA)**

Ydinreaktio, jossa kaksi kevyttä atomi ydintä yhtyy raskaammaksi ytimeksi. Yhtymisreaktiossa vapautuu suuri määrä energiaa.

**GAMMASÄTEILY**

Sähkömagneettisena aaltoliikkeenä etenevä säteily, jonka aallonpituus on pienempi kuin röntgensäteilyn.

**HALKEAMISTUOTTEET**

Atomiytimen halkeamisessa syntyvät keskiraskeat ytimet.

**HIDASTIN (MODERAATTORI)**

Aine, jonka tehtävänä on hidastaa ytimen halkeamisessa syntyvät nopeat neutronit, jolloin ne aikaansaavat helposti uusia halkeamisia. Nykyisissä voimalaitosreaktoreissa käytetään hidastimena tavallisimmin vettä. Myös grafiittia ja raskasta vettä käytetään hidastinaaineena.

**HYÖTYSUHDE**

Voimalaitoksen tuottaman sähköenergian suhde kulutetun polttoaineen sisältämään energiaan.

**HYÖTÖREAKTORI (BREEDER-REAKTORI)**

Reaktorityyppi, joka toimiessaan tuottaa enemmän fissiokelpoista ainetta kuin se itse samanaikaisesti kuluttaa.

**ICRP**

Kansainvälinen säteilysuojelutoimikunta joka perustettiin vuonna 1928. ICRP laatii mm. annosrajoja koskevia suosituksia.

**ISOTOOPPI**

Saman alkuaineen atomit, jotka eroavat toisistaan ytimessä olevien neutronien lukumäärän suhteen. Lähes kaikki alkuaineet esiintyvät luonnossa useampina isotooppeina.

**JODI**

Alkuaine, jonka kemiallinen merkki on I. Säteilysuojelun kannalta tärkein halkeamistuotteena syntyvä jodi-isotooppi on jodi-131, jonka puoliintumisaika on 8 päivää.

**JÄLKILÄMPÖ**

Fissiotuotteiden säteilyenergian aiheuttama lämmönkehitys ydinpolttoaineessa sen jälkeen kun reaktorin toiminta on pysäytetty.

**JÄLLEENKIERRÄTYS**

Käytetystä ydinpolttoaineesta erotetun uraanin ja plutoniumin käyttö uuden ydinpolttoaineen raaka-aineena.

**JÄLLEENKÄSITTELY**

Kemiallinen käsittely, jolla käytetystä ydinpolttoaineesta erotetaan uraani ja plutonium. Jäljelle jäävät fissiotuotteet ns. korkea-aktiivisena jätteenä.

**KAASUDIFFUUSIO**

Eräs menetelmä uraanin väkevöimiseksi eli uraani-235 isotoopin pitoisuuden nostamiseksi uraanissa. Menetelmä perustuu kaasumaisen uraaniyhdisteen kulkeutumiseen puoliläpäisevien kalvojen läpi, jolloin kevyemmät uraani-235 atomit kulkeutuvat kalvon läpi nopeammin kuin raskaammat uraani-238 atomit.

**KESIUM**

Alkuaine, jonka kemiallinen merkki on Cs. Merkittävin reaktorissa syntyvä kesium-isotooppi on kesium-137, jonka puoliintumisaika on 30 vuotta.

**KETJUREAKTIO**

Perättäisten fissioiden muodostama tapahtumasarja, jota fissiossa syntyvät neutronit ylläpitävät osuessaan uusiin uraaniytimiin aiheuttaen lisää fissioita.

**KEVYTVESIREAKTORI (LWR)**

Reaktorityyppi, jossa jäähdytysaineena ja hidastinaaineena käytetään tavallista vettä. Useimmat voimalaitosreaktorit ovat kevytvesireaktoreita.

**KIEHUTUSVESIREAKTORI (BWR)**

Kevytvesireaktorityyppi, jossa jäähdytysaineena käytetty vesi kiehuu kulkiessaan reaktorisydämen läpi ja syntyvä höyry johdetaan pyörittämään turbiinia.

**KONTAMINOITUMINEN**

Esineen likaantuminen radioaktiivisilla aineilla niiden taittuessa sen pinnalla tai aineen (esim. veden) likaantuessa radioaktiivisilla epäpuhtauksilla.

## KOSMINEN SÄTEILY

Avaruudesta maapallolle tuleva säteily, joka pääasiassa muodostuu suuren liike-energian omaavista protoneista. Ilmakehän ylimpiin kerroksiin osuessaan ne synnyttävät pienempienergiasta säteilyä (protoneja, neutroneja, gammasäteilyä), josta suuri osa ihmiseen kohdistuvasta luonnon taustasäteilystä aiheutuu.

## KRIITTISYYS

Sellainen ydinpolttoaineen muodostama geometrisen tila, jossa itsensä ylläpitävä ketjureaktio on mahdollinen.

## KÄYTTÖKERROIN

Voimalaitoksen tuotantosaavutusta esimerkiksi vuoden ajalta mittaava suhdeluku. Käyttökerroin on voimalaitoksen vuodessa tuottama energia prosentteina siitä energiasta, minkä se olisi tuottanut toimiessaan koko vuoden keskeytyksettä täydellä teholla.

## LASKEUMA

Ilmakehän kautta kulkeutuneen radioaktiivisuuden maan pinnalle laskeutumisesta aiheutunut radioaktiivisuus maan pinnalla.

## LOPPUSIJOITUS

Radioaktiivisten jätteiden sijoittaminen pysyvästi siten, ettei sijoituspaikkaa valvota eikä jätteiden radioaktiivisuus aiheuta vaaraa luonnolle.

## LUONNONURAANI

Uraani sellaisena isotooppiseoksena kuin se esiintyy luonnossa. Luonnonuraanissa on 99,27% isotooppia uraani-238, 0,72% isotooppia uraani-235 ja alle 0,01% isotooppia-234.

## NEUTRONI

Atomiytimen sähkövaraukseton rakenneosanen. Atomiytimet muodostuvat protoneista ja neutroneista.

## PAINEVESIREAKTORI (PWR)

Kevytvesireaktorityyppi, jossa jäähdytysaineena käytettävän veden paine pidetään niin korkeana, että se ei kiehu 300 C: asteen lämpötilasta huolimatta. Reaktorin sydämen läpi kulkeutunut vesi luovuttaa lämpönsä erillisissä höyrystimissä toisiopiirin vedelle, joka kiehuu höyryksi ja johdetaan pyörittämään turbiinia.

## PLUTONIUM

Alkuaine, jonka kemiallinen merkki on Pu. Plutonium-isotooppia Pu-239 syntyy reaktorissa uraani-238:sta neutronisäteilyn vaikutuksesta.

Plutonium-239 soveltuu reaktorin polttoaineksi. Plutonium- 239:n puoliintumisaika on 24.300 vuotta.

## POLTTOAINE-ELEMENTTI

Polttoainesauvojen muodostama nippu. Painevesireaktorin polttoainennippu sisältää tyypillisesti 17 x 17 sauvaa ja kiehutusvesireaktorin 8 x 8 sauvaa. Sauvat on nipussa tuettu toisistaan hiukan erilleen niin, että jäähdytysvesi pääsee kulkemaan sauvojen välitse.

## POLTTOAINESAUVA

Polttoainetabletteja sisältävä ohut päistään suljettu metalliputki, jonka halkaisija on 9-12 mm. Putken sisällä oleva polttoaine on uraanioksidista puristettuina pillereinä.

## PROTONI

Positiivisen sähkövarauksen omaava alkeishiukkanen. Protonit yhdessä neutronien kanssa muodostavat atomiytimen.

## PUOLIINTUMISAIKA

Aika, jonka kuluessa puolet radioaktiivisen aineen ytimistä on muuttunut toisiksi ytimiksi. Seuraavan puoliintumisajan kuluessa hajoaa puolet jäljellä olevista ytimistä, jne. Joidenkin radioaktiivisten aineiden puoliintumisajat ovat sekunnin murto-osia, toisten miljardeja vuosia.

## RADIOAKTIIVISUUS

Atomiytimien muuttuminen toisiksi ytimiksi. Radioaktiivinen ydin lähettää muutostapahtumalle ominaista säteilyä (alfa-, beeta- tai gammasäteilyä).

## RADON

Alkuaine, jonka kemiallinen merkki on Rn. Radon on uraani-238:n radioaktiivisen hajoamisketjun välivaihe, jota syntyy jatkuvasti maankuorella ja kaikessa kiviaineksessa. Radon on väritön ja hajuton kaasu.

## RASKAS VESI

Raskasvesimolekyylissä on yksi happiatomi ja kaksi raskaan vedyn eli deuteriumin atomia. Noin joka kuudestuhannes vesimolekyyli luonnossa on raskasvesimolekyyli.

## REAKTORISYDÄN

Reaktorin polttoaineen muodostama kokonaisuus, jossa polttoaineen materiaali- ja geometrisista ominaisuuksista johtuen vallitsevat edellytykset ydinenergiaa tuottavan ketjureaktion tapahtumiselle.



**REM**

Säteilyn biologiset vaikutukset huomioonottava vanha säteilyannosyksikkö. Sata remiä on yksi sievert.

**SIEVERT**

Säteilyn biologiset vaikutukset huomioonottava säteilyannosyksikkö.

**STRONTIUM**

Alkuaine, jonka kemiallinen merkki on Sr. Tärkein fissiotuotteena syntyvä strontiumisotooppi on Sr-90, jonka puoliintumisaika on 28 vuotta.

**SUOJARAKENNUS**

Ydinvoimalaitoksessa reaktoria ympäröivä kaasutiivis teräksinen tai betoninen rakennus, jonka tehtävänä on mahdollisen reaktorionnettomuuden tapahtuessa estää radioaktiivisia aineita pääsemästä ympäristöön.

**SÄTEILYANNOS**

Säteilynalaiseen aineeseen säteilystä siirtyvää energiaa tarkoittava suure. Sama kuin annos.

**SÄÄTÖSAUVA**

Neutroneja sieppaavaa eli absorboivaa materiaalia sisältävä sauva, jolla säädetään neutronien määrää reaktorisydämessä ja siten reaktorin tehoa. Voimalaitosreaktorissa on useita kymmeniä säätösauvoja.

**TAUSTASÄTEILY**

Yhteinen nimitys luonnon säteilylähteistä ihmiseen kohdistuvalle säteilylle. Taustasäteilyn lähteitä ovat maaperän radioaktiiviset aineet, avaruudesta tuleva säteily ja kehon sisältämät radioaktiiviset aineet.

**URAANI**

Alkuaine, jonka kemiallinen merkki on U. Uraania on maan kuorella noin 0,0004% kaikista aineista. Kaikki uraani-isotoopit ovat radioaktiivisia. Suurin osa (99,27%) luonnonuraanista on isotooppia U-238, jonka puoliintumisaika on 4,5 miljardia vuotta. Ydinvoimalaitoksen polttoaineeksi soveltuvaa uraani-235:ttä on luonnonuraanista 0,72%.

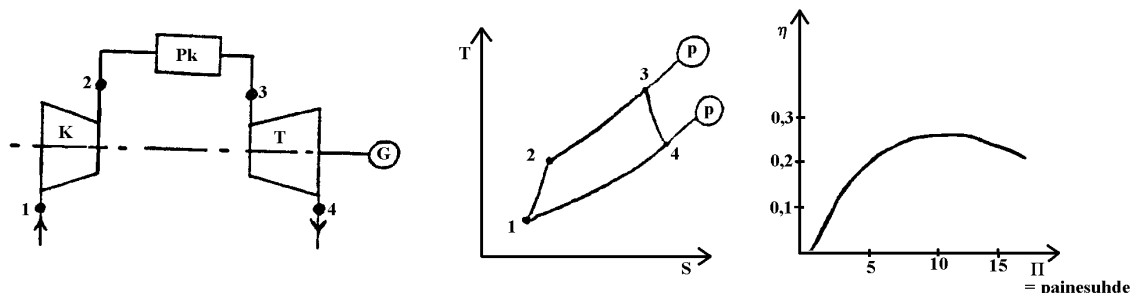
**VÄKEVÖINTI**

Käsittelyprosessi, jossa uraani-235 isotoopin pitoisuutta lisätään suuremmaksi kuin se on luonnonuraanissa. Voimalaitosreaktorien polttoaineeksi käytetty uraani on tavallisimmin väkevöity sisältämään 2-3 % uraani-235:ttä.

## 8 KAASUTURBIINI

### 8.1 Kaasuturbiinin toimintaperiaate

Yksinkertaisimmassa muodossa on koneikossa ainoastaan kompressori, polttokammio ja turbiini.



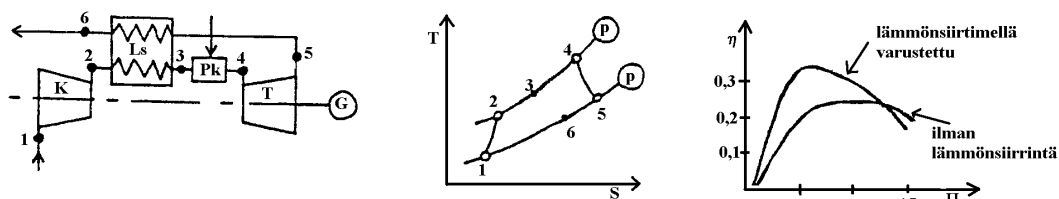
Kuva 8.1. Yksinkertainen kaasuturbiinikoneikko.

Ilma puristetaan kompressorissa paineesta 1 paineeseen 2. Painesuhde määritetään seuraavasti:

$$\frac{p_2}{p_1} = \Pi \quad (8.1)$$

Polttokammioon tulee ilmaa ja polttoainetta. Palaminen tapahtuu likipitään vakio paineessa. Palamiskaasut saavuttavat lämpötilan  $T_3$ , joka on prosessin maksimilämpötila. Tämä lämpötila on tärkeä, koska siitä määräytyy Carnot-periaatteen mukaan ratkaisevalla tavalla koneikon hyötysuhde. Se yritetään valita mahdollisimman korkeaksi, kuitenkin esteenä tässä suhteessa on turbiinisiipien lämpötilakestävyys. Turbiinissa tapahtuu paisunta, josta saadaan työtä kompressorin ja generaattorin pyörittämiseen. Generaattorityö edustaa koneikon nettotyötä. Kaasuturbiinikoneikon hyötysuhde riippuu yleisesti ottaen painesuhteesta, mutta on selvää, että suurempaa painesuhdetta vastaan vaaditaan samalla enemmän kompressorityötä. Yksinkertaisen kaasuturbiinikoneikon hyötysuhde on vaatimaton, koska paisunnan loppulämpötila on korkea ja kompressorityö huomattava.

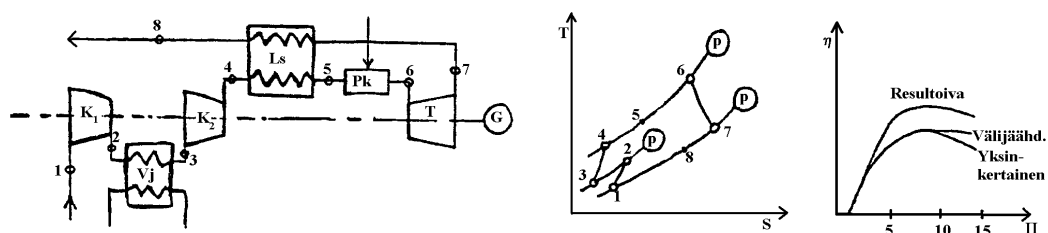
Lämmönsiirtimen (regeneraattorin tai rekuperaattorin) käyttö parantaa hyötysuhdetta, koska poistokaasujen sisältämä energia pienenee



Kuva 8.2. Lämmönsiirtimellä varustetun kaasuturbiinikoneikon toimintaperiaate.

Lämmönsiirtimessä paisunnan poistokaasut esilämmittävät ilman, joten maksimilämpötilan saavuttamiseksi tarvitaan vähemmän polttoainetta. Kuitenkin painesuhteella on tietty optimiarvo. Optimiarvo johtuu siitä, että painesuhteen kasvaessa kasvaa myöskin lämpötila puristuksen jälkeen. Tämä seikka kääntyy lopulta kokonaan epäedulliseksi, kun lämpötila on korkeampi kuin paisunnan jälkeen, jolloin päinvastoin lämmön siirtimessä lämpöä siirtyy ilmasta poistokaasuihin.

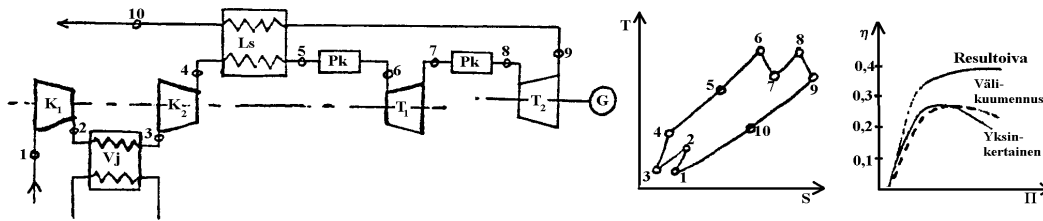
Välijäähdyttimen käyttö puristuksessa parantaa hyötysuhdetta, koska vaadittava kompressorityö vähenee.



Kuva 8.3. Välijäähdyttimellä varustetun kaasuturbiinikoneikon toimintaperiaate (resultoiva tarkoittaa kytettä, jossa on välijäähdytys ja lämmönsiirrin).

Puristusprosessi suoritetaan kahdessa (tai useammassa) vaiheessa. Lämpötilan alenemisen johdosta ilman ominaistilavuus pienenee, joten puristustyö myöskin pienenee. Välijäähdytyksen vaikutus on tuntuvin suurilla painesuhteilla.

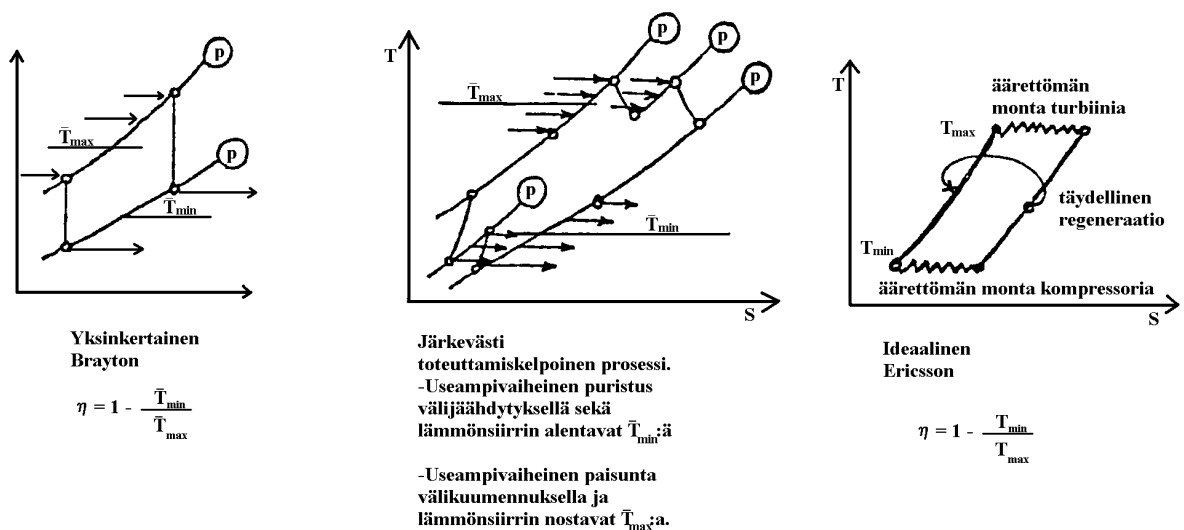
Lisäpolttokammiolla suoritettu välikuumennus parantaa hyötysuhdetta, koska lämpöä tuodaan tällöin keskimäärin korkeammassa lämpötilassa.



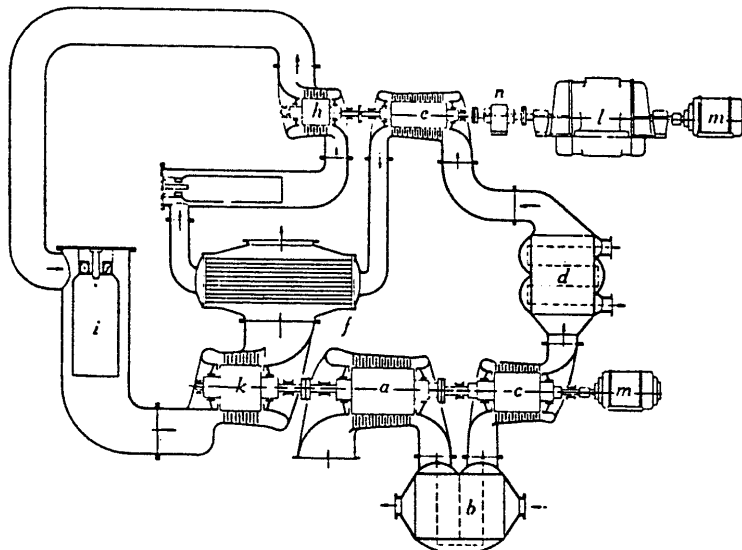
Kuva 8.4. Lisäpolttokammioilla varustetun kaasuturbiinikoneikon toimintaperiaate (resultoiva tarkoittaa kytkentää, jossa on välijäähdytys, lisäpolttokammio ja lämmönsiirrin).

Hyötysuhteen paraneminen selittyy Carnot-periaatteesta. Tähän vaaditaan kuitenkin suuria painesuhteita. Pienillä painesuhteilla on välikuumennuksesta ainoastaan haittaa.

Hyvän hyötysuhteen saavuttamiseksi tarvitaan siis monimutkainen laite: lämmönsiirtimiä, useita kompressoreja, palamiskammioita ja turbiineja. Parhaimmillaan kaasuturbiinikoneikko olisi, kun sekä puristus että paisunta olisivat isotermisiä ja lämmönsiirtimen toiminta sataprosenttinen (täydellinen regeneraatio). Näin saavutettaisiin Carnot-hyötysuhde. Tätä havainnollistetaan kuvassa 8.5. Käytännössä koneikkoa ei kuitenkaan kannata rakentaa kovin monimutkaiseksi. Kuvassa 8.6 on esitetty hieman monimutkaisempi koneikko.



Kuva 8.5. Välijäähdytyksen ja -kuumennuksen vaikutus hyötysuhteeseen.

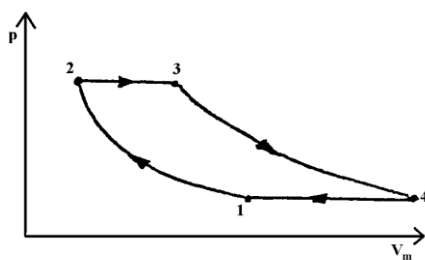


- a*—Low-pressure compressor  
(air 90 kg/sec, 1 ata, 5°C)  
*b*—First intercooler  
(cooling water 5°C)  
*c*—Intermediate-pressure compressor  
(air outlet 3.8 ata)  
*d*—Second intercooler  
(cooling water 5°C)  
*e*—High-pressure compressor  
(air outlet 8.8 ata)  
input 14,500 kW  
*f*—Air preheater  
(gas outlet 180°C  
regeneration coefficient  

$$\epsilon = \frac{\Delta T_{\text{Air out-in}}}{\Delta T_{\text{Gas in-out}}} = 0.8$$
)  
*g*—High-pressure combustion chamber  
*h*—High-pressure turbine  
(28,000 kW, 4,750 r. p. m.;  
gas inlet 650°C)  
*i*—Low-pressure combustion chamber  
*k*—Low-pressure turbine  
(19,000 kW, 4,600/3,000 r. p. m.;  
gas inlet 600°C)  
*l*—A. C. generator 13,000 kW  
*m*—Starting motor 400 kW  
*n*—Reduction gear 4,750/3,000 r. p. m.

Kuva 8.6. Kaksiakselinen kaasuturbiini lisälämmityksellä, välijäähdytyksellä ja regeneraatiolla.

## 8.2 Kaasuturbiinin prosessiarvojen laskeminen



Kuva 8.7. Kaasuturbiiniprosessi  $pV_m$ -tasossa.

Stationäärisesti toimivan koneen energiataseesta saadaan yleisesti:

$$P + \Phi = \dot{m} \Delta h_{tot} = \dot{N} \Delta H_{mot} \quad (8.2)$$

jossa kokonaisentalpia:

$$h_{tot} = h + \frac{w^2}{2} + gz \quad (8.3)$$

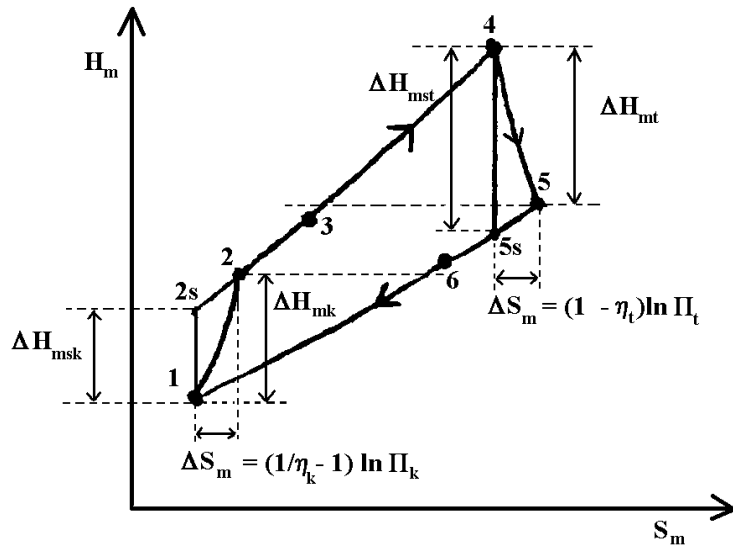
$$H_{mot} = H_m + \frac{Mw^2}{2} + Mgz \quad (8.4)$$

Korkeusermi voidaan jättää huomioonottamatta kaasuille (paitsi meteorologiassa) ja yleensä myös nopeusermi, paitsi lentovoimalaitteissa. Näissä (ja periaatteessa aina) on siis piirroksen tilat 1,2,3,... käsitettävä isentrooppisiksi patotiloiksi ts. nopeus pienenee nolnaan, jolloin ominaisentalpia suurenee määrällä  $w^2/2$  ja lämpötila määrällä  $w^2/2c_p = T_{tot} - T$ . Paine nousee isentrooppikaavan mukaan:

$$\frac{p_{tot}}{p} = \left( \frac{T_{tot}}{T} \right)^{c_{pm}^*} \quad (8.5)$$

Hyötysuhteet määritellään myös periaatteessa kokonaisentalpian mukaan, vaikkakin indeksi tot tavallisesti jätetään pois.

Kompressorin ja turbiinin tehot määritetään joko isentrooppisen hyötysuhteen  $\eta_s$  tai kompressio- ja ekspansiohyötysuhteiden  $\eta_k$  ja  $\eta_e$  avulla. Suurilla koneilla ovat parhaimmat  $\eta_s$ -arvot kompressoreilla n. 83...87 (90) % ja turbiineilla 87...89(92) %. Pienillä koneilla (alle 150 kW) ovat maksimiarvot luokkaa 81 ja 86%. (Pienemmät hyötysuhteet johtuvat mm. pienemmästä Reynoldsin luvusta.) Isentrooppihyötysuhteen  $\eta_s$  häittana on riippuvuus painesuhteesta (tai porrasluvusta), mikä vaikeuttaa sen arviointia.  $\eta_s$  pienenee porrasluvun kasvaessa kompressoreilla, koska ensimmäisten portaiden häviöteho kuumentaa kaasua, jolloin sen tilavuus kasvaa ja myöhempien portaiden tehontarve kasvaa vastaavasti. Turbiinissa tilavuuden kasvu häviöiden takia suurentaa myöhemmistä portaista saatavaa tehoa, joten  $\eta_s$  kasvaa porrasluvun mukana.



Kuva 8.8. Kaasuturbiinin isentrooppisen ja todellisen entalpiamuutoksen ero.

Isentrooppista (s) hyötysuhdetta käytettäessä lasketaan ensin isentrooppinen entalpiain tai lämpötilan muutos ja siitä jakamalla tai kertomalla isentrooppisella hyötysuhteella todellinen lämpötilan tai entalpiain muutos kompressorissa (k) tai turbiinissa (t) (tilapisteiden numerointi kuvan 8.8 mukainen):

Isentrooppinen lämpötilan muutos kompressorissa:

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \Pi_k^{1/C_{pm12}^*} \quad (8.6)$$

Isentrooppinen entalpiain muutos kompressorissa:

$$\Delta H_{msk} = C_{pm12}^* (T_{2s} - T_1) = C_{pm12}^* T_1 \left( \Pi_k^{1/C_{pm12}^*} - 1 \right) \quad (8.7)$$

Todellinen entalpiain muutos kompressorissa:

$$\Delta H_{mk} = \frac{\Delta H_{msk}}{\eta_{sk}} = \frac{C_{pm12}^* T_1}{\eta_{sk}} \left( \Pi_k^{1/C_{pm12}^*} - 1 \right) = C_{pm12}^* (T_2 - T_1) \quad (8.8)$$

Isentrooppinen lämpötilan ja entalpiain muutos turbiinissa:

$$\frac{T_{5s}}{T_4} = \Pi_t^{-1/C_{pm45}^*} \quad (8.9)$$

$$\Delta H_{mst} = C^*_{pm45}(T_4 - T_{5s}) = C^*_{pm45}T_4 \left( 1 - \Pi_t^{1/C^*_{pm45}} \right) \quad (8.10)$$

Todellinen entalpiamuutos turbiinissa:

$$\Delta H_{mt} = \eta_{st} \Delta H_{mst} = \eta_{st} C^*_{pm45} T_4 \left( 1 - \Pi_t^{1/C^*_{pm45}} \right) = C^*_{pm45} (T_4 - T_5) \quad (8.11)$$

Kaavoissa

$$\Pi_k = \frac{p_2}{p_1} \quad = \text{kompressorin painesuhde}$$

$$\Pi_t = \frac{p_4}{p_5} = \Pi_k \Pi_h \quad = \text{turbiinin painesuhde}$$

$$\Pi_h = \exp\left(-\sum \Delta S_m\right) \quad = \text{häviöpainesuhde (n. 0,9...0,96)}$$

$$\Delta S_m = \ln\left(\frac{p_{\max}}{p_{\min}}\right) \approx \frac{\Delta p}{\bar{p}} \quad = \text{painehäviöstä johtuva molaarisen entropian kasvu palokammiossa (n. 3%), lämmönsiirtimessä (yht. noin 4% yli 5 MW tehoilla), putkijohdoissa, ym.}$$

Kompresso- ja ekspansiohyötysuhteiden käyttö on suositeltavampaa, koska niitä voi pitää yhdelle portaalle ominaisina vakioina suunnittelupisteessä. Nämä ovat differentiaaliprosessin isentrooppisia hyötysuhteita. Käytetään myös nimitystä polytrooppinen hyötysuhde, koska puristus- ja paisuntakäyrät ovat polytrooppeja.

$$\eta_k = \frac{dH_{ms}}{dH_m} = \frac{V_m dp}{dH_m} \quad = \text{kompressiohyötysuhde}$$

$$\eta_e = \frac{dH_m}{dH_{ms}} = \frac{dH_m}{V_m dp} \quad = \text{ekspansiohyötysuhde}$$

Sijoittamalla ideaalikaasulle  $V_m = \frac{T}{p}$  ja  $dH_m = C^*_{pm} dT$  sekä integroimalla saadaan puristukselle kompressorissa:

$$\frac{T_2}{T_1} = \Pi_k^{1/\eta_k C^*_{pm12}} \quad (8.12)$$



$$\Delta H_{mk} = C^*_{pm12} T_1 \left( \Pi_k^{1/\eta_k} C^*_{pm12} - 1 \right) = C^*_{pm12} (T_2 - T_1) \quad (8.13)$$

ja paisunnalle turbiinissa vastaavasti:

$$\frac{T_5}{T_4} = \Pi_t^{-\eta_c/C^*_{pm45}} \quad (8.14)$$

$$\Delta H_{mt} = C^*_{pm45} T_4 \left( 1 - \Pi_k^{-\eta_c/C^*_{pm12}} \right) = C^*_{pm45} (T_4 - T_5) \quad (8.15)$$

Koska seinämän läpi johtunut lämpövirta  $\Phi$  on mitätön tehon rinnalla (eli systeemi on adiabaattinen), saadaan kaavoista 8.16 ja 8.17 kompressorin ja turbiinin sisäiset tehot (ilman mekaanisia häviöitä laakereissa ym.):

$$P_k = \dot{N}_k \Delta H_{mk} \quad (8.16)$$

$$P_t = \dot{N}_t \Delta H_{mt} \quad (8.17)$$

Savukaasun ja ilman molekyylivirtojen suhde stökiometrisessä palamisessa

$$\frac{\dot{N}_{tsk}}{\dot{N}_{ti}} = \delta_s \quad (8.18)$$

saadaan ao. polttoaineen analyysin avulla laskemalla stökiometrinen happi- ja ilmamäärä ja syntyneet savukaasut. Arvoja on taulukoissa 22 ja 23 TKK2 s. 584, 5, 6 (merkitty  $N_{kt}/N_{ti}$ , jossa k = kaasu, i = ilma ja t = teoreettinen = stökiometrinen). Ilmakertoimen ollessa  $\lambda$  on ilmamolekyylivirta kompressorin läpi:

$$\dot{N}_k = \frac{\lambda \dot{N}_{si}}{\eta_{vol}} \quad (8.19)$$

jossa

$\dot{N}_{si}$  = teor. poltonilmatarve polttoainevirran avulla laskettuna  
 $\eta_{vol}$  = vuodoista johtuva volymetrinen hyötysuhde. Usein oletetaan  $\eta_{vol} = 1$ .

Savukaasujen molekyylivirta turbiinin läpi on:

$$\dot{N}_t = \dot{N}_{si} (\delta_s + \lambda - 1) \quad (8.20)$$

jossa  $\delta_s$  edustaa stökiometristä savukaasua ja  $\lambda - 1$  ylimääräistä ilmaa. Stökiometrinen ilmamolekyylivirta vastaa teoreettista ilmavirtaa.

Näin kaasuturbiinissa turbiinin ja kompressorin läpi menevien molekyylivirtojen suhde saadaan

$$\delta = \frac{\dot{N}_t}{\dot{N}_k} = \eta_{vol} \left( 1 + \frac{\delta_s - 1}{\lambda} \right) \quad (8.21)$$

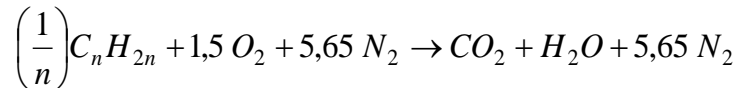
Polttokammion energiatase on ( $k =$  stökiometrinen savukaasu, kuvan 8.8 merkinnät):

$$\eta_p \dot{m}_p q_i + \lambda \dot{N}_{si} H_{mi}(T_3) = \dot{N}_{sk} H_{mk}(T_4) + (\lambda - 1) \dot{N}_{si} H_{mi}(T_4) \quad (8.22)$$

jossa palokammion hyötysuhde  $\eta_p$  (yleensä yli 0,99) ottaa huomioon epätäydellisen palamisen (ts.  $\eta_p \dot{m}_p$  on täydellisesti palanut polttoainevirta).  $H_m$ :t ovat taulukkoarvoja. Taulukko löytyy esimerkiksi liitteenä 7.  $Q_m$  ja  $q$  ovat lämpöarvoja standardilämpötilassa (jossa taulukkoentalpiat ovat = 0), joka on em. taulukoissa = 2,5 MJ/kmol = n.300 K = n. 27 °C.

$$\frac{\dot{Q}_{vap}}{\dot{N}_{si}} = \frac{\eta_p \dot{m}_p q}{\dot{N}_{si}} = Q_m = \delta_s H_{mk}(T_4) + (\lambda - 1) H_{mi}(T_4) - \lambda H_{mi}(T_3) \quad (8.23)$$

Esimerkkinä polttoaineelle  $C_n H_{2n}$  on reaktioyhtälö:



missä

$$m_p = 14 \text{ kg}$$

$$N_{si} = (1,5 + 5,65) \text{ kmol} = 7,15 \text{ kmol}$$

$$N_{sk} = (1 + 1 + 5,65) \text{ kmol} = 7,65 \text{ kmol}$$

joten

$$\delta_s = \frac{7,65}{7,15} = 1,07$$

$$\frac{N_{si}}{m_p} = \frac{7,15 \text{ kmol}}{14 \text{ kg}} = 0,51 \text{ kmol/kg} \quad (\text{täydelliselle palamiselle})$$

Jos  $q = 43,5 \text{ MJ/kg}$ , niin

$$Q_m = \frac{m_p q}{\dot{N}_{si}} = \frac{43,5 \text{ MJ/kg} \cdot 14 \text{ kg}}{7,15 \text{ kmol}} = 85,3 \text{ MJ/kmol}$$

Jos esim.  $\lambda = 7$ , saadaan  $\delta_s = \eta_{vol} 1,01 = n \cdot 1,00$ , jos oletetaan volymetriseksi hyötysuhteeksi 0,99. Siis molekyylivirtojen ero kompressorissa ja turbiinissa voidaan yleensä jättää huomiotta.

Koko kaasuturbiinilaitoksen hyötysuhde on:

$$\eta = \frac{P_{net}}{\dot{m}_p q} = \eta_p \frac{P_t \eta_{mt} - P_k}{\dot{N}_{si} Q_m \eta_{mk}} = \frac{\eta_p}{Q_m} \left[ (\lambda - 1 + \delta_s) \eta_{mt} \Delta H_{mt} - \frac{\lambda}{\eta_{vol} \eta_{mk}} \Delta H_{mk} \right] \quad (8.24)$$

jossa mekaaniset hyötysuhteet  $\eta_{mt}$  ja  $\eta_{mk}$  ovat suuruusluokkaa 0,995 ja jätetään yleensä huomiotta.

Ilmakerroin saadaan kaavasta 7.25 kun turbiinin siivistön sallima maksimilämpötila  $T_4$  ja lämpötila ennen palokammiota  $T_3$  tunnetaan

$$\lambda - 1 = \frac{Q_m + H_{mi}(T_3) - \delta_s H_{mk}(T_4)}{H_{mi}(T_4) - H_{mi}(T_3)} \quad (8.25)$$

## 8.3 Kaasuturbiinikombivoimalaitos

### 8.3.1 Yleistä

Kombiprosessissa on yhdistetty kaasuturbiini ja höyryturbiini. Kombiprosessin idea on lähtöisin ajatuksesta parantaa yksinkertaisen Brayton-prosessin hyötysuhdetta käyttäen hyväksi turbiinin jälkeisen savukaasun lämpöenergiaa. Regeneraation käyttö on yksi tapa, kuten edellä on tullut ilmi. Regeneraattori parantaa hyötysuhdetta, muttei kuitenkaan lisää tuotetun sähkön määrää, vaan painehäviöistä johtuen jopa vähentää sitä jonkin verran. Kaasuturbiinin perään liitetty höyryprosessi sen sijaan sekä parantaa hyötysuhdetta että lisää tuotetun sähkön määrää. Höyryprosessin lisääminen kaasuturbiiniprosessin perään on melko luonnollinen ratkaisu, koska kaasuturbiini käyttää melko

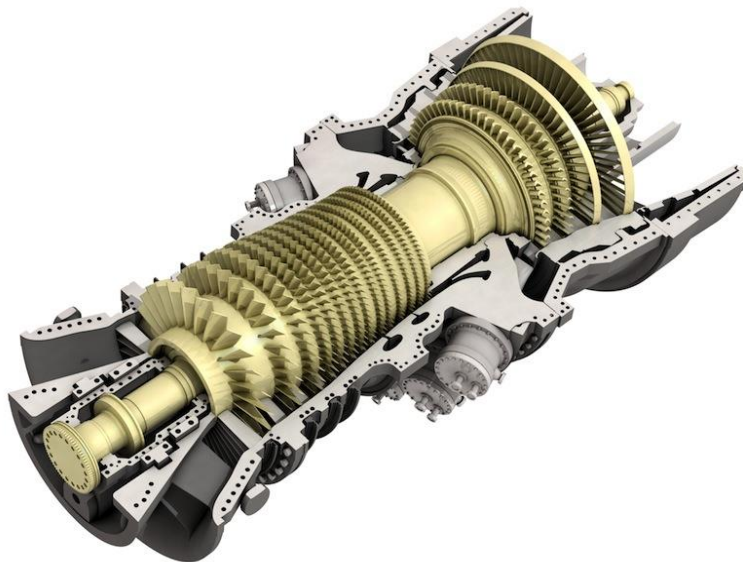
korkeita lämpötiloja (n. 1100 – 1650 °C), kun taas höyryprosessi toimii melko matalilla lämpötiloilla (n. 540 – 650 °C). (El-Wakil, 1985, 341.)

Kombivoimalaitoksen polttoaineeksi soveltuu joko maakaasu tai kevyt polttoöljy. Nykyisin kaasuturbiinin sisäänmenolämpötila on n. 1250 °C, jonka seurauksena kaasuturbiinin sähköntuotannon hyötysuhde on n. 37 %. Savukaasujen lämpötila on n. 500...550 °C ja niiden happipitoisuus n. 12 %, joten ennen pakokaasukattilaa voidaan savukaasuja lämmittää lisäpolttoaineella (yleensä enintään 200 °C). Palamisilmana käytetään poltossa kaasuturbiinin kuumia pakokaasuja.

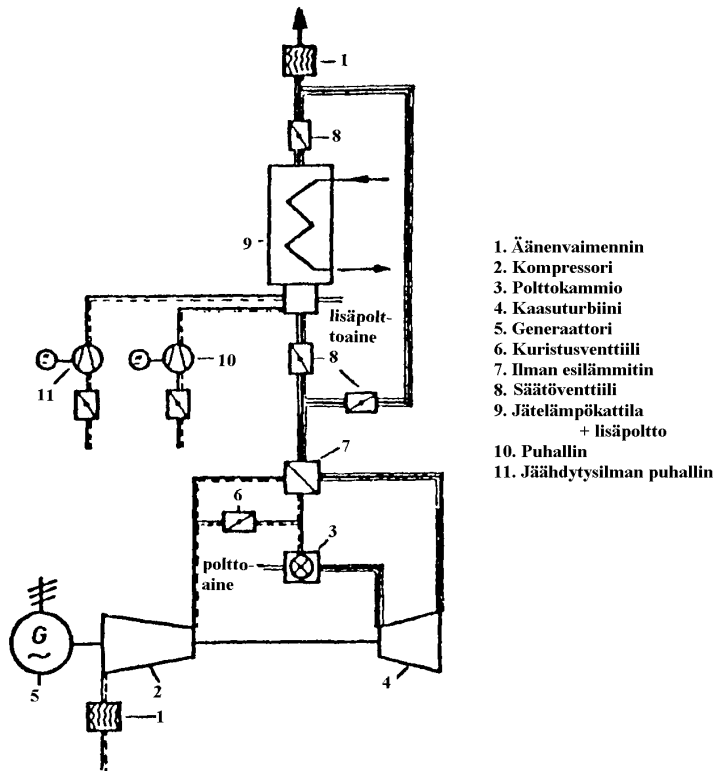
Höyryvoimaproessin höyry tuotetaan pakokaasukattilassa. Pakokaasukattilaan on sijoitettu yleensä loppupäähän kaukolämpöpintoja. Savukaasun loppulämpötila voi olla jopa noin 80 °C. Pakokaasukattila voidaan rakentaa siten, että se tuottaa kahdenpainaista höyryä. Tällöin lämmöntuonti höyryvoimaproessiin tapahtuu korkeammassa lämpötilassa ja prosessihyötysuhde nousee.

Kytettäessä höyryturbiini ja kaasuturbiini samaan prosessiin voi sähköntuotannon hyötysuhde nousta jopa yli 58 %: n. Lauhdevoimalaitoksessa hyötysuhde on maksimissaan hiukan yli 40%.

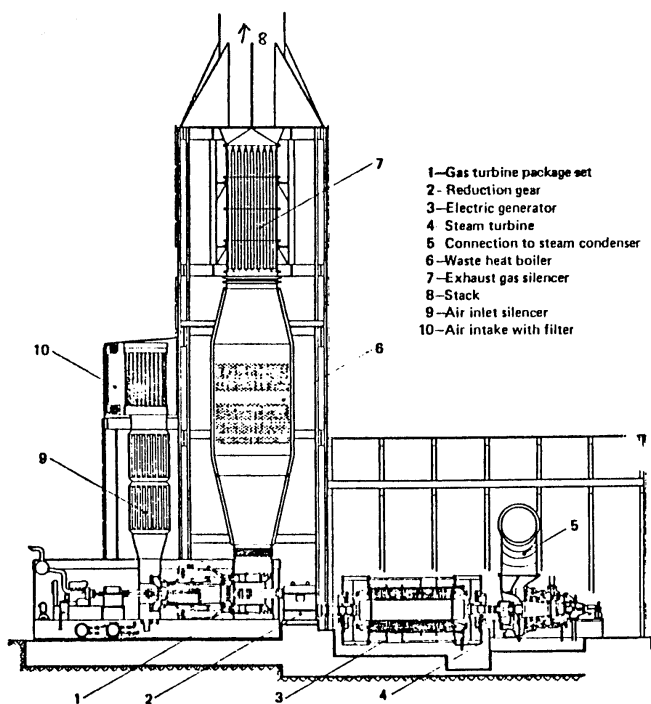
Seuraavissa kuvissa on esitetty kaasuturbiinin ja höyryturbiinin yhdistäminen kombiprosessiksi sekä kaasuturbiinin perään sijoitetun lisäpolttoainetta käyttävän kattilan kytkeminen.



Kuva 8.9. Teollisuuskaasuturbiini.



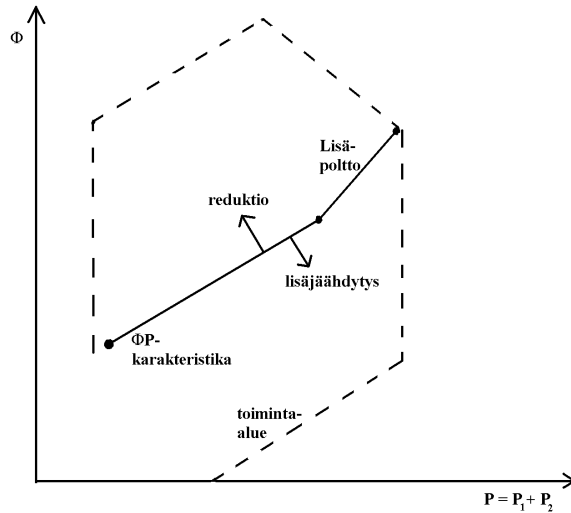
Kuva 8.10 Pakokaasukattilan kytkeminen kaasuturbiinin yhteyteen (lisäpolttoaineen käyttö mahdollinen). Prosessissa kaasuturbiinin pakokaasut toimivat kattilan esilämmitettynä polttoilmana.



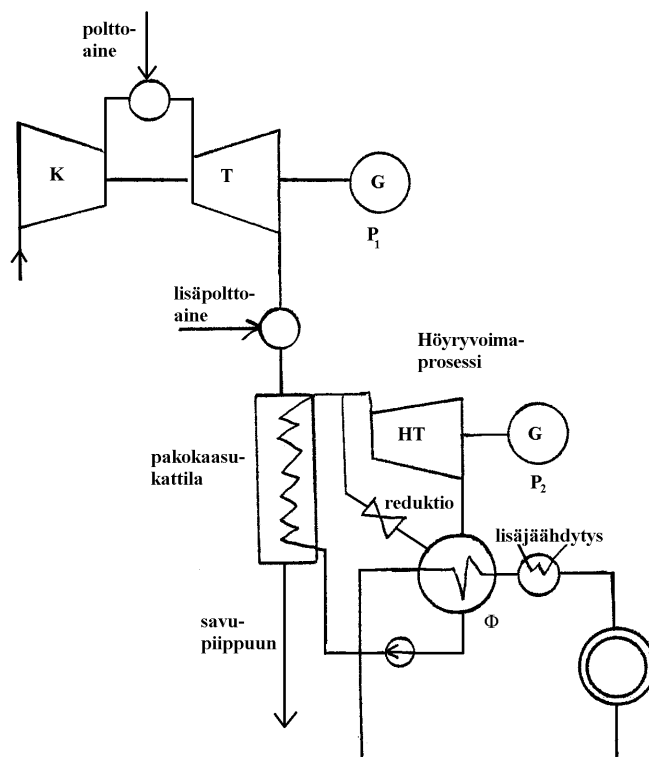
Kuva 7.11. Pakokaasukattilan rakenne ja höyryprosessin yhdistäminen kaasuturbiiniprosessiin.

### 8.3.2 Kombivoimalaitoksen $\Phi P$ –karakteristika

Tyypillisesti kuvan 8.13 kaltaisen kombiproessin rakennusaste eli sähköntuotannon suhde lämmöntuotantoon on likimäärin yksi. Siihen voidaan vaikuttaa lisjäähdytyksellä sekä reduktiolla oheisen  $\Phi P$ -karakteristikan mukaisesti.



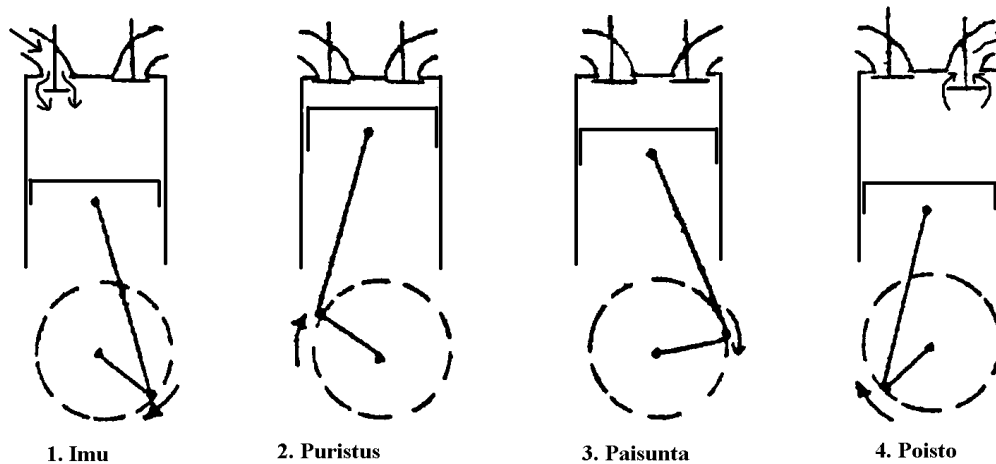
Kuva 8.12.  $\Phi P$  –karakteristika.



Kuva 8.13. Reduktion ja lisjäähdytyksen järjestäminen kombiproessissa.

## 9 POLTTOMOOTTORIT

Yhteistä polttomoottoreille on kaasu- ja höyryturbiineihin verrattuna, että polttoaine palaa itse koneessa, sen sylinterissä. Palamistulokset muodostavat työaineen, joka tuottaa mekaanista työtä, yleensä mäntä-kiertokanki-kampiakseli –mekanismin välityksellä.

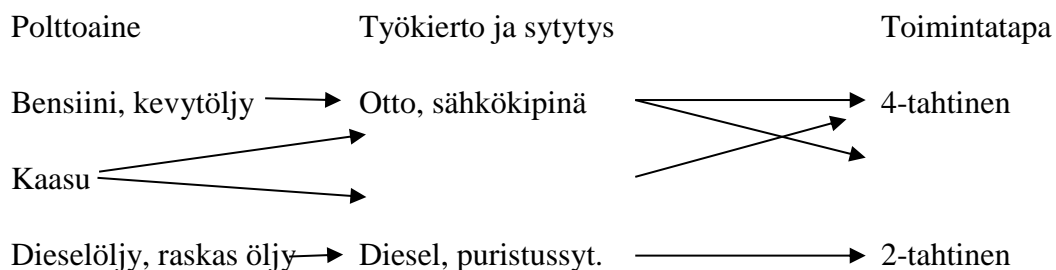


Kuva 9.1. 4-tahtisen polttomoottorin toimintaperiaate.

Jokaista työvaihetta kohti käytetään yhtä iskua eli puolikierrosta. Tässä ns. 4-tahtisessa toiminnassa yhteen työkiertoon vaaditaan siis kaksi kierrosta.

2-tahtisessa toimintatavassa saatetaan työkierto loppuun yhdellä kierroksella. Tällöin palamistulokset puhalletaan ulos sylinteristä käyttämällä ilmaa, jonka paine on vähän suurempi kuin ulkoilman. Sylinteri myös täytetään ulkoilmaa suurempipaineisella ilmalla. Tarvitaan siis erikoisjärjestelyjä tuloilman suhteen (esim. puhallin).

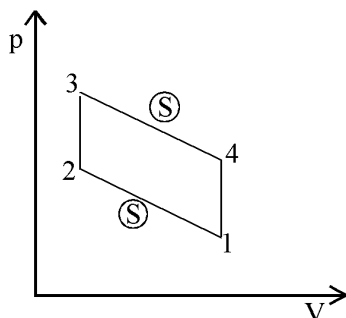
Yleisimmät moottorityypit:



Nämä ovat tavallisimmat tyypit. Lisäksi esiintyy erilaisia muunnoksia.

## 9.1 Otto –moottori

Otto-moottorissa sekoitetaan ilma ja bensiini kaasuttimessa sylinterin ulkopuolella. Bensiini sekoittuu siis ilmaan kaasumuodossa. Näin saadaan homogeeninen seos, joten voidaan käyttää stökiometristä seossuhdetta. Tämä seossuhde antaa suuren seoslämpöarvon ja työn jaksoa kohti. Seos puristetaan ja juuri ennen yläkuolokohtaa sähkökipinä sytyttää seoksen, joka palaa räjähdysmäisesti. Paine nousee nopeasti ja työntää männän alaspäin.



Kuva 9.2. Otto-prosessi pV –tasossa.

Kun otto-prosessia käsitellään ideaalikaasuprosessina, saadaan hyötysuhteelle kaava

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{1/\gamma}} \quad (9.1)$$

jossa

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \text{puristussuhde} \quad (9.2)$$

Mitä suurempaa puristussuhdetta käytetään, sitä parempi on hyötysuhde. Polttoaineesta riippuen puristussuhteella on kuitenkin määrätty raja-arvo, koska syntyy ns. nakutusilmiö, mikäli tämä ylitetään. Nakutusilmiöllä tarkoitetaan kaasuseoksen syttymistä ennen aikaisesti johtuen liian suuren puristuksen aiheuttamasta korkeasta lämpötilasta. Tämä on moottorille vaarallista, koska se aiheuttaa suuria paine- ja lämpörasituksia.

Polttoaineen nakutuskestävyys ilmaistaan oktaaniluvulla. Tämä määritetään vertailemalla polttoainetta tiettyyn normiseokseen, joka on iso-oktaani-heptaaniseos. Puhtaan oktaanin oktaaniluku on 100. Mitä suurempi on polttoaineen oktaaniluku, sitä suurempaa puristussuhdetta voidaan käyttää ja sitä parempi hyötysuhde saavutetaan. Otto-moottori on henkilöautoissa yleisin moottorityyppi.

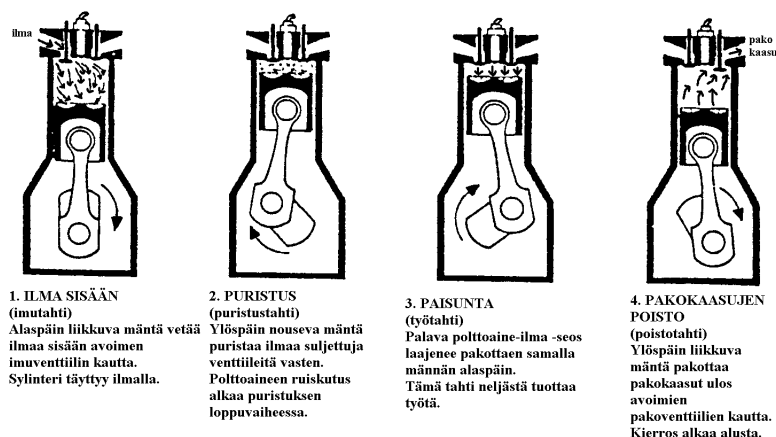


Autonmoottoreiden pakokaasut puhdistetaan nykyisin kolmitoimikatalysaattorilla, joka poistaa pakokaasuista CO:n, hiilivedyt sekä NO<sub>x</sub>:n. Katalysaattoria käytettäessä pitää moottorin toimia tarkalleen teoreettisella seossuhteella eli  $\lambda = 1$ .

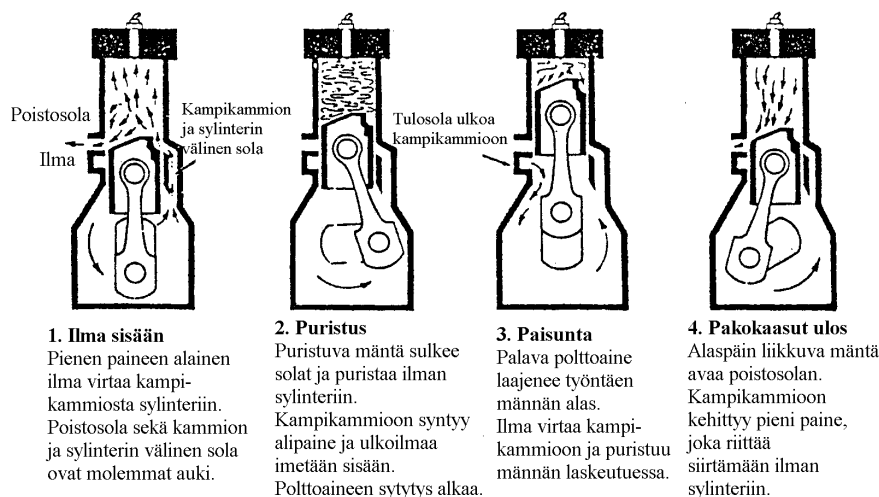
## 9.2 Diesel –moottori

Diesel-moottorissa puristetaan pelkkää ilmaa, joten voidaan siis sallia suurempia puristussuhteita.

Kuvissa 9.3 ja 9.4 on esitetty 2- ja 4-tahtisen dieselmoottorin toimintaperiaatteet.



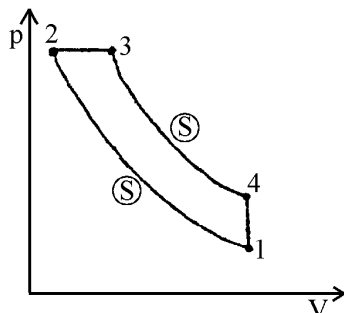
Kuva 9.3. 4 –tahti –dieselmoottorin toimintaperiaate.



Kuva 9.4. 2–tahti–dieselmoottorin toimintaperiaate. Työtahti joka männänkierrolla.

Polttoaine ruiskutetaan suurella paineella ennen yläkuoloa sylinteriin. Puristuksen johdosta on ilman lämpötila niin korkea, että tämä pystyy sytyttämään polttoaineen.

Dieselmootorissa polttoaine tulee ilmaan nestepisaroina, jolloin sekoittuminen on huonompaa ja on käytettävä runsaasti ylimääräistä ilmaa täydellisen palamisen saavuttamiseksi. Dieselmootorissa ilmakerroin onkin luokkaa  $\lambda = 1,4 \dots 2$ . Näin ollen seospolttoarvo jää pieneksi.



Kuva 9.5. Diesel-prosessi pV-tasossa.

Dieselmootorissa voidaan käyttää myös kaasua polttoaineena sytyttämällä se pienellä kevytöljymäärällä. Kaasu syötetään ilman mukana sylinteriin. Sytyttämiseen käytettävä öljymäärä edustaa koko polttoainemäärästä noin 5 prosenttia.

Dieselpolttoaineen hyvyden mittana on setaaniluku. Mitä suurempi se on, sitä helpommin polttoaine syttyy ja sitä vähemmän polttoainetta ehtii sylinteriin ennen syttymistä, jolloin käynti on pehmeätä. Oktaaniluvun noustessa setaaniluku laskee, joten ottomootorin polttoaineet eivät sovellu dieseliin ja päinvastoin.

Ideaalikaasukiertoprosessin hyötysuhde

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{1/\gamma}} \left[ \frac{\varphi^\gamma - 1}{\gamma(\varphi - 1)} \right] \quad (9.3)$$

$$\varphi = \frac{V_3}{V_2} = \text{täytössuhde} \quad (9.4)$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (9.5)$$

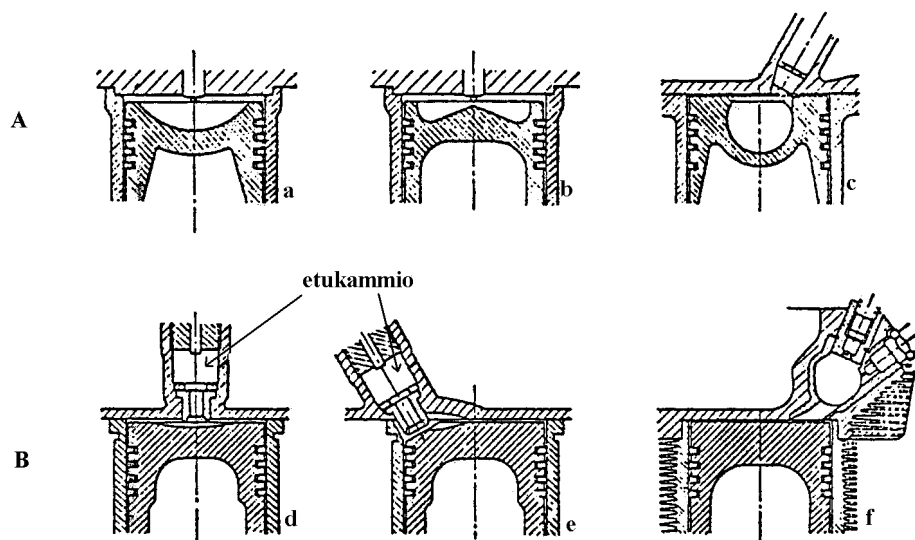
Yhtälön 8.3 viimeinen termi hyötysuhteen kaavassa on suurempi kuin yksi, joten samalla puristussuhteella on siis ottomootorin hyötysuhde parempi. Dieselmootorilla saavutetaan kuitenkin parempia hyötysuhteita, koska voidaan sallia suurempia puristussuhteita. On kuitenkin otettava huomioon, että samalla koneen paino kasvaa, koska lujuussyistä vaaditaan vankempaa rakennetta. Puristussuhteen suurentaminen lisää mäntävoimaa, ja siitä johtuen myös laakeripintoja, poikkipintoja ja kitkaa.

## 9.2.1 Polttoaineen ruiskutus

Polttoaine voidaan ruiskuttaa suoraan palokammioon. Menetelmää kutsutaan suorasuihkutusmenetelmäksi. Menetelmässä vaaditaan suurta ruiskutuspainetta riittävän pienen pisarakoon ja hyvän räjähdysseoksen aikaansaamiseksi.

Polttoaine voidaan ruiskuttaa palokammioon myös epäsuorasti käyttäen esim. etukammiota tai pyörrekammiota. Etukammioimenetelmässä polttoaine ruiskutetaan etukammioon, joka on yhdistetty rei'illä palokammioon. Polttoaineen syttyessä esikammiossa poistuvat savukaasut tempaavat mukaansa palamatta jääneet polttoainepisararat, jotka sekoittuvat palokammiossa olevan ilman kanssa ja palavat. Menetelmässä voidaan käyttää suorasuihkutusmenetelmää pienempää ruiskutuspainetta (halvempi polttoainepumppu).

Pyörrekammioimenetelmässä polttoaine ruiskutetaan ohjattuun ilmavirtaukseen, joka on saatu pyörivään liikkeeseen johtamalla ilman epäkeskisesti pyörrekammioon.



- A. Suorasuihkutteisia jakamattomia palokammioita:  
 a) pallokalotilla varustettu männän pää  
 b) Hesselman -mäntä  
 c) MAN-M -menetelmä
- B. Jaettu palotiloja suihkutuksen tapahtuessa epäsuorasti:  
 d) sylinterin keskellä oleva etukammio  
 e) sylinterin sivussa oleva etukammio  
 f) Deutz -pyörrekammio

Kuva 9.6. Erilaisia pienten ja keski suurten dieselmootoreiden palotilan muotoja.

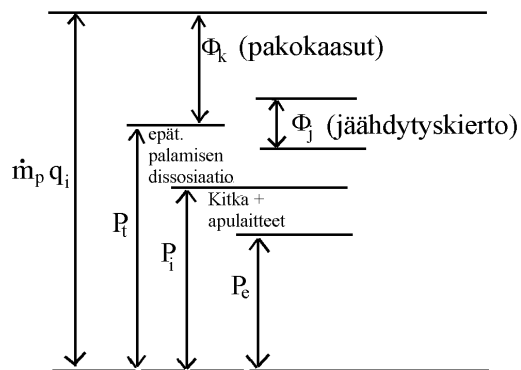
## 9.2.2 Kvalitatiivinen vertailu

Seuraavaan taulukkoon on koottu diesel- ja ottomoottoreiden ominaisuuksia keskinäistä vertailua varten.

	Diesel	Otto
1. Puristusuhde	Korkeampi 12...16	7...11
2. $\epsilon$ määrää	palamispaine	nakutus
3. Hyötysuhde	Korkeampi 0,30...0,42	0,25...0,32
4. Osakuormitus	Parempi. koska säätö tapahtuu polttoainemäärää muuttamalla	säätö tapahtuu kuristamalla kaasuläpällä tulovirtausta.
5. Pyörimisnopeus	Palaminen tapahtuu hitaammin	Suurempi
6. Paino	Suurempi paino (min.1 kg/kW)	Pienempi paino (min. 0,5 kg/kW)
7. Polttoaine	Dieselöljy Polttoöljyt (Kaasu)	Bensiini Kaasu

## 9.3 Moottorien tärkeitä tunnuslukuja

### 9.3.1 Moottorin teho ja hyötysuhde



Kuva 9.7. Moottorin tehojen määritelmiä.

Moottorin teoreettinen teho voidaan laskea kaavalla

$$P_t = \eta_t \dot{m}_p q_i \quad (9.6)$$

Polttoaine ei kuitenkaan todellisuudessa pala aivan täydellisesti, vaan lämpöä siirtyy sylinterin seiniin. Tapahtuu siis dissosiaatio korkean lämpötilan takia. Saadaan indikoitu teho eli sylinterissä kehitetty teho

$$P_i = \eta_g P_t = \eta_i \dot{m}_p q_i \quad (9.7)$$

Indikoitu hyötysuhde

$$\eta_i = \eta_g \eta_t \quad (9.8)$$

Indikoitua tehoa ei kokonaan voida käyttää hyväksi, sillä osa siitä häviää laakerien ja männän kitkaan, myöskin apulaitteet kuten tuulettimet, jäähdytysvesipumput ym. vaativat tehoa. Saadaan akseliteho (jarrutettu teho, pätöteho)

$$P_e = \eta_m P_i = \eta_e \dot{m}_p q_i \quad (9.9)$$

$$\eta_e = \textit{kokonaishyötysuhde}$$

$$\eta_m = \textit{mekaaninen hyötysuhde}$$

Teoreettista tehoa  $P_t$  ei voida mitata, joten sillä ei ole juurikaan merkitystä.  $P_i$  voidaan mitata työkierron aikana ns. indikaattoreilla.  $P_e$  voidaan periaatteessa mitata jarrukoikeissa. On kuitenkin koneita, jotka ovat niin suuria, ettei tehon määrittämiseksi tarvittavan isoja jarrutuskoneita löydy. Silloin akseliteho arvioidaan indikoidun tehon perusteella.

### 9.3.2 Ominaiskulutus

Moottorin ominaispolttoaineen kulutuksen avulla voidaan mitata kuinka hyvin moottori muuttaa käyttämänsä polttoaineen työksi. Ominaispolttoaineen kulutus määritetään siis polttoaineen massavirtana tuotettua tehoa kohti

$$b = \frac{\textit{polttoaine en kulutus}}{\textit{teho}} = \frac{\dot{m}_p}{P_e} \quad (9.10)$$

Yksiköksi saadaan näin ollen g/kWh tai g/J. Koska moottorit kaupataan usein hevosvoimissa, esiintyy suhde myös muodossa g/hvh.

Moottorin hyötysuhde voidaan siis ilmoittaa myös ominaiskulutuksen avulla, kun tiedetään polttoaineen lämpöarvo

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{m}_p q_i} = \frac{1}{b q_i} \quad (9.11)$$

Tyypillisimpien moottoripolttoaineiden lämpöarvot ovat

$$\text{dieselöljy} \quad q_i = 42,7 \text{ MJ/kg} \quad \rho = 840 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{benssiini} \quad q_i = 43,5 \text{ MJ/kg} \quad \rho = 726 \text{ kg/m}^3$$

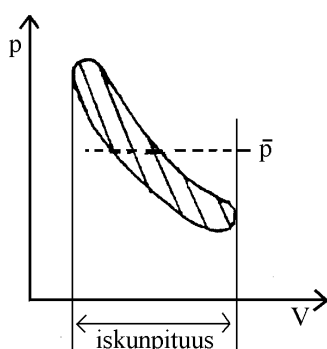
Tärkeää on kuitenkin huomata, ettei kaikki polttoaineen sisältämä energia muutu lämpöenergiaksi moottorissa, koska palamisprosessi jää usein epätäydelliseksi.

### 9.3.3 Keskipaine

Ajatellessaan, että sylinteristä saatu työ aikaansaadaan keskipaineen vaikutuksesta

$$-W = \oint p dV = A \bar{p} \cdot s \quad (9.12)$$

missä  $V = As$  on iskutilavuus. Käytetään silloin merkintöjä  $p_e$  = efektiivinen eli tehollinen keskipaine ja  $p_i$  = indikoitu keskipaine. Häviöt voidaan myöskin huomioida keskipaineen avulla esim.  $p_r$  = kitkakeskipaine.



Kuva 9.8. Moottorin keskipaineen määrittely.

Keskipaineen avulla lausuttuna saadaan akselitehon ja indikoidun tehon kaavaksi:

$$P_e = A p_e s n \frac{i}{j} \quad (9.13)$$

$$P_e = A \eta_m p_i s n \frac{i}{j} \quad (9.14)$$

$$P_i = A p_i s n \frac{i}{j} \quad (9.15)$$

missä

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$p_e$  = tehollinen keskipaine

$p_i$  = indikoitu keskipaine

$s$  = iskunpituus

$n$  = pyörimisnopeus

$i$  = sylinteriluku

$j = 1$  (2-tahtinen)

$= 2$  (4-tahtinen)

### 9.3.4 Männän keskinopeus

Männän nopeus sen liikkuessa sylinterissä ei ole vakio. Iskun alussa männän nopeus on nolla, puolivälissä se kehittyy maksiminopeuteensa kunnes palautuu taas nolaksi iskun lopussa. Tästä syystä männän nopeuden arvo ilmoitetaan yleensä keskinopeutena. Koska mäntä kulkee kierroksen aikana matkan  $2s$  ( $s$  = iskunpituus), saadaan männän keskinopeudeksi

$$C_m = 2ns \quad (9.16)$$

Männän keskinopeuden suuruus ei niinkään riipu koneen suuruudesta, vaan käyttötarkoituksesta. Kun  $C_m$  suurenee, lisääntyy laakereiden ja männän renkaiden kuluminen.

Myöskin massavoimien aiheuttama värinä voimistuu, samoin esiintyy kaasunvaihtoprosessissa häiriöitä.

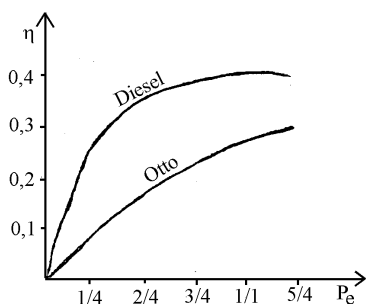
Esimerkkejä männän keskinopeuden suuruusluokasta

$C_m = 4 \dots 6 \text{ m/s}$	Laiva- ja voimalaitosmoottorit, kun vaaditaan pitkä elinikä ja suuri varmuus.
$= 10 \dots 12 \text{ m/s}$	Kulkuneuvomoottorit. Automoottorin on oltava kevyt ja toiseksi täysi kuormitus tulee harvemmin kysymykseen.
$= 10 \dots 20 \text{ m/s}$	Lentomoottorit ja kilpamoottorit.

Keskipaineet  $p_e$  ja  $p_i$  sekä männän keskinopeus  $C_m$  ovat nykyään moottorit tärkeimmät indikaattorit. Käyntivarmuus, halpuus, pitkä käyttöikä ym. vaativat alhaista keskipainetta.

### 9.3.5 Moottorin suorituskäyrä

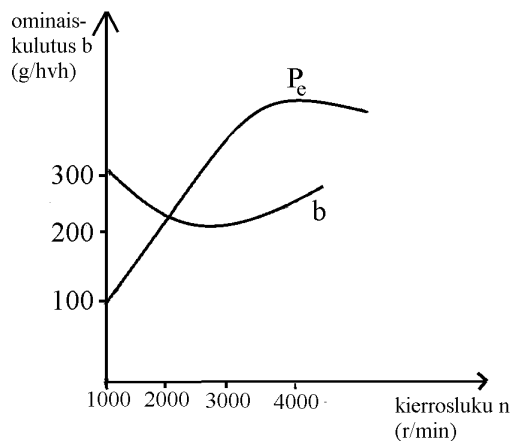
Moottorin suorituskäyrällä kuvataan hyötysuhteen riippuvuutta kuormituksesta. Ottomoottorin hyötysuhdekäyrä on epäedullisempi kuin dieselmoottorin, johtuen säädöstä.



Kuva 9.9. Hyötysuhteen riippuvuus kuormituksesta.

Auto- ja muissa kulkuneuvomoottoreissa kiinnostaa etenkin tehon ja ominaiskulutuksen riippuvuus kierrosluvusta.



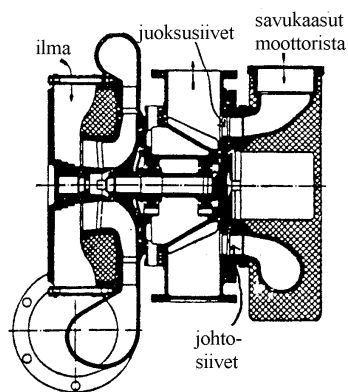


Kuva 9.10. Ominaiskulutuksen ja tehon riippuvuus kierrosluvusta.

Tehon maksimi  $P_{\max}$  ei esiinny ominaiskulutuksen minimin  $b_{\min}$  kohdalla, koska maksimiteho  $P_{\max}$  tarvitaan ainoastaan hetkellisesti.

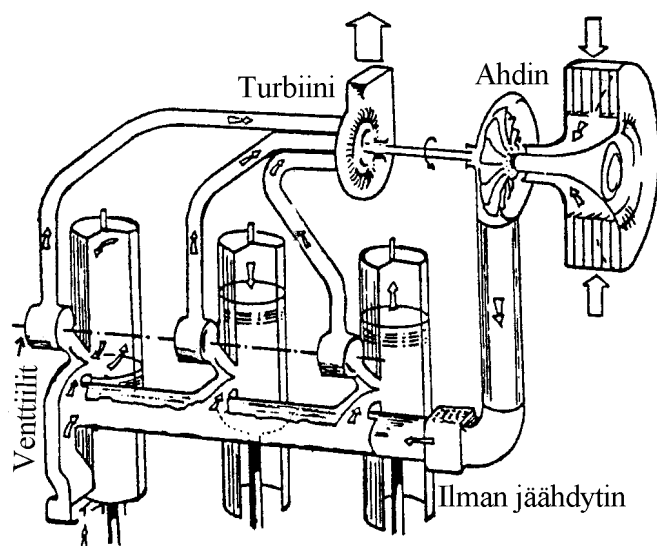
## 9.4 Ahtaminen

Diesel- ja ottoprosessien painetasoa voidaan nostaa korottamalla ahtimella prosessiin tulevan ilman painetta, jolloin prosessin teho vastaavasti suurenee. Ahtimina käytetään yleensä pyöriäviä keskipakoisahtimia. Myös ruuvikompressoreja, Rootin kompressoreja ja muita vastaavia käytetään ahtimina. Ahtimelle tuodaan käyttövoima joko mekaanisesti moottorin akselilta tai ahdinta pyöritetään pakokaasujen jäännösenergialla toimivalla turbiinilla. Jälkimmäisen tyyppistä ahdinta kutsutaan turboahtimeksi. Sillä pystytään nostamaan moottorin tehoa mekaanista ahdinta enemmän, sillä se käyttää hyödyksi pakokaasujen entalpiaa, joka muuten poistuisi. Turboahtimen käyttö parantaa moottorin hyötysuhdetta.



Kuva 9.11. Pakokaasuturboahdin.

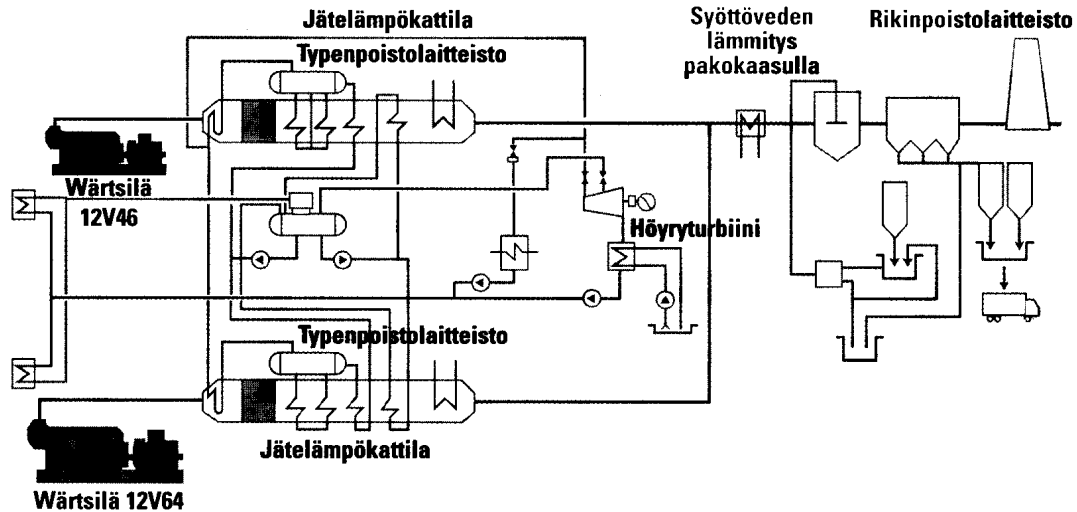
Ahtimia käytetään kilpamoottoreissa, lentokoneen moottoreissa sekä lähes poikkeuksetta suurissa polttomoottoreissa (> 100...300 kW). 2-tahtimoottoreissa ahtimen käyttöä hankaloittaa se, että pakokanavaan on sijoitettava venttiili, joka sulkeutuu pakokaasun poistuttua, jotta paine sylinterissä voi kohota. Ahtimen jälkeen sijoitetaan yleensä ilmanjäähdytin, jossa ahtimessa lämmennyt ilma jäähdytetään.



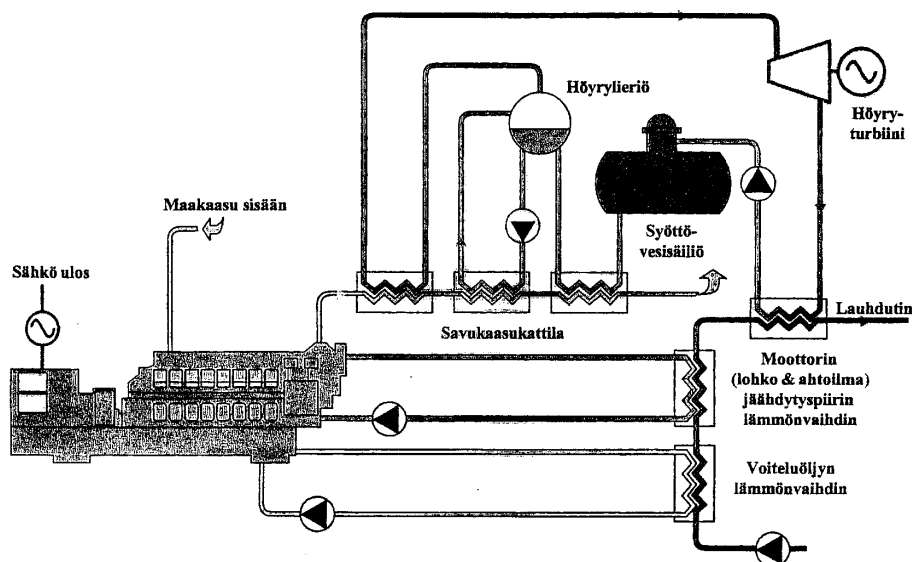
Kuva 9.12. 2-tahtisen dieselmoottorin yhteyteen kytketty turboahdin.

## 9.5 Moottorivoimalaitos

Moottorivoimalalla tarkoitetaan mäntämoottorin ja generaattorin yhdistelmää, jolla tuotetaan sähköä ja mahdollisesti myös lämpöä. Moottorivoimaloita käytetään Suomessa yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotantoon, huippu- ja varavoimaloina sekä muualla maailmassa perusvoiman tuotantoon. Voimaloiden koko vaihtelee muutamasta kymmenestä kilowatista yli sataan megawattiin. Lukumääräisesti valtaosa voimaloista on pieniä, alle 1 MW:n yksiköitä.

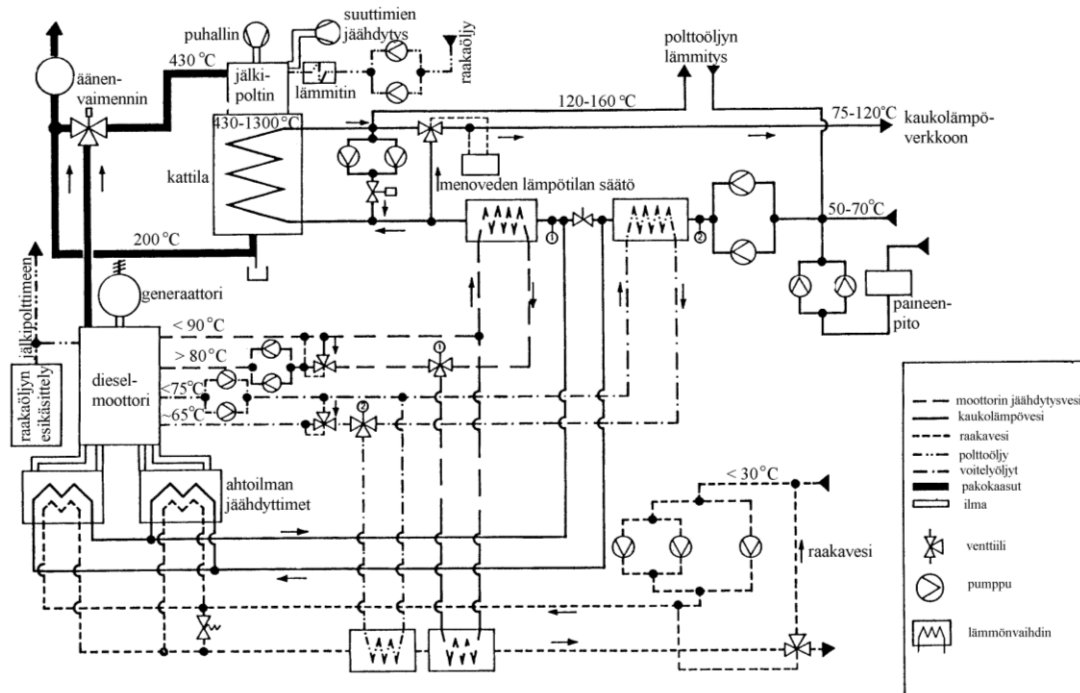


Kuva 9.13. Esimerkki moottorivoimalaitoksen kombikytkennästä. Wärtsilä NSD.



Kuva 9.14. Moottorivoimalaitoksen kombikytkentä. Wärtsilä NSD.

Moottorivoimaloiden etuja ovat lyhyt rakennusaika, korkea sähköhyötysuhde ja laaja polttoainevalikoima. Hyötysuhde pysyy korkeana myös osakuormilla. Lisäksi moottorivoimalan käynnistys on nopeaa, mikä on erityisen tärkeää varsinkin varavoimaratkaisissa. Polttoaineena käytetään useimmiten kevyttä tai raskasta polttoöljyä, mutta myös maakaasu on yleistymässä. Suuret kaasumoottorit ovat joko otto- tai dieselprosessia käyttävä. Muita mahdollisia polttoaineita ovat pienilämpöarvoinen kaasu, biokaasu, prosessien hiilivetyperusteiset sivutuotteet, kasviöljyt ja pyrolyysiöljyt. (Energia Suomessa, 1999, 226.)



Kuva 9.15. Diesel-lämmitysvoimala. Periaatekaavio jälkipolttimeella varustetun laitoksen lämmön talteenotto- ja jäähdytysjärjestelmästä.

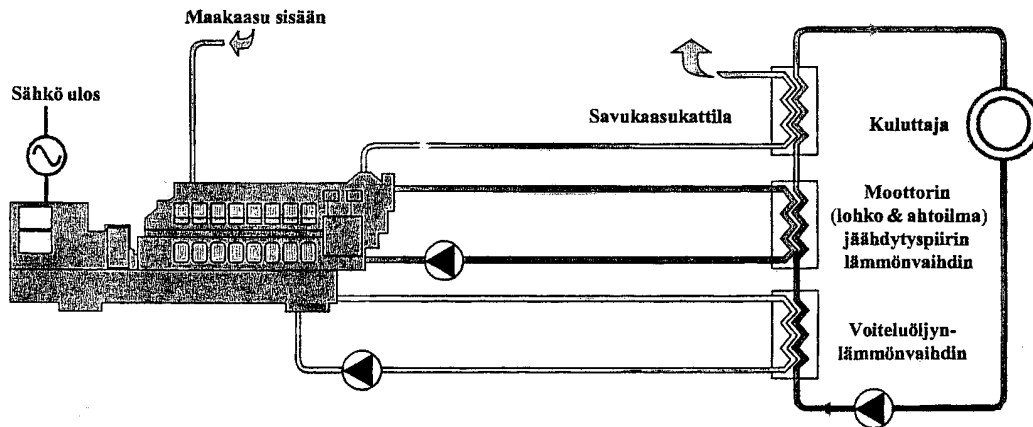
### **Esimerkki: Ikaalisten voimalaitos**

Ikaalisten Pure Energy voimalaitos on hyvä esimerkki Wärtsilä NSD:n ratkaisuista yhdistettyyn sähkön ja lämmön tuotantoon. Asiakkaina tässä uudessa voimalaitoksessa ovat Leppäkosken Sähkö Oy ja Neste Lämpö Oy. Ikaalisten voimalaitos tuottaa korkealla hyötysuhteella kaukolämpöä Ikaalisten kaupunkiin ja vedenalaisen putken avulla myös Ikaalisten kylpylään. Sähkö puolestaan ohjataan valtakunnanverkkoon. Ikaalisten voimalaitos on ensimmäinen Pure Energy voimalaitos Suomessa, jonka kaasumoottori on valmistettu kotimaassa. Laitoksen kotimaisuusaste on lähes 90 %.

Voimalaitoksen tuottama sähköteho on 5,5 MW ja lämpöteho 6,2 MW. Laitoksen kokonaishyötysuhde on 89 % (sähkö 42 % ja lämpö 47 %) kun kaukolämpöverkon paluuvesi on 50 °C ja menovesi 85 °C. Automaatitaso on Ikaalisten voimalaitoksessa erittäin korkea. Laitosta voidaan ajaa joko laitoksessa sijaitsevasta kontrollihuoneesta tai kaukokäytettynä Leppäkosken Sähkön keskusvalvomosta. Kaukolämpöverkon toimintaa voidaan seurata myös Neste Lämmön keskusvalvomossa Espoossa ja Wärtsilä NSD tehtaalla Vaasassa.

Kattava raportointijärjestelmä tekee päivittäiset raportit koko laitosprosessista. Se mahdollistaa eri parametrien, esimerkiksi energian kulutuksen ja tuotannon seurannan eri aikaväleillä.

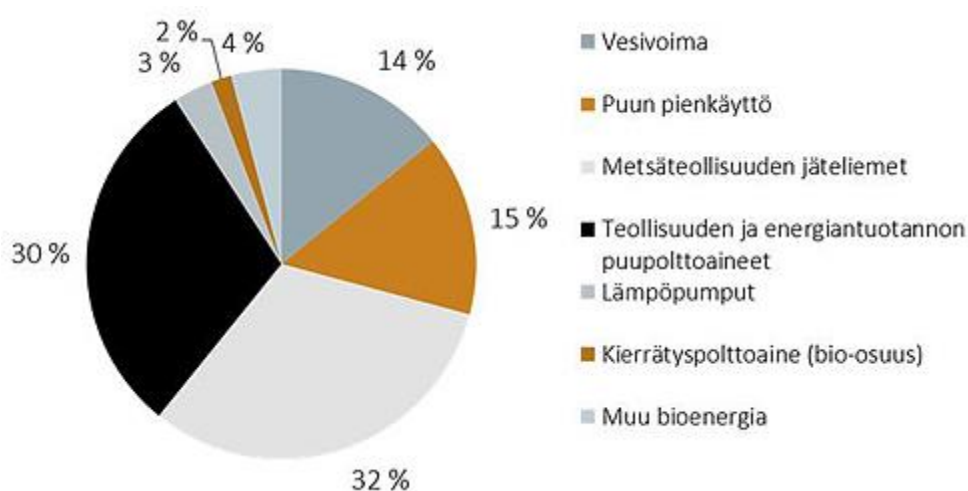
Uusi voimalaitos rakennettiin vanhan lämpölaitoksen yhteyteen. Ulkoinen melu on minimoitu määräysten mukaiseksi, ja Pure Energy voimalaitoksen erittäin alhaiset päästöt pienentävät huomattavasti paikallisia rikki- ja hiilidioksidipäästöjä.



*Kuva 9.16.* Ikaalisten Pure Energy voimalaitos. Kaasumoottorin kytkeminen kaukolämmön tuotantoon. Tämä Otto-prosessia käyttävä moottori on maakaasukäyttöinen ja kipinäsytytteinen. Wärtsilä NSD.

## 10 UUSIUTUVA ENERGIA

Termi uusiutuva energia yhdistää monia energiantuotantomuotoja. Ne voivat poiketa toisistaan merkittävästi, mutta yhteisenä tekijänä niissä pidetään sitä, että tuotantoa voidaan ylläpitää jatkuvien luonnollisten prosessien avulla. Näitä ovat esimerkiksi tuuli, auringon säteily, ja biomassan kasvu. Lisäksi uusiutuviin energianlähteisiin voidaan lukea ennen kaikkea vesivoima ja myös viime aikoina kasvussa ollut geotermisen energia hyödyntäminen. Tässä kappaleessa keskitytään tuuli- ja aurinkovoimaan sekä biomassaan perustuvaan energiantuotantoon. Seuraavassa kuvassa on esitetty uusiutuvan energian muotojen osuudet Suomen uusiutuvan energian kokonaiskäytöstä vuonna 2012.



Uusiutuvan energian muotojen osuudet Suomen uusiutuvan energian kokonaiskäytöstä vuonna 2012.

Suomessa biomassojen osuus uusiutuvista on suuri ja esimerkiksi tuuli- ja aurinkoenergian osuus on varsin pieni. Tärkeimpänä yksittäisenä kotimaisen bioenergianlähteenä voidaan pitää mustalipeää. Koko maailman mittakaavassa tuuli- ja aurinkoenergia ovat kuitenkin olleet voimakkaassa kasvussa ja niiden tuotantomäärien on arvioitu kasvavan rajusti.

Tuulivoimalat ja aurinkokennot ovat kohtuullisen vanhoja keksintöjä, mutta niiden käyttö sähköenergiantuotannossa on lisääntynyt vasta viime vuosina uusiutuvan energian tarpeen kasvun myötä. Energiantuotanto polttoainein höyryvoima-, moottori- tai turbiinilaitoksissa on sen sijaan perinteisempää energiantuotantoteknologiaa. Puun energiakäyttö on niin ikään tavallista, mutta nyt sen käyttöä on ryhdytty tehostamaan lisäämällä tuotantomääriä ja kehittämällä uusia teknologioita erityisesti sähkön-tuotannon hyötysuhteen kasvattamiseksi.

Biokaasua on myös osattu valmistaa jo pitkään, mutta toiminnan kokonaisedut, ympäristöystävällisempi jätteen käsittely yhdistettynä uusiutuvan energiantuotantoon on laajemmalla mittakaavassa havaittu vasta viime vuosina. Tuuli- ja aurinkoenergian kiistatonta etuna on, että energiamuunnoksia on molemmissa prosesseissa vähän. Biomassa- ja biokaasuenergian etuina taas ovat, että energiaa voidaan tuottaa tasaisesti ja käytettävän polttoaineen energiasisältö tulee hyödynnettyä tehokkaasti. Sähkön ja lämmön yhteistuotannolla prosessin hyötysuhde saadaan korkeaksi.

## 10.1 Aurinkoenergia

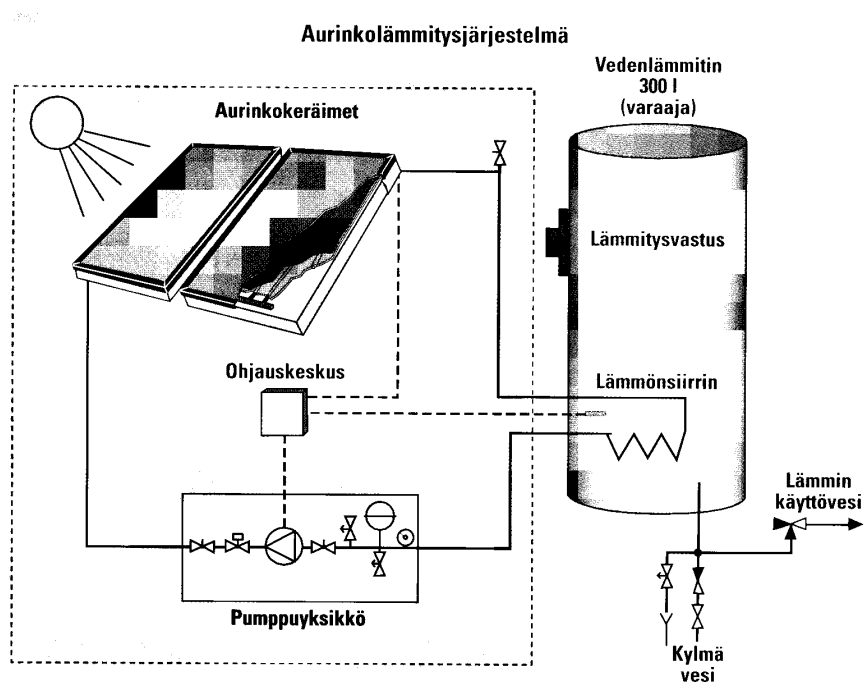
Auringosta maahan osuvan säteily määrän teho on noin 170 PW, eli noin 50 000 kertaa maailman sähköntuotannon asennettu teho tällä hetkellä. Tehotiheys on kuitenkin pieni ja yhteen neliometriin osuu kirkkaana päivänä enintään noin 1 kW. Laajamittaiset sovellukset vaativat siksi melko laajat alueet.

Aurinkoenergiasovellutukset jaetaan yleensä lämpöä ja sähköä tuottaviksi. Auringon säteily voidaan muuttaa suoraan sähköksi valosähköisen ilmiön perusteella toimivissa aurinkokennoissa. Aurinkosähköä on myös tuotettu termisissä aurinkovoimaloissa, joissa laaja kenttä on peitetty auringon säteilyä voimakkaasti keskittävillä peileillä. Säteily suunnataan yhteiseen polttopisteeseen ja syntyvällä lämmöllä tuotetaan höyryä höyryturbiiniin.

Lämpöä voidaan hyödyntää joko passiivisesti tai aktiivisesti. Passiivisesti aurinkolämpöä hyödynnetään sitomalla se suoraan rakennuksiin niiden erityisillä sijoituksilla, suuntauksilla ja rakenteellisilla ratkaisuilla. Aktiivisesti lämpöä kerätään erityisillä keräimillä tai varastoimalla ylimääräistä lämpöä vuorokausi- tai kausivarastoihin.

Aurinkolämmityksessä lämpö otetaan lämmityslaitteistoon suoraan auringon säteilystä joko talokohtaisesti tai aluelämmitysjärjestelmässä. Lämpö kerätään tehokkailla aurinkokeräimillä joko nesteeseen tai ilmaan ja siirretään putken kautta varaajan. Energian tuotto on riippuvainen keräinten ja varaajan mitoituksesta sekä kulutustottumuksista.

Yleisin käytetty lämpökeräin on nestekiertoinen tasokeräin. Siinä aurinkosäteily lämmittelee mustaa absorptiolevyä, joka on pinnoitettu selektiivisellä pinnoitteella ja katettu selektiivisellä lasilla. Lämmönsiirtoaineena käytetään ympärivuotisessa sovellutuksessa vesi-glykoliseosta. Suomessa voidaan neliometriä kohden vuodessa tuottaa 25-asteista lämmintä vettä 400-600 kWh tai 50-asteista vettä 150-350 kWh. Yleisesti voidaan sanoa, että omakotitalossa puolet vuotuisesta lämpimän veden käytöstä saadaan 5-8 m<sup>2</sup>:n keräinpinta-alalla. Jos halutaan lämmittää myös huonetilaa, tarvitaan 10-12 m<sup>2</sup>.

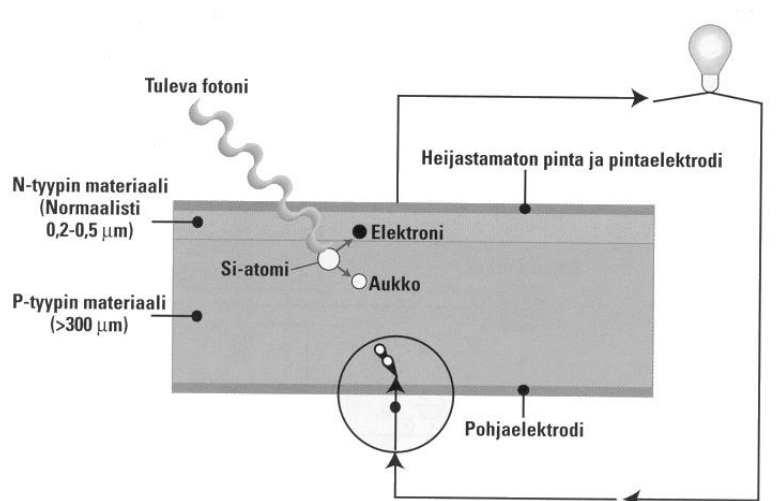


Kuva 10.1. Nestekiertoinen tasokeräin ja lämminvesijärjestelmä.

Lisäksi auringon energiaa voidaan sitoa myös valokemiallisissa reaktioissa, joilla voidaan tuottaa joko ns. aurinkopolttoaineita, kuten vetyä hajottamalla vettä, tai eräitä kemikaaleja muista aineista. Valokemiallisilla reaktioilla voidaan myös tuottaa sähköä.

Aurinkokenno on suuriläpimittainen diodi. Sen toiminta perustuu puolijohderajapintaan, joka on saatu aikaan rungon ja etupinnan erilaisella seostuksella. Kun auringon valo osuu kennoon, se irrottaa rungon atomeista elektroneja, joista osa hakeutuu rajapinnan sähkökenttään, joka puolestaan vetää ne kennon etupintaan. Elektronin tilalle jää positiivinen aukko. Kun kennon etu- ja takapinnat yhdistetään ulkoiseen kuormitukseen, vaeltavat elektronit kennon etupinnasta kuormituksen kautta takapintaan ja asettuvat vapaisiin elektroniaukkoihin, ja näin auringon valo on saanut aikaan sähkövirran.





Kuva 10.2. Aurinkokennon toimintaperiaate.

Puolijohdetekniikan nopean kehittymisen ansiosta myös aurinkokennot ovat kehittyneet nopeasti. Yleisin kennomateriaali on pii, joka on yksikiteisenä, monikiteisenä tai amorfisena. Yksikiteisen piiaurinkokennon teoreettinen hyötysuhde on noin 30 %, ja parhaimmillaan sellaisella kennolla on päästy laboratorio-olosuhteissa huomattavasti yli 20 %:n hyötysuhteeseen. Kehitystoiminta on hyvin vilkasta, ja uusia innovaatioita sekä hyötysuhde-ennätyksiä tehdään jatkuvasti. Piin lisäksi käytetään muita materiaaleja. Teollinen kehitystyö on suunnattu ohutkalvotekniikkaan, joka vaatii huomattavasti vähemmän raaka-ainetta kuin kiteisestä piistä valmistetut kennot. Ohutkalvotekniikka on myös helpommin sovellettavissa massatuotantoon.

Aurinkosähkö on kilpailukykyinen vain eräissä erityissovellutuksissa. Aurinkokennoja käytetään tyypillisesti paitsi kesämökeillä, myös kaukana ja hankalien kuljetusyhteyksien päässä olevissa teknisissä järjestelmissä esimerkiksi tietoliikenteen linkkiasemilla ja ma-jakoissa.

Laajamittainen sähköntuotanto aurinkokennoilla vaatisi suuren pinta-alan. Kustannustehokkaimpia ovat sen sijaan paikalliset sovellutukset, joissa kennot voidaan yhdistää muihin rakenteisiin kuten kattoihin, ulkoseiniin ja erilaisiin suoja- ja meluvalleihin. Esimerkiksi Saksassa on jo toteutettu lukuisia tällaisia järjestelmiä. Nämä kuitenkin vaativat vielä pitkään yhteiskunnan taloudellista tukea ollakseen kannattavia.

## 10.2 Tuulienergia

Tuulivoimala muuttaa tuulen liike-energian mekaaniseksi pyörimisliikkeeksi ja siitä edelleen sähköksi. Tuulta kerätään roottorin avulla, jossa on kaksi tai kolme aerodynaamisesti muotoiltua lapaa. Ilman virtaus lavan ympärillä saa aikaan nostevoiman, joka pyörittää roottoria. Maksimaalinen teho saadaan, kun tuulen nopeus laskee kolmasosaan tuulen

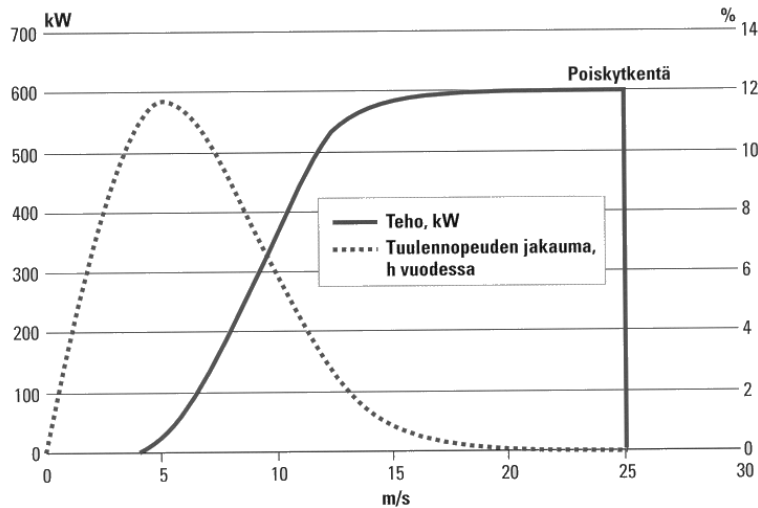
kulkiessa siipiprofiilin ohi. Teoriassa roottori pystyy hyödyntämään tuulen liike-energiasta tällöin noin 60 %, mutta käytännössä roottorin hyötysuhde jää 50 %:iin. Tuulivoiman taloudellinen hyödyntäminen perustuu laajan pyyhkäisypinta-alan peittämiseen pienin materiaalikustannuksin. Vallitsevaksi ratkaisuksi on muodostunut vaaka-akselinen rakenne, missä roottori pyörii potkurina pystytasossa.



Kuva 10.3. Tyypillinen tuulipuisto Suomen rannikolta.

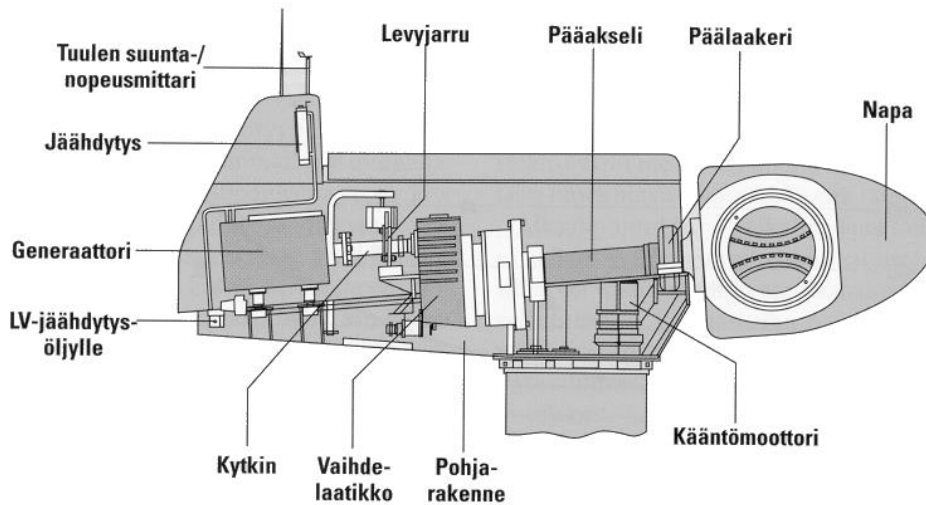
Nykyään tuulivoimalat ovat yleisimmin nimellisteholtaan 500-750 kW, mutta suurempien, 1 000-1 650 kW:n laitosten markkinaosuus on voimakkaassa kasvussa. 600 kW:n voimalassa on tyypillisesti noin 45 m:n roottorihalkaisija ja 40 m korkea torni, 1,5 MW:n voimalassa 65 m:n roottorihalkaisija ja 60 m:n torni.

Tuulivoimalaitos vaatii käynnistyäkseen yleensä noin 3-5 m/s:n tuulennopeuden, minkä jälkeen tehontuotto kasvaa nopeasti tuulen voimistuessa. Kun tuulennopeus on yli 25 m/s, laitos pysähtyy automaattisesti ylisuurten tehojen ja laiterikkojen estämiseksi. Tuulen ollessa noin 15-25 m/s tehoa rajoitetaan joko passiivisella sakkaussäädöllä, jolloin lapakulma on kiinteä, tai aktiivisella lapakulman säädöllä. Siten tuulivoiman nk. tehokäyrä muodostuu kuvan 9.4 mukaan, riippuen tehonsäätöperiaatteesta. Tehokäyrän ja tuulen nopeusjakauman perusteella voidaan voimalan energiantuotanto laskea.



Kuva 10.4. Esimerkki tuulivoimalan tehokäyrästä sekä tuulen nopeuden jakauma kohteessa, jossa keskinopeus on 6,5 m/s. Tämä tuulivoimala tuottaisi tällä paikalla 1,3 GWh vuodessa.

Roottorin ja tornin lisäksi voimalan pääkomponentteja ovat konehuoneessa sijaitseva voimansiirtojärjestelmä, johon yleensä generaattorin lisäksi kuuluu ylennysvaihte, sekä ohjaus- ja säätöjärjestelmä, joka kääntää roottoria tuulen suunnan mukaan.



Kuva 10.5. Tuulivoimalaitoksen pääkomponentit.

Roottorin kierrosnopeus vaihtelee halkaisijan mukaan ja on yli 1 MW:n voimalaitoksessa noin 20-30 kierrosta minuutissa ja 600 kW:n voimalassa 30-40 kierrosta minuutissa. Koska tavallinen neljä- tai kuusinapainen generaattori pyörii 1000 tai 1500 kierrosta minuutissa, asetetaan vaihdelaatikkolle suuret vaatimukset.

Tavallisimmin käytetään vakionopeuksista epätahtigeneraattoria, joka saa magnetointinsa sähköverkosta. Synkronigeneraattoreita käytetään lähinnä ratkaisuihin, joita ei kytketä verkkoon. Vaihtelevalla ja hitaalla kierrosnopeudella toimivat ratkaisut ovat tulleet markkinoille ja kilpailevat tasaväkisesti epätahtigeneraattoreiden kanssa. Vaihtelevasta kierrosnopeudesta saatavat edut ovat hiukan suurempi energiantuotanto, pienemmät kuormitukset, helpommin hallittavissa oleva sähkön laatu sekä mahdollisuus toimia alhaisella kierrosnopeudella ja siten ilman ylennysvaihdetta. Haittapuolena ovat lähinnä suuret kustannukset ja erikoiskomponenttien tarve.

Tuulivoimalat rakennetaan yleensä ryhmissä ns. tuulipuistoiksi, joissa on jopa useita kymmeniä voimaloita. Suurimmat tuulipuistot Euroopassa ovat teholtaan n. 60 MW ja maailmassa yli 100 MW. Voimalat kytketään sähköverkkoon muuntoaseman kautta. Puistossa on joko yksi tai useampi muuntoasema, puiston ja yksittäisten laitosten koosta riippuen.

Modernit tuulivoimalaitokset ovat teknisesti erittäin luotettavia. Niiden tekninen käytettävyys (aika, jonka laitos on toimintakunnossa) on yli 95 %, parhaimmillaan 98-99 %. Laitokset ovat täysin automatisoituja ja kauko-ohjattuja. Tyypillisesti tarvitaan ainoastaan kaksi lyhyttä huoltokäyntiä vuodessa sekä vikatilanteista aiheutuvia korjauskäyntejä keskimäärin 2-4 kertaa vuodessa.

Laitosten taloudellinen käyttöikä on 20-25 vuotta. Osa komponenteista (perustus, torni, konepeti) voi periaatteessa kestää huomattavasti pidempään, osa pääkomponenteista (vaihte, generaattori, lavat) on ehkä uusittava kerran 20 vuoden aikana. Pienemmistä osista monet ovat kuluvia osia, eli niitä vaihdetaan 2-5 vuoden välein. 20-25 vuoden taloudellinen käyttöikä merkitsee, että tämän jälkeen korjauskustannukset todennäköisesti kasvavat niin korkeiksi, ettei laitoksen käyttö enää kannata.

Tuulivoimaa oli vuoden 1997 loppuun mennessä maailmassa rakennettu yli 7200 MW, josta 4 000 MW Euroopassa. Eniten on rakennettu Saksassa, Yhdysvalloissa, Tanskassa ja Intiassa. Vuotuinen kasvuvauhti on viime vuosina ollut noin 1500 MW/a. Suomessa oli tuulivoimaa v. 2000 noin 50 MW ja sen arvioidaan kymmenkertaistuvan vuoteen 2010 mennessä.

Valtaosa tuulivoimaloista valmistetaan Tanskassa ja Saksassa. Tavallisimmin voimalat kootaan standardikomponenteista, joita tietyillä määrittelyillä valmistetaan muissa tehtaissa. Näitä ovat mm. vaihteisto, generaattori ja voimalan suuntaukseen käytettävät kääntömootorit. Erikoisosaamistakin on kehitetty. Esimerkiksi lavat tehdään niihin erikoistuneissa tehtaissa, ja jotkut valmistajat ovat itse kehittäneet vaihtelevalla kierrosluvulla toimivat voimalansa sekä tehoelektroniikkaa.

Suomessa ei vielä valmisteta merkittävästi tuulivoimaloita, mutta Suomen teollisuudella on kuitenkin vankka sija vaihdelaatikoiden ja generaattoreiden sekä eräiden materiaalien toimittajina. Suomessa on myös kehitetty erityistä tekniikkaa, jonka turvin tuulivoimala pystyy toimimaan hyvinkin kylmissä ja jäätyvissä olosuhteissa.

Tuulivoiman tuotanto on tietysti vaihtelevaa, johtuen tuulen satunnaisvaihteluista. Tämä rajoittaa sen laajamittaista käyttöä. Mikään energiajärjestelmä ei tule toimeen pelkällä tuulivoimalla. Valtakunnan verkossa toimiessaan tuulivoima täydentää muuta sähköntuotantoa, ja muu sähköntuotanto tasaa tuulivoimatuotannon ja kulutuksen eriaikaisuudet. Yleensä oletetaan, että satunnaisella tuotannolla voidaan kattaa ainakin 10 % sähkön kulutuksesta ilman huomattavia lisäinvestointeja vara- ja säätötehotuotantoon.

Vaikka tuulivoimatekniikka on kehittynyt ja halventunut huomattavasti viime vuosien aikana, vaaditaan silti kustannussäästöjä ennen kuin se tasaväkisesti kilpailee konventionaalisen sähköntuotantoon kanssa. Suurimmat kustannussäästöt saadaan vähentämällä voimalan massaa, etenkin roottorista ja tukirakenteesta. Tämä vaatii kehittyntä ohjaus- ja säätöjärjestelmää sekä osittain uusia kevyempiä materiaaleja.

Tuulivoimalan valmistuksessa on joitakin hyvin työvoimavaltaisia vaiheita. Tämä koskee eteenkin lapojen ja moninapageneraattoreiden valmistusta. Kehittyneillä valmistusmenetelmillä voidaan pudottaa kustannuksia huomattavasti, mutta se vaatii osaltaan yhä kasvavia tuotantovolyyumeja sekä pitkälle vietyä standardointia.

Toinen tapa pienentää tuotetun energian hintaa on parantaa tuulivoiman ominaistuotantoa. Teknisellä kehitystyöllä voidaan vielä saavuttaa hieman, mutta tuskin kovin merkittävästi, korkeampi hyötysuhde. Suurempi tuotanto saavutetaan siirtymällä alueille, joissa tuuliolosuhteet ovat paremmat. Tällaisia ovat etenkin merisijoitukset, mutta myös eräät vuoristot ja tunturialueet. Offshore-sijoituksia varten tarvitaan varsin laajat tuulipuistot sekä erityinen perustus- ja kuljetustekniikka. Jäätyminen asettaa erityisiä vaatimuksia voimaloille vuoristoissa ja esim. Pohjois-Suomen kylmissä olosuhteissa.

Tuuliturbiinin teoreettinen teho voidaan laskea kaavasta

$$P_{teor} = A\rho w^3 \quad (10.1)$$

missä

$$A = \text{pinta-ala} = \frac{\pi d^2}{4} \quad (10.2)$$

$$\rho = \text{ilman tiheys} \quad (10.3)$$

$w$  = tuulen nopeus

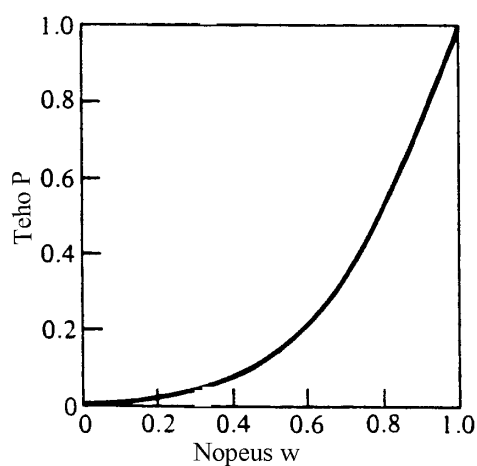
Todellinen teho saadaan kertomalla hyötysuhteella

$$P_{tod} = \eta P_{teor} \quad (10.4)$$

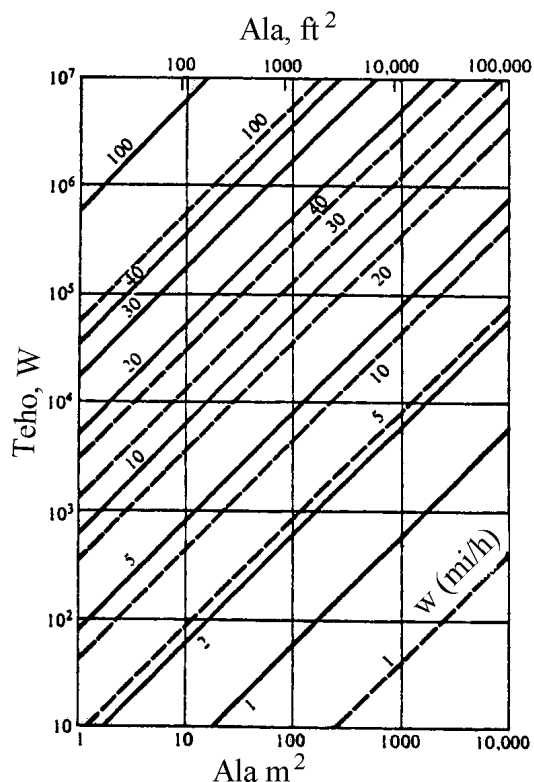
jossa  $\eta = 0,5 \dots 0,7$ .

Tuuliturbiinin ongelmana on tehon pysyvyyskäyrän muoto ( $P \sim w^3$ ). Tästä syystä rakenteet joudutaan ylimitoittamaan huomattavasti.

Suomessa tuulivoimalan tuottama vuotuinen sähkömäärä on parhailta tuulialueilla maalla huipputehon käyttöaikana lausuttuna noin 25 % ja merialueilla jopa yli 30 %.



Kuva 10.6. Tuuliturbiinin tehon pysyvyyskäyrä.



Kuva 10.7. Tuulivoimalan tehon riippuvuus alasta.

### 10.3 Bioenergia

Bioenergian lähteitä ovat metsäbiomassat kuten puupolttoaineet ja hakkuutähteet, pelto-biomassat kuten ruokohelmi, ohra ja sadonkorjuujäte, nurmimassat ja rehujäte, paperi- ja puunjalostusteollisuuden jätteet kuten hake ja jäteliemet, elintarviketuotannon jätteet kuten teurasjäte ja lanta, sekä asumisessa jätteeksi päätyneet biohajoavat tuotteet kuten paperi, kuitu- ja puupakkaukset ja elintarvikkeet.

Bioenergiaa on yleisesti pidetty hiilidioksidineutraalia, jos bioenergiaa hyödynnetään kestäväällä tavalla. Kasvien varastoima hiilidioksidi vapautuu bioenergiaa hyödynnettäessä, mutta uusien kasvien kasvaessa hiilidioksidi jälleen sitoutuu biomassaan fotosynteesissä. Energiantuotannossa bioenergiaa voidaan hyödyntää suorassa poltossa biomassana tai kaasutettuna biomassana, biokaasuna sekä nestemäisinä tai kaasumaisina liikennepolttoaineina.

Biomassan ja biokaasun yhdisteisiin kemialliseen muotoon sitoutunut energia voidaan vapauttaa polttoprosessissa lämpöenergiaksi. Lämpöenergia voidaan edelleen hyödyntää sellaisenaan tai jalostaa sähkö- tai mekaaniseksi energiaksi. Polttamalla biomassaa lauhdevoimalaitoksissa voidaan tuottaa höyryvoimaprosessiin perustuen pelkkää sähköä. Hyötysuhteen kasvattamiseksi voimalat voidaan rakentaa yhteistuotantolaitoksiksi eli

CHP-laitoksiksi (Combined Heat and Power), jotka tuottavat sekä sähköä että lämpöä. Lämmön sijaan laitokset voivat myös tuottaa teollisuushöyryä teollisuuden tarpeisiin. Energiantuotannon kokonaishyötysuhde voidaan saada CHP-laitoksessa todella korkeaksi, jopa 90 %:iin.

Bioenergian-tuotantoon liittyvät energiantuotantoprosessit itsessään ovat hyvin perinteistä teknologiaa, jota on hyödynnetty jo pitkään ja laajamittaisesti energiantuotannossa fossiilisin polttoainein. Uutta onkin kasvava uusiutuvien energialähteiden käyttö prosessien polttoaineina, niihin liittyvät lisäämistavoitteet ja lisäämiseen ohjaavat keinot.

Biomassapolttoaine voi koostua useista erilaisista raaka-aineista. Yleensä polttoaine on kosteudeltaan ja palakooltaan hyvin vaihtelevaalaatuista. Biomassan polton ympäristöystävällisyyden takaamiseksi polttoaineen poltolla on tärkeä rooli. Polttoaineen täydellinen palaminen suotuisissa olosuhteissa on vähäpäästöisen energiantuotannon edellytys. Epätäydellisessä palamisessa suurimpina riskeinä ovat hiukkas- ja hiilimonoksidipäästöjen syntyminen.

Biopolttoaineiden laadun vaihtelevuuden ja ympäristöystävällisyysvaatimuksen johdosta biopolttoaineiden poltto vaatii myös polttoprosessilta tasalaatuista polttoainetta enemmän ja on haasteellisempaa. Biomassan poltossa polttotekniikoina käytetään yleensä arinapolttoja sekä leijupolttia. Arinapoltto on perinteistä polttotekniikkaa ja sitä käytetään yleisimmin polttoaineteholtaan alle 10 MW:n laitoksissa.

Arinapoltto koostuu kolmesta kriittisestä osakokonaisuudesta, jotka takaavat, että poltto tapahtuu mahdollisimman tehokkaasti ja vähäpäästöisesti. Nämä osakokonaisuudet ovat anna, polttoaineen syöttöjärjestelmä ja palamisilman syöttöjärjestelmä. Polttoaineen syöttöjärjestelmä syöttää polttoaineen arinalle koko annan leveydeltä, mahdollisimman tasaisena kerroksen, jotta koko massan palaminen tapahtuu tasaisesti. Palamisilma syötetään yleensä kahdessa tai mahdollisesti kolmessa vaiheessa, joista ensimmäinen vaihe eli primääri-ilma syötetään arinan alta, polttoaineen täydellisen palamisen takaamiseksi.

Sekundaari- ja mahdollinen tertiääri-ilma syötetään annan päältä ja niiden avulla poltetaan polttoainekerroksesta haihtuneet palamiskelpoiset kaasut. Arina voi olla kiinteä viisto- tai tasoarina, mekaaninen, pyörivä tai kekoarina mutta heterogeeniset ja erikoislaatuiset polttoaineet vaativat yleensä mekaanisen annan. Käytettävistä raaka-aineista ja niiden käsittelymenetelmistä riippuen biomassapolttoaineet voivat olla laadultaan hyvinkin heterogeenisiä, jolloin ne usein vaativat mekaanisen annan. Leijupetipoltto mahdollistaa polttoaineen tasaisen palamisen pedin suuren ominaislämpökapasiteetin ja polttoaineen hyvän sekoittuvuuden myötä. Tästä johtuen polttoaineessa voi olla suuriakin palakoon ja kosteuspitoisuuden vaihteluja.



### 10.3.1 Metsäteollisuuden sivutuotteet ja kierrätyspuu

Suomen metsäteollisuudessa syntyy monenlaisia energiaksi hyödynnettäviä jakeita, joista merkittävimpiä ovat mustalipeä, kuori, erilaiset purut ja puutähdehakkeet. Nämä jakeet ovat kattaneet suurimman osan 2000-luvulla Suomessa tuotetusta puuenergiasta, joka on vuosittain ollut noin viidennes koko energiankulutuksesta.

Mustalipeä on kemiallisen massanvalmistusprosessin sivutuote, joka sisältää pääasiassa puusta peräisin olevaa ligniiniä ja keittolipeää. Mustalipeästä haihdutetaan vettä, minkä jälkeen se poltetaan soodakattilassa. Kemiallisen metsäteollisuuden jäteliemien poltto on tuottanut viime vuosina noin puolet puupolttoaineilla saadusta vuotuisesta energiamäärästä.

Loput puuperäiset jakeet ovat kemiallisen ja mekaanisen metsäteollisuuden kiinteitä sivutuotteita. Kuorintatähdettä eli kuorta ja erilaisia puruja, lastuja sekä hiontapölyä syntyy erityisesti sahoilla. Niitä voidaan tuotteesta riippuen käyttää polttoaineena sellaisenaan tai jalostettuina hakkeeksi, pelleteiksi tai briketeiksi.

Kuori on perinteisesti hyödynnetty kokonaan energiantuotannossa, mutta sitä käytetään myös esimerkiksi maanparannusaineena. Puun kuorta häviää jopa useita prosentteja korjuussa, kuljetuksissa ja varastoinnissa, joten kaikkea ei saada hyödynnettyä bioenergiana.

Sahauksesta syntyvään sivutuotemäärään vaikuttavat muun muassa raaka-aineen koko ja laatu sekä sahan kokoluokka. Purulla on sahojen sivutuotteista korkein lämpöarvo, kuorella matalin. Näiden sivutuotteiden kosteuspitoisuus on tuoreena korkea. Ennen polttoa kuoriaineksesta poistetaan tarvittaessa vettä puristamalla ja lisäksi kuoriaines murskaataan. Energiana hyödynnettäviä sivutuotteita syntyy myös sahatavaran jatkojalostuksessa sekä vaneriteollisuudessa.

Biomassoista tuotetun energian määrä on suoraan yhteydessä metsäteollisuudessa käytettyihin raaka-aineisiin ja tuotantomääriin. Valtaosa puunjalostuksen lopputuotteista hyödynnetään metsäteollisuuden omassa käytössä lämmön- ja sähköntuotantoon. Vaikka metsäteollisuus käyttää itse suurimman osan puupohjaisista energialähteistä, osa niistä toimitetaan myös alueellisille energialaitoksille ja kiinteistöjen polttoaineiksi.

Puutuotteita myös kierrätetään käytettäväksi energiantuotannossa. Kierrätyksen kautta hyödynnetään muun muassa pakkausmateriaalia ja rakennusjätettä. Kierrätyspuun osuus lämpö- ja voimalaitosten puuperäisestä raaka-aineesta on viime vuosina ollut noin 4 prosenttia.

### 10.3.2 Biokaasu

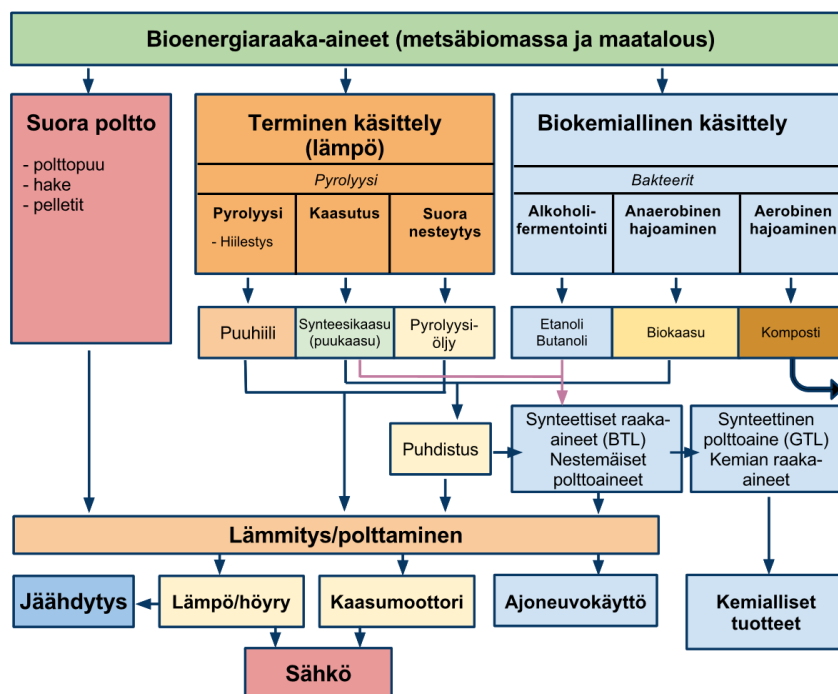
Biokaasu on kaasua, jota muodostuu biomassasta orgaanisen aineksen hajotessa hapettomissa olosuhteissa. Tätä kutsutaan myös mädäntymiseksi. Biokaasu sisältää tavallisesti

noin 40-70 % metaania ja 30-60 % hiilidioksidia sekä pieniä määriä rikkiyhdisteitä. Fossiilinen vastine biokaasulle on myös metaania sisältävä maakaasu. Maakaasu on kuitenkin uusiutumaton fossiilinen polttoaine, jota on syntynyt aikojen saatossa maan uuneissa.

Maakaasua tuotetaan öljynporauksen yhteydessä ja sen polttaminen vapauttaa ilmakehään luonnollisesta kierrosta jo poistunutta hiilidioksidia. Biokaasua valmistetaan sen sijaan orgaanisia yhdisteitä sisältävistä raaka-aineista, kuten kasveista. Biokaasun polttaminen lisää ilmakehän hiilidioksidimäärää hetkellisesti. Toisaalta kasvit uusiutuvat nopeasti ja yhteyttäessään sitovat ilmakehän hiilidioksidia näin edesauttaen hiilen luonnollista kiertokulkua. Biokaasun tuottamisesta jää lisäksi jäljelle erittäin korkean ravinnepitoisuuden sisältävää ainesta, joka voidaan palauttaa luontoon tehokkaana lannoitteena ja näin ylläpitää maaperän ravinnepitoisuutta.

Suuria määriä biokaasua syntyy jatkuvasti itsestään teollisuuden ja yhdyskuntien orgaanisesta jätteestä ja jätöksistä esimerkiksi kaatopaikoilla sekä maatilojen ja jätevedenpuhdistamoiden lietesäiliöissä. Luonnossa sitä syntyy muun muassa kosteikoilla, kuten soilla sekä vesistöjen pohjakerroksissa. Suomessa kaatopaikoilla biokaasun kerääminen on nykyään pakollista, jotta metaanin pääsy ilmakehään saataisiin estettyä. Biokaasua valmistetaan hallitusti bioreaktoreissa.

Seuraavassa kuvassa on esitetty metsäbiomassasta ja maataloudesta saatavien biomassojen jatkojalostusmahdollisuuksia.



Kuva 10.7. Metsäbiomassasta ja maataloudesta saatavien biomassojen jatkojalostusmahdollisuuksia.

# 11 ENERGIA TUOTANNOSTA SYNTYVÄT IL- MANSAASTEET JA NIIDEN YMPÄRISTÖVAI- KUTUKSET

Energiantuotannosta ja -siirrosta aiheutuu nykyään merkittäviä ympäristövaikutuksia. Niitä syntyy energian tuotantoketjun kaikissa vaiheissa eli polttoaineiden hankinnassa, jalostuksessa, varastoinnissa ja kuljetuksessa, varsinaisessa energian tuotantoprosessissa sekä jätteiden käsittelyssä. Nykyään merkittävimpiä ympäristövaikutuksia ovat ilmastonmuutos, happamoituminen, vesistöihin kohdistuvat vaikutukset ja jätteiden syntyminen.

Tässä kappaleessa keskitytään happamoitumista aiheuttaviin rikki- ja typpipäästöihin, sekä pienhiukkasiin. Näiden lisäksi merkittäviä päästöjä ovat esimerkiksi ilmastonmuutokseen vaikuttavat kasvihuonepäästöt ja ydinvoimaloiden toiminnasta syntyvä ydinjäte. Nämä ovat kuitenkin omia asiakokonaisuuksia, joita ei tässä yhteydessä käsitellä.

## 11.1 Rikki- ja typpipäästöt

Rikkidioksidipäästöjen sisältämä rikki on peräisin polttoaineen sisältämästä rikistä ja teollisuuden tapauksessa raaka-aineiden ja lisäksi prosessikemikaalien sisältämästä rikistä. Tärkeimmät rikkidioksidipäästöjä aiheuttavat polttoaineet ovat kivihiihi, raskas polttoöljy ja turve. Suurin osa alkuperäisestä polttoon tai prosesseihin menevästä rikistä siirtyy savukaasuun ja pieni osa jää poltossa syntyvään tuhkaan.

Typen oksidien muodostuminen riippuu puolestaan vain osittain käytetystä polttoaineesta. Pääosin typpipäästöt riippuvat käytettävästä polttotekniikasta. Merkittäviä päästölähteitä ovat hiili-, turve ja sekapolttokattilat. Suurin osa typpioksideista on kuitenkin peräisin liikenteestä. Happamoitaviin typpiyhdisteisiin luetaan myös ammoniakki, josta suurin osa tulee maataloudesta.

Typen oksideja ( $\text{NO}_x$ ) syntyy palamisprosesseissa. Typen oksidit aiheuttavat sekä happamoitumista, rehevöitymistä että otsoninmuodostusta. Samoin pääosin maataloudesta peräisin olevilla ammoniakkipäästöillä ( $\text{NH}_3$ ) on sekä happamoittava että rehevöittävä vaikutus. Sekä Suomessa että koko Euroopassa kaikkein merkittävin yksittäinen typen oksidien lähde on liikenne. Typenoksidipäästöjen typpi on sekä polttoaineen sisältämää typpeä, että ilman typpeä, joka hapettuu polttoprosessissa. Typenoksidipäästöjen kehitys on ollut tasaisempaa kuin rikkipäästöjen. Suomen päästöt kasvoivat 1990-luvulle saakka, mutta ovat sen jälkeen kääntyneet loivaan laskuun. Katalysaattorien yleistymisen auto-kannassa vähentää liikenteen typen oksideja varsin tehokkaasti.

Typenoksidipäästöjen kiinteitä lähteitä ovat kattilat, uunit ja teollisuusprosessit. Niiden päästöjä voidaan rajoittaa muuttamalla polttoprosessia tai puhdistamalla savukaasuja.

Tärkeimpiä polttoprosesseihin soveltuvia menetelmiä ovat low-NOx -polttimien käyttö, palamisen vaiheistus yläilmalla, savukaasujen kierrätys sekä polttoaineen syötön vaiheistus. Tavoitteena on estää polttoprosessissa sellaisten palamisalueiden synty, joissa ilman ja polttoaineen tyyppisestä muodostuu typpioksidia, ja lisätä alueita, joissa tapahtuu typenoksidien pelkistymistä.

Rikki- ja typpioksideista aiheutuva laskeuma voi ylittää luonnon sietokyvyn eli ns. happamoitumisen kriittisen kuormituksen. Happamoitumisongelmaan havahduttiin 1970- ja 1980-luvuilla Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. Silloin havaittiin laajoilla alueilla metsätuhoja ja kalakantojen häviämistä. Suomen rikkipäästöt kasvoivat 1960-luvulla voimakkaasti ja olivat suurimmillaan 1970-luvulla. Vuoden 1980 jälkeen päästöt ovat laskeneet huomattavasti. Syynä ovat olleet energijärjestelmän rakenteelliset muutokset, polttoaineiden rikkipitoisuuden aleneminen ja suurimpien voimalaitosten rikinpoistolaitosten käyttöönotto sekä teollisuuden prosessipäästöjen väheneminen.

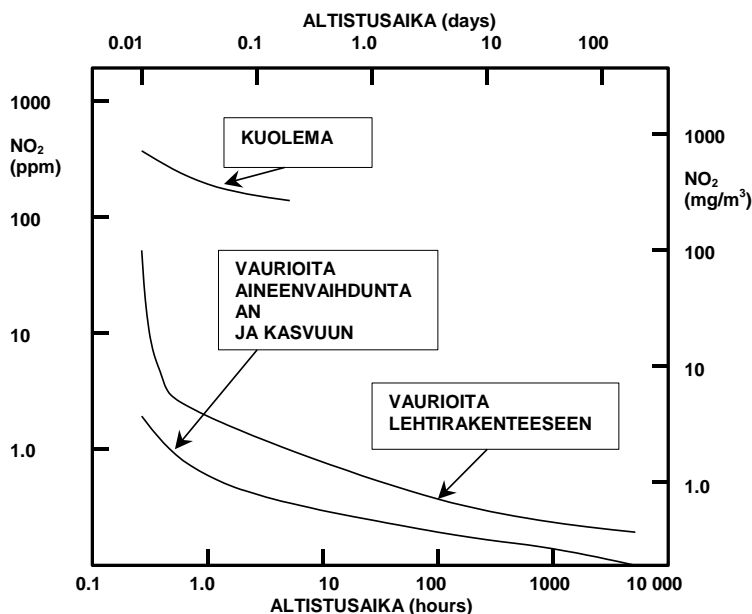
Happamoituminen tarkoittaa sitä, kun maaperän tai vesistöjen kyky vastustaa eli neutralisoida ilmasta tulevaa hapanta laskeumaa alkaa heikentyä. Happamoitumista aiheuttavat rikki- ja typpioksidit voivat kulkeutua satoja, jopa tuhansia kilometrejä. Happamoittavia yhdisteitä laskeutuu maan pinnalle sateen mukana märkälasseumana tai hiukkasissa ja kaasuihin kuivalasseumana.

Happamoittavien päästöjen aiheuttamien haitallisten vaikutusten arvioimiseksi erityyppisille maaperille ja vesistöille on määritelty niin sanotut kriittiset kuormitukset eli sellaiset haitallisten aineiden kriittiset laskeumat tai pitoisuudet, joiden alittaminen on päästöjen vähentämisen tavoitteena. Kriittisellä kuormituksella tarkoitetaan haitallisten aineiden laskeumaa, jonka erikseen määriteltävä ympäristön osa joutuu jatkuvasti sietämään. Happamoitumisen kriittinen kuormitus ylittyy eniten Keski-Euroopassa.

Happamoitumisesta koituu haittaa kasveille ja vesieliöille. Happamissa oloissa maaperästä liukenee kasveille ja eliöille myrkyllisiä alumiini- ja raskasmetalli-ioneja. Samalla kasveille ja eliöille tärkeitä ravinteita puolestaan huuhtoutuu pois. Happamoituminen voi muuttaa kasvi- ja eläinlajistoa. Pohjoisilla seuduilla sijaitsevat karut vesistöt ja metsämaat ovat herkimpiä happamoitumiselle. Näiden alueiden maaperässä ja kivilajeissa ei ole paljoa kalkkia kuten rehevempien alueiden maaperässä ja kivilajeissa usein on. Kalkki parantaa puskurikykyä ja ehkäisee happamoitumista. Hapan laskeuma voi myös syövyttää suoraan puiden neulasia ja lehtiä ja liottaa niistä tärkeitä aineita kuten magnesiumia ja kalsiumia. Typen oksidit voivat lisäksi aiheuttaa metsämaiden ja vesistöjen rehevöitymistä.

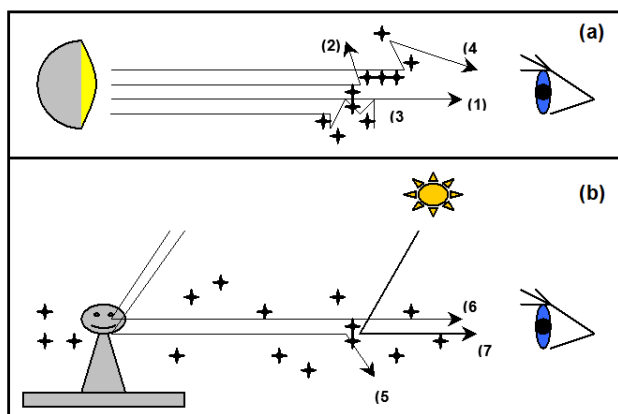
Haittavaikutukset voivat olla joko suoria vaikutuksia – kaasumaisena tai märkälasseumana – tai epäsuoria – maasta juurien kautta. Vaikutukset ovat moninaiset kuten ih-

miselläkin eli erilaiset häiriöt kuten heikko kasvu, lisääntyneet kasvisairaudet tai ääritapauksessa sukupuuttoon kuoleminen. Kuvassa 11.1 on graafinen esitys typpidioksidin  $NO_2$  vaikutuksista kasvillisuuteen.



Kuva 11.1. Raja-arvokäyriä kasvien kuolemalle, lehtirakenteen vaurioitumiselle ja aineenvaihdunnan ja kasvun hidastumiselle typpidioksidin ja altistusajan funktiona.

Useimmat kaasumaiset ilmansaasteet ovat täysin läpinäkyviä. Ainoa yleinen poikkeus on juuri  $NO_2$ , joka on ruskeaa. Osa kaupunkien savusumuista on ruskeita juuri niiden sisältämän  $NO_2$ :n vuoksi. Pääosa ilmansaasteiden vaikutuksista näkyvyyteen aiheutuu valon ja hiukkasten vuorovaikutuksesta. Kuvassa 11.2 on esitetty valofotonin ja ilman hiukkasten mahdollisia vuorovaikutuksia.



Kuva 11.2. Mahdollisia valofotonin vuorovaikutuksia ilmassa olevien partikkelien kanssa: (a) valo auton etulampusta silmään, (b) valon heijastuminen patsaasta.

Kuvassa 11.2 (a) silmä näkee valon auton ajolampusta. Osa fotoneista tulee suoraan silmään (1), silmä näkee ne, osa puolestaan heijastuu pois partikkeleista silmän ja valon välillä (2), joten niitä ei nähdä. Osa taas absorboituu partikkeleihin (3), eikä silmä näe niitäkään. Osa heijastuu partikkelista useamman kerran (4) ja tulee silmään eri tietä kuin suoraan ajovalosta.

Sen, absorboituuiko fotoni tai heijastuuiko se partikkelista, määrää useimmiten partikkelin halkaisijan suhde valon aallonpituuteen. Mikäli partikkelin halkaisija on paljon suurempi kuin aallonpituus, fotoni absorboituu tai heijastuu takaisin, jos partikkeli on hyvin heijastava. Jos partikkelin halkaisija on paljon pienempi kuin aallonpituus, fotoni kulkee partikkelin ohi eikä absorboitu tai heijastu. Mikäli partikkelin halkaisija on suurin piirtein samankokoinen kuin valon aallonpituus, partikkeli sirottaa valoa.

Tyypillisesti esim. 12,5 % fotoneista joutuu kosketuksiin hiukkasen kanssa. Kuvassa 1.5 (b) on näkymä patsaasta aurinkoisena päivänä. Patsas itse ei vapauta valoa. Siitä heijastuneet valofotonit voivat joko absorboitua tai sirota patsaan ja katsojan välissä tai tulla suoraan katsojan silmiin (5) ja (6). Lisäksi ilman hiukkaset patsaan ja katsojan välissä voivat sirottaa valoa katsojaan (6). Jos pilvi tulisi patsaan ja katsojan väliin ja patsas itse jäisi valoon, patsas näkyisi selvemmin kuin se näkyy ilman hiukkasten heijastaessa valonsäteitä katsojaa kohti.

Kaasumolekyylit ovat itse asiassa hyvin pieniä hiukkasia (halkaisija n.  $0,5 \text{ nm}$ ). Ne sirottavat myös valoa, mutta eivät läheskään yhtä tehokkaasti kuin hiukkaset, joiden aallonpituus on lähellä näkyvän valon aallonpituutta (n.  $0,4 - 0,6 \mu\text{m}$ ). Heijastuminen muuttaa valon väriä. Koska sinisen valon aallonpituus on pienempi kuin punaisen, sininen valo heijastuu helpommin kuin punainen. Tästä syystä taivas näyttää päivällä siniseltä.

Sumu kaupungin yllä näkyy siitä syystä, että se sirottaa rakennusten ja teiden kuvia sumun alla sekä siksi, että se sirottaa valonsäteitä silmiin. Näkyvyyttä heikentäviä partikkeleja aiheutuu myös muusta kuin ihmisten toiminnasta esim. tuulen puhaltama pöly, suolapartikkelit meristä ja kasvillisuuden tuottamien hiilivetyjen ilmakehässä synnyttämät hiukkaset.

Näkyvyys on yleensä parempi kuivassa ilmastossa kuin kosteassa, koska hienot hiukkaset absorboivat kosteutta ilmakehästä ja kasvavat suuremmiksi, jolloin ne sirottavat valoa tehokkaammin. Kaupungeissa sumu voi olla myös hyödyllistä, koska se varoittaa ihmisiä siitä, että ilmassa on todennäköisesti myös näkymättömiä ilmansaasteita.

Puhuttaessa kaasun konsentraatiosta käytetään yleensä yksikköä ppm tilavuutta tai moolia kohti (ppmv, jossa  $v = \text{volume}$ ). Nesteen tai kiintoaineen kohdalla käytetään massasuhdetta  $\text{mg/kg}$  tai vastaavasti miljardisosa eli  $\mu\text{g/kg}$  (ppb). Kaasun standarditilassa paine

on normaali ilmanpaine (1 atm) ja lämpötila useimmiten 20 °C (käytössä myös arvoja 0°C, 18 °C ja 25 °C).

## 11.2 Pienpartikkelit

Ilmassa leijuvien pienten hiukkasten arvioidaan nykyisin aiheuttavan merkittävimmät ilmansaasteista seuraavat terveysvaikutukset. Pienhiukkasiksi määritellään hiukkaset, joiden aerodynaaminen halkaisija on alle 2,5 µm. Näin pienet hiukkaset eivät tartu hengityselinten pölynpoistomekanismeihin, vaan kulkeutuvat ilman mukana keuhkorakkuloihin asti ja voivat päätyä sitä kautta jopa verenkiertoon. Pienhiukkasille altistumiseen on voitu liittää merkittäviä terveysvaikutuksia. Näitä ovat esimerkiksi astman yleistyminen, astmaoireiden pahentuminen, hengityselinten heikentynyt toimintakyky sekä lisääntynyt kuolleisuus ns. ilmansaaste-episodien aikana.

WHO (World Health Organization) on arvioinut, että pienhiukkaset lyhentävät ihmisten keskimääräistä elinikää runsaalla vuodella. Pienhiukkaset muodostumismekanismeja ovat esimerkiksi tiivistyminen höyrystyneistä aineista tai kemiallisten reaktioiden tuloksena. Hiukkasia syntyy mm. hiilen, puun, turpeen ja nestemäisten polttoaineiden poltossa, rikkidioksidi- ja typenoksidipäästöjen muuntuessa sulfaatiksi ja nitraatiksi sekä eloperäisten hiilivetyypäästöjen muuntumisessa. Pienhiukkaset koostuvat tyypillisesti sulfaateista, nitraateista, ammoniumista, alkuainehiilestä (noesta), orgaanisista yhdisteistä, metalleista sekä hiukkasiin sitoutuneesta vedestä. Pienhiukkaset voivat kulkeutua ilmakehässä päiviä ja jopa viikkoja.

Pienhiukkasia suuremmat hiukkaset, joiden halkaisija on suurempi kuin 2,5 mikrometriä, eivät kulkeudu hengityselimissä yhtä syvälle kuin pienhiukkaset. Tällaiset hiukkaset syntyvät usein mekaanisen hajotuksen seurauksena. Ihmisen aiheuttamia lähteitä ovat mm. liikenteestä syntyvä katupöly, poltosta syntyvä lentotuhka ja maatalousmaan pölyäminen. Hiukkaspäästöjä syntyy myös luonnossa maaperän ja kasvillisuuden pölyämisestä. Sisäilmassa päätyy hiukkasia monista lähteistä, kuten tekstiileistä, ruoan valmistuksesta ja tupakoinnista.

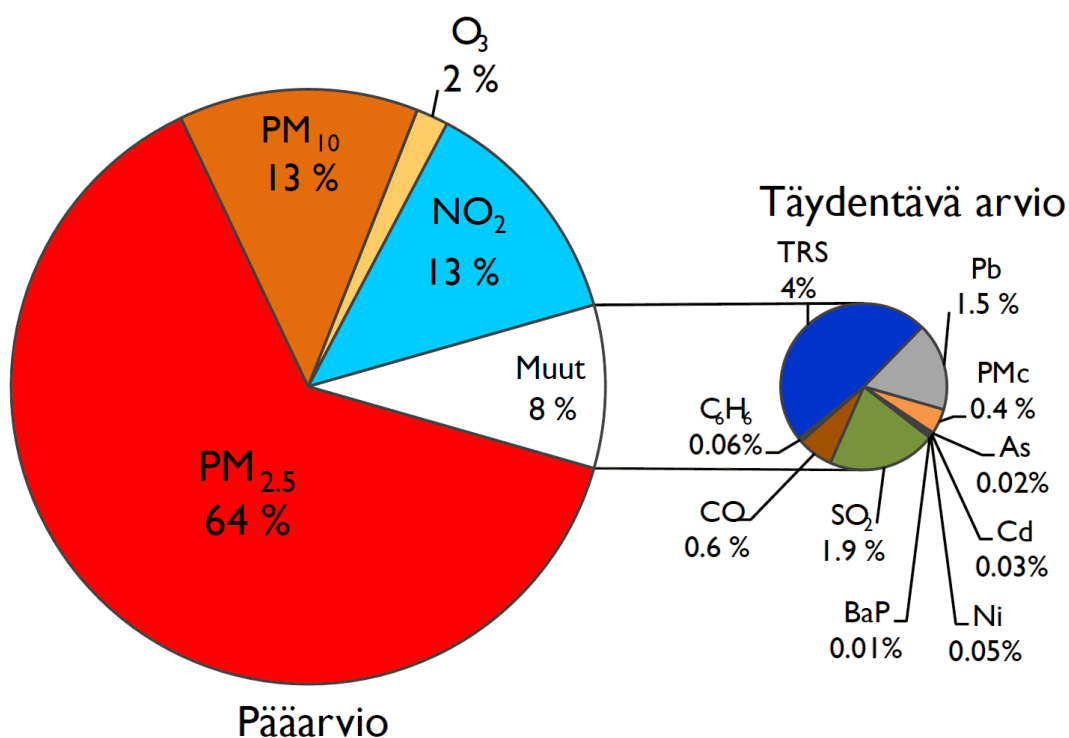
Viime vuosina on tutkittu paljon erilaisten polttoprosessien aiheuttamia pienhiukkaspäästöjä. Voimalaitosten pölynsuodattimet poistavat pääosin suhteellisen suurikokoisia hiukkasia, ja suuri osa pienhiukkasista läpäisee suodattimen tai mahdollisesti muodostuu tiivistymällä vasta suodattimen jälkeen. Tosin tehokkaimmilla suodattimilla, kuten letkusuodattimilla, päästää hyvään erotusasteeseen myös pienhiukkasten suhteen.

Hiukkaset voidaan jakaa primääri- ja sekundäärihiukkasiin. Polttoperäisillä eli primäärihiukkasilla tarkoitetaan hiukkasia, jotka ovat ilmakehässä siinä muodossa missä ne olivat

päästöhetkellä. Sekundäärihiukkasilla taas tarkoitetaan hiukkasia, jotka muodostuvat ilmakehässä kaasumaisista yhdisteistä. Hiukkaset voidaan jakaa myös niiden koon perusteella karkeisiin hiukkasiin PM<sub>10</sub>, jolloin niiden koko on 2,5 - 10 µm ja pienhiukkasiin PM<sub>2,5</sub>, joiden koko on alle 2,5 µm.

Pienhiukkasia syntyy poltossa palamattomien hiukkasten kulkeutuessa lentotuhkan mukana ulos tulipesästä. Suurin osa syntyvistä partikkeleista on 1 - 30 µm:n kokoisia, mutta pienempiä hiukkasia syntyy myös palamattomien aineiden kondensoitua mikroskooppiseksi pisaroiksi. Karkeat hiukkaset pääsevät hengitysteitse keuhkoihin aiheuttaen esimerkiksi hengitystiesairauksia. Pienhiukkaset puolestaan pääsevät keuhkojen limakalvojen läpi verenkiertoon. Näin ollen pienhiukkasten haitallisuus on suoraan suhteessa niiden kokoon.

Ilmansaasteiden arvioidaan aiheuttavan Suomessa vuosittain noin 1600 ihmisen kuoleman. Näistä suurin osa aiheutuu nimenomaan pienhiukkasista. Seuraavassa kuvassa on esitetty ilmansaasteiden aiheuttamaa tautitaakkaa Suomessa.



*Kuva 11.3.* Ilmansaasteiden Suomessa vuonna 2013 aiheuttaman tautitaakan jakautuminen ilmansaasteiden kesken. TRS = haisevat rikkiyhdisteet, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> = bentseeni, PMc = karkeat hiukkaset, PM<sub>2,5</sub> = alle 2,5 µm hiukkaset, PM<sub>10</sub> = alle 10. (Ympäristöministeriön Raportteja 16, 2016 (Ilmansaasteiden terveysvaikutukset))

Kuvasta havaitaan, että ennen kaikkea pienet hiukkaset ovat ihmisille haitallisia. Happamoittavien päästöjen osuus ihmisille suoraan kohdistuvista haitoista on selvästi pienempi.



## 11.2 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC eli Volatile Organic Compounds) ovat laaja ja monipuolinen joukko yhdisteitä, joilla voi olla sekä ilmasto- että terveysvaikutuksia. Osa niistä on esimerkiksi hengitysteitä ärsyttäviä tai karsinogeenisia. Yhdisteet ovat myös osallisina ilmastoa lämmittävän alailmakehän otsonin ja sekundääristen orgaanisten aerosolihiukkasten muodostumisessa. Ilmakehässä on kymmeniä tuhansia orgaanisia yhdisteitä, mutta niistä vain osa on pystytty tunnistamaan.

Ilmakehässä tapahtuu prosesseja, jotka muuttavat VOC:eja nopeasti. Yhdisteet voivat muodostaa uusia reaktiotuotteita esimerkiksi hapettumisen tai säteilyn seurauksena.

Taulukko 11.3. Joidenkin päästölähteiden VOC-päästöjen koostumus.

Lähde	Alkaanit [%]	Alkeenit [%]	Alkyynit [%]	Aromaattiset hiilivedyt [%]	Biogeeniset hiilivedyt [%]	Halogenoidut hiilivedyt [%]	Karbohyylit [%]
Liikenne	28,3	12,1	4,1	36,2	0,2	0	11,4
Puun poltto	9,9	31,9	18,1	10	0,1	0,4	28,6
Biogeeniset	0	0	0	0	100	0	0
Kaukokulkeuma, talvi	53,8	2,5	2,7	4,8	0	28,9	3,5
Kaukokulkeuma, touko- ja syyskuu	38,4	5,7	3,1	6,3	0,2	34,7	7,1

## 11.3 Päästöjen vaikutukset ihmiseen

Ilmansaasteiden vaikutukset ihmiseen kulkeutuvat hengityksen myötä. Haitallisten kaasujen vesiliukoisuus on ratkaiseva ominaisuus ihmisen kannalta. Hyvin vesiliukoisia ovat mm. kloori ( $Cl$ ), suolahappo ( $HCl$ ) tai rikkidioksidi ( $SO_2$ ) kun taas huonommin veteen liukenevia ovat mm. häkä ( $CO$ ), otsoni ( $O_3$ ) tai typpioksidi ( $NO$ ). Partikkelien osalta tärkein parametri on partikkelin halkaisija. Karkeat partikkelit,  $d > 5 \mu m$ , laskeutuvat maahan sitä nopeammin mitä suurempia ne ovat ja loputkin jäävät paremmin nenän suodatuksen kun taas hienommat partikkelit, aerosolit ja sitäkin pienemmät, kulkeutuvat helposti hengityksen mukana ihmiseen. Seuraavassa on esitetty eräiden päästöjen terveydellisiä haittavaikutuksia ihmisessä:

- Rikkidioksidi  $SO_2$  väritön, pistävän hajuinen, hapan, hengitystä ahdistava
- Typpidioksidi  $NO_2$  harmaa, pistävän hajuinen, hengitysteitä ärsyttävä ja hengenahdistusta aiheuttava
- Typpioksidi  $NO$  väritön, hajuton, estää hapen  $O_2$  kulkeutumista veressä
- Hiilimonoksidi  $CO$  väritön, hajuton, estää hapen  $O_2$  kulkeutumista veressä
- Otsoni  $O_3$  väritön, pistävän hajuinen, voimakas hapetin, vahingoittaa keuhkoa entsyymien hapettuessa
- Kloori  $Cl_2$  vihreä, pistävän hajuinen, hengitysteitä ärsyttävä
- Suolahappo  $HCl$  väritön, muuten kuten  $Cl_2$
- PAH ”polyaromaattiset yhdisteet”, yli sata erilaista epätäydellisen palamisen seurauksena, usein pölyyn sitoutuneena (tupakan savu, dieselin noki), karsinogeeninen partikkeli, haittavaikutuksia aineenvaihduntaa ja aivoihin
- Lyijy  $Pb$  partikkeli, vahingoittaa munuaisia
- Kadmium  $Cd$  korkean höyrynpaineen johdosta kaasumainen, muistimenetystä, vaikutukset virtsarakkoon
- Elohopea  $Hg$  partikkeli, erittäin myrkyllinen kuten elohopeakin.
- Elohopeakloridi  $HgCl_2$

## 11.4 Vaikutukset kasvillisuuteen

Veteen liukenevat yhdisteet, kuten rikki- ja typpidioksidi sekä kloori- ja raskasmetalliyhdisteet ovat hyvin haitallisia kasvillisuudelle, sillä ne vaikuttavat sekä kasvin aineenvaihduntaan, että maaperän koostumukseen. Rikkidioksidi adsorboituessaan kasvin lehtiin aiheuttaa pelkistäviä reaktioita, joita kasvin aineenvaihdunta pyrkii estämään hapettamalla rikkidioksidia. Tätä kutsutaan oksidatiiviseksi stressiksi, jolloin kasviin kohdistuu ylimääräinen aineenvaihdunnallinen kuorma (vrt. infektiio). Rikki- sekä typpioksidit ovat merkittäviä happamoitumisen aiheuttajia, sillä ne voivat muodostaa ilmakehässä rikki- ja typpihappoa. Happamat yhdisteet vahingoittavat kasvien lehtiä sekä heikentävät maaperän laatua syrjäyttämällä kasvillisuudelle tärkeitä ravinteita. Nämä ravinteet ovat yleensä maaperässä kationeina (+) ja ne syrjäytyvät happojen  $H^+$ -ionien vuoksi.

Happamoituminen aiheuttaa myös maaperän metalliyhdisteiden liukenemisen veteen. Metallipäästöt vaikuttavat kasvillisuuteen suoraan ilmasta sekä liuettuaan maaperän veteen. Erityisesti raskasmetallit heikentävät kasvien kasvua ja voivat aiheuttaa epätavallista kasvua. Elohopea aiheuttaa myös oksidatiivista stressiä sekä häiritsee veden siirtymistä kasvin rakenteissa. Seuraavaksi on listattuna päästöjen vaikutuksia kasvillisuudelle:

- Rikkidioksidi  $SO_2$  Maaperän happamoituminen, oksidatiivinen stressi
- Typpidioksidi  $NO_x$  Maaperän happamoituminen
- Otsoni  $O_3$  Vahingoittaa lehtiä ja hedelmiä: värimuutokset, vauriot
- Kloori  $Cl_2$  Maaperän happamoituminen ja lehtivauriot
- Suolahappo  $HCl$  Maaperän happamoituminen ja lehtivauriot

- Lyijy *Pb* Kasvun heikentyminen ja kasvaimet
- Kadmium *Cd* Kasvun heikentyminen ja kasvaimet
- Elohopea *Hg* Oksidatiivinen stressi, kasvun heikentyminen ja kasvaimet, kasvin sisäisen vedensiirron tukkeutuminen

## 11.5 Vaikutukset ilmastoon

Ilman yläkerroksessa, stratosfäärissä, suurin osa auringon *UV*-säteilystä suodattuu otsonin  $O_3$  avulla, kun taas alemman ilmakehän – maanpinnan lähellä olevan kerroksen – kaasukomponentit  $CO_2$  ja  $H_2O$  tärkeimpinä huolehtivat maanpinnasta avaruuteen suuntautuvan säteilyn absorptiosta, sitomisesta. Polttoprosessien seurauksena syntyvät hiilivedyt (*CH*) ja typen oksidit ( $NO_x$ ) tuhoavat yläilman otsonia. Maan pitkäaaltoinen *IR* -säteily absorboituu ja auringon lyhytaaltainen *UV*-säteily läpäisee ilmakehän, jolloin seurauksena on ilmaston lämpeneminen – kasvihuoneilmiö.

## 12 VOIMALAITOSTEN PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN

Voimalaitosten polttoprosesseissa syntyy aina savukaasuja. Savukaasu on palamisreaktion reaktiotuotteiden sekä polttoaineen ja palamisilman mukana tulevien reagoimattomien aineiden muodostama kaasuseos. Nämä kaasut sisältävät usein haitallisia yhdisteitä. Tavallisesti polttoaine sisältää vain viittä alkuainetta: hiiltä (C), vetyä, happea, typpeä ja rikkiä. Muiden alkuaineiden pitoisuus polttoaineessa on usein vähäinen. Tyypillisen polttoaineen savukaasujen sisältämät yhdisteet ovat hiilen palamisessa syntyvä hiilidioksidi ja hiilimonoksidi, vedyn palamisessa syntyvä vesihöyry, rikin palamisessa syntyvät rikkidioksidi ja rikkitrioksi. Lisäksi polton yhteydessä muodostuu typenoksiedeita.

Päästöjen vähentäminen on erityisen tärkeää niiden ihmisille ja luonnolle aiheuttamien haittavaikutusten takia. Haittavaikutuksia ovat esimerkiksi hengitystieoireet, happamat sateet ja ilmaston lämpeneminen. Päästöjen vähentämistä määrittelee myös lainsäädäntö. 1.1.2016 astui voimaan uusi suurten polttolaitosten päästöjä rajoittava teollisuuden päästödirektiivi (IED) myös olemassa oleville laitoksille.

Suurella polttolaitoksella tarkoitetaan polttoaineteholtaan vähintään 50 MW:n laitosta, joka voi myös koostua useasta vähintään 15 MW:n kattilasta joiden savukaasut on johdettu yhteiseen piippuun. Uusi IE-direktiivi aiheuttaa rikkidioksidi-, typenoksidi- ja hiukkaspäästöjen puhdistusmenetelmille parannustarpeen, jotta uusiin tiukempiin päästörajoihin päästäisiin.

Voimalaitosten päästöjen vähentämiseen on kehitetty useita erilaisia puhdistusmenetelmiä. Puhdistusprosessin suunnitteluun vaikuttaa poltettavan polttoaineen laatu ja laadun vaihtelu sekä itse polttoprosessi ja vaadittava savukaasujen puhtaustaso. Mahdollisia toisiinsa kytkettyjä ja toisiinsa vaikuttavia puhdistusvaiheita ja niiden erilaisia yhdistelmiä on lukuisia. Puhdistusmenetelmät voidaan karkeasti ryhmittää kolmeen pääryhmään: märkiin, puolikuiviin ja kuiviin puhdistusprosesseihin.

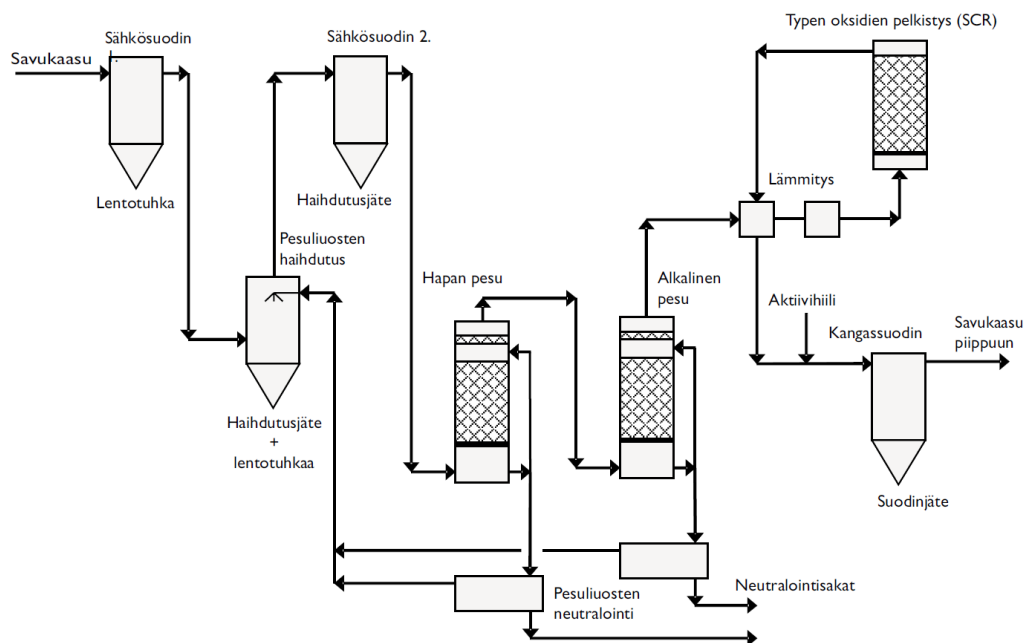
### 12.1 Märkä puhdistusprosessi (pesuri)

Märässä savukaasujen puhdistusprosessissa savukaasu pestään vedellä tai epäpuhtauksien kanssa reagoivilla liuksilla. Pesuja ennen savukaasusta poistetaan yleensä pääosa hiukkasista. Prosessin lopussa on yleensä elohopean ja dioksiinien poistovaihe ja mahdollinen typen oksidien pelkistys.

Märän puhdistuksen alussa savukaasusta poistetaan tavallisesti pääosa hiukkasista sähkösuotimella tai pussisuodattimella. Seuraava vaihe on savukaasun pesu vedellä pesutor-

nissa. Pesutorni on tyypillisesti tätekappalepesuri, välipohjatyypinen pesuri tai suihkutorni, jossa saadaan aikaan veden ja savukaasun kesken mahdollisimman suuri kosketuspinta ja riittävä kontaktiaika. Vesipesuria kutsutaan myös happamaksi pesuriksi, koska savukaasusta liukenee veteen muun muassa HCl:ää ja pesurissa kiertävä vesi on sen vuoksi voimakkaasti hapanta.

Happaman pesun jälkeen savukaasu pestään niin kutsutulla alkalisella pesulla, jossa pesunesteenä käytetään esimerkiksi kalkkimaitoa tai natriumhydroksidin vesiliuosta. Alkalinen pesu poistaa savukaasusta muun muassa rikin oksidit. Alkalisen pesuvaiheen saostuskemikaalin valinnassa on otettava huomioon savukaasun ominaisuudet ja pesutuotteiden ja -vesien käsittely kokonaisuutena. Mikäli laitos on tarpeen varustaa katalyyttisellä typen oksidien pelkistyksellä, se sijoitetaan tyypillisesti alkalisen pesun jälkeen. Pesureissa varsin viileäksi jäähtynyt savukaasu on lämmitettävä pelkistyksen vaatimaan noin 220 – 300 °C lämpötilaan ennen sen johtamista katalyyttisyksikköön. Lämmitykseen käytetään kuumia savukaasuja tai erillisiä lämmityspolttimia. Katalyyttiseen pelkistysyksikköön syötetään pelkistyskemikaaliksi ammoniakkia. Pelkistysyksikön jälkeen savukaasusta otetaan talteen lämpöä ja se jäädytetään seuraavaa vaihetta varten. Viimeisenä vaiheena on metallisen elohopean ja dioksiinien poisto. Nämä molemmat voidaan tehdä aktiivihiihisuodatuksella. Vaihtoehtoisesti elohopea voidaan myös hapettaa ja poistaa jo happamassa pesussa ja dioksiiniyhdisteet hajottaa katalyyttisesti. Kuvassa 5 on esitetty määrän savukaasunpuhdistusprosessin päävaiheet.



Kuva 12.1. Tyypillinen suuren jätteenpolttolaitoksen märkä savukaasunpuhdistusprosessi, jossa pesuliuokset haihdutetaan.

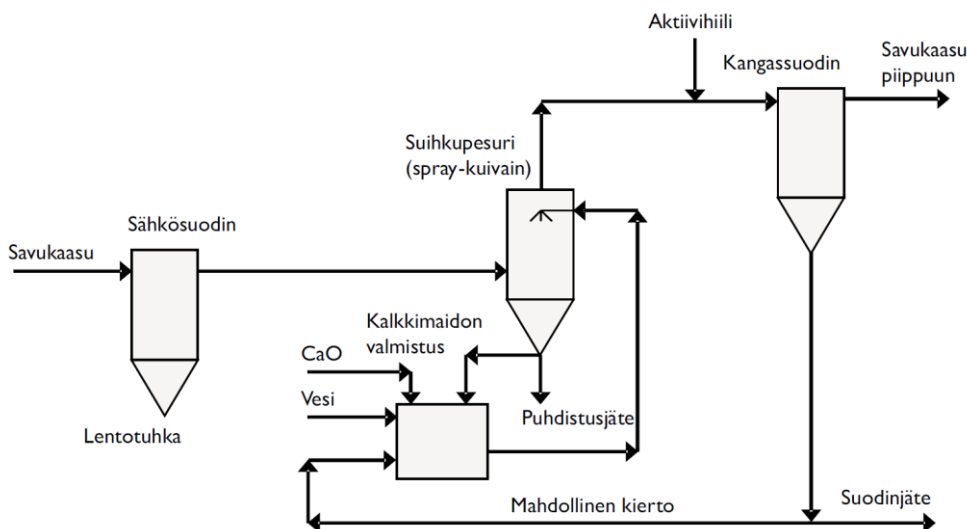
Märällä puhdistusprosessilla päästään erittäin hyvään puhdistustulokseen ja sen puhdistuskapasiteetti riittää yleensä hyvin myös poltettavan jätteen laadunvaihtelusta aiheutuvien tilapäisesti korkeiden epäpuhtauspitoisuuksien käsittelemiseen. Märän menetelmän etuna on myös sen kyky käsitellä vaarallisia savukaasuyhdisteitä, kuten palavia, happamia ja tahmeita aineita. Menetelmän avulla voi myös samanaikaisesti sitoa useita eri päästöjä (hiukkaset, SO<sub>2</sub>, happamat kaasut). Menetelmän haittapuolia ovat sen monimutkaisuus ja energian kulutus. Prosessi tuottaa lisäksi jätevesiä, joiden käsittely on vaativaa. Uusissa laitoksissa jätevesien käsittely on usein toteutettu prosessin sisällä ja jätevedet haihdutetaan, jolloin niihin sitoutuneet epäpuhtaudet voidaan siirtää loppusijoitukseen tai jatkokäsittelyyn jauhe- tai pastamaisina.

Viime vuosina energiatehokkuus on noussut hyvin merkittäväksi osaksi energiantuotantoa. Tästä johtuen pesurien lämmöntalteenottokykyä on kehitetty. Savukaasuun suihkuttaessa pesuvettä se jäähtyy ja samalla savukaasussa oleva vesihöyry lauhtuu vedeksi luovuttaen paljon lämpöä suihkutettuun veteen. Lämpö pesuvedestä siirretään tämän jälkeen lämmönvaihtimella kaukolämpöverkkoon. Tyypillisen CHP-voimalaitoksen kaukolämpöteho voi kasvaa jopa 20 % lämmöntalteenottoa käytettäessä.

## 12.2 Puolikuiva savukaasujen puhdistus

Puolikuivassa puhdistuksessa savukaasujen happamat yhdisteet ja rikkiyhdisteet sidotaan kalsiumhydroksidi-vesi-lietteeseen eli kalkkimaitoon suihkupesurissa. Prosessi mitoitetaan niin, että liete kuivuu savukaasuvirrassa ja reaktiotuotteet poistuvat pesurista savukaasuvirtaan sekoittuneena pölynä. Pöly erotetaan pesurin jälkeen kangassuotimella. Suodin toimii prosessissa myös kemiallisesti aktiivisena puhdistimena, kun savukaasu kulkee suotimessa erottuvan vielä reagoimatonta kalsiumhydroksidia sisältävän pölykerroksen läpi. Menetelmän keskeiset toiminnot on esitetty oheisessa kuvassa 6.

Savukaasuvirtaan puhalletaan monasti ennen suodinta hienojakoista aktiivihiiltä elohopean ja dioksiiniyhdisteiden sitomiseksi. Aktiivihiili voidaan sekoittaa myös pesuriin ruiskutettavaan kalkkimaitoon. Prosessin viimeisenä vaiheena voi olla typen oksidien katalyyttinen pelkistys, mutta yleisemmin puolikuivaa menetelmää käyttävissä laitoksissa typen oksidit hallitaan joko polttoteknisesti tai ne pelkistetään tulipesässä ammoniakki-ruiskutuksella. Prosessin alussa voidaan käyttää lentotuhkan esierotukseen sähkösuodinta.



Kuva 12.2. Puolikuivan savukaasunpuhdistuksen periaate.

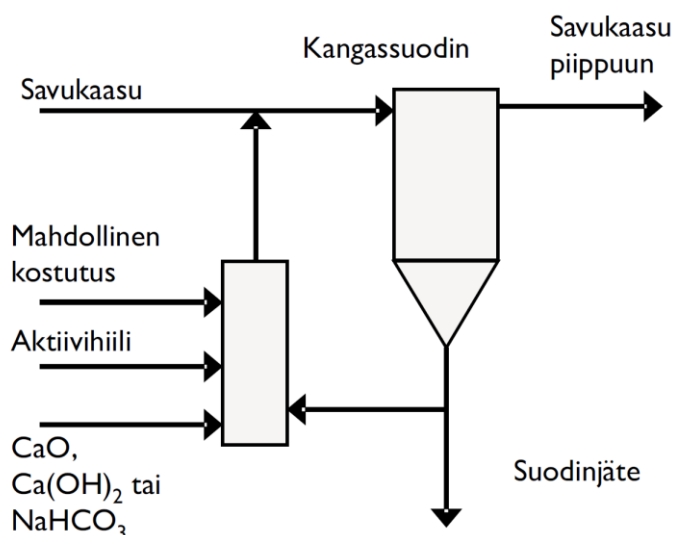
Menetelmä ei tuota lainkaan jätevesiä, mutta kiinteän puhdistusjätteen määrä on selvästi suurempi kuin märkämenetelmissä. Puolikuivaa puhdistusprosessia käytetään yleensä laitoksissa, joissa poltosta tulevan puhdistamattoman savukaasun epäpuhtausmäärät eivät vaihtele kovin paljoa. Alstom Environment Control Systemsin NID-prosessissa 25 käytetään sorbenttina kalsiumoksidia, joka sekoitetaan suotimelta osittain palautettavaan tuhkan, reagoimattoman sorbentin ja reaktiotuotteiden seokseen ja kostutetaan ennen savukaasuvirtaan syöttämistä. Kostutuksessa kalsiumoksidi reagoi kalsiumhydroksidiksi, joka tässäkin menetelmässä on varsinainen epäpuhtauksien sidonta-aine. Palautuskierron avulla vähennetään sorbentin kulutusta ja pienennetään muodostuvan puhdistusjätteen määrää.

### 12.3 Kuiva savukaasujen puhdistus

Kuivan savukaasunpuhdistuksen periaate on sama kuin puolikuivassa menetelmässä, mutta epäpuhtauksien sidonta-aine sekoitetaan savukaasuun kuivana. Sorbentti puhalletaan periaatteessa yksinkertaisesti savukaasukanavaan ennen kangassuodinta. Puhalluksen aikana sidonta-ainetta kostutetaan, sillä sidontareaktiot tapahtuvat sorbenttipartikkelien liukoisessa tilassa olevalla pinnalla. Kuivassa menetelmässä käytetään epäpuhtauksien sidontaan joko kalsiumhydroksidia tai natriumbikarbonaattia. Sorbenttiin voidaan sekoittaa elohopean ja dioksiiniyhdisteiden pidättämiseksi myös hienojakoista aktiivihiiltä. Kuvassa 7 on esitetty kuivan puhdistusmenetelmän periaate.

Kuiva puhdistusmenetelmä on yksinkertainen ja mahtuu pieneen tilaan. Sillä saavutetaan jätteenpolttoasetuksen mukaiset päästöarajat edellyttäen, että poltettava jäte on tasalaatuista. Kalsiumoksidin kulutus on kuivassa menetelmässä tyypillisesti suurempi kuin

puolikuivassa menetelmässä. Natriumbikarbonaattia käytetään sorbenttina silloin kun savukaasun lämpötila on puhdistusvaiheessa 150 – 160 °C tai korkeampi, koska kalsiumhydroksidi ei näin korkeassa lämpötilassa reagoi tehokkaasti savukaasun rikki- ja klooriyhdisteiden kanssa. Natriumbikarbonaatti on hinnaltaan kalliimpaa kuin kalsiumoksidi, mutta sen kulutus on useimmiten jonkin verran vähäisempää ja muodostuvan puhdistus tuotteen määrä on hieman pienempi kuin kalsiumoksidia käytettäessä.



Kuva 12.3 Kuivan savukaasunpuhdistuksenperiaate.

## 12.4 Rikinpoisto

Energiantuotannon rikkipäästöjä voidaan vähentää sekä teknisin keinoin että rakenteellisin muutoksin lisäämällä vähärikkisen tuotannon osuutta. Teknisiä keinoja rikkipäästöjen vähentämiseksi ovat polttoaineiden rikkipitoisuuden alentaminen sekä rikin sitominen polttoprosessin aikana tai polton jälkeen savukaasujen puhdistuksessa. Merkittävimmät rikkipäästöjä aiheuttavat polttoaineet ovat kivihiili ja raskas polttoöljy. Teollisuusprosessien päästöjä voidaan vähentää myös rikin talteenotolla rikkidioksidina tai rikkihappona.

Savukaasujen rikinpoistomenetelmät voidaan jakaa karkeasti regeneroiviin ja ei-regeneroiviin menetelmiin ja edelleen kuiva-, puolikuiva- ja märkäprosesseihin. Regeneroivalla menetelmällä tarkoitetaan menetelmää, jossa sorbentti voidaan regeneroida lämmön avulla tai kemiallisesti ja käyttää uudelleen. Sorbentti taas on poistettavan yhdisteen absorptioon tai adsorptioon käytettävä aine. Yleisemmin käytetyissä ei-regeneroivissa menetelmissä sorbentti on kertakäyttöinen. Märkäpesurit ovat selvästi yleisin menetelmä, puolikuiva- ja kuivamenetelmä kattavat noin kymmenyksen laitoksiin asennetusta tehosta ja muilla prosesseilla on vain muutaman prosenttiyksikön markkinaosuus.



Regeneroivissa menetelmissä SO<sub>2</sub> poistetaan savukaasuista adsorbentin tai absorbentin avulla. Tämän jälkeen adsorbentti tai absorbentti regeneroidaan, jolloin saadaan lähes puhdasta rikkidioksia tai rikkihappoa. Regeneroinnin jälkeen sorbentti voidaan käyttää uudestaan rikinpoistoon. Regeneroivat menetelmät olivat laajan tutkimuksen kohteena aikaisemmin, kun 70- ja 80-luvuilla kalkkikivipesureiden kanssa oli suuria kehitysongelmia.

Regeneroivien menetelmien etuina on vähäinen rikkisorbentin tarve, koska sorbentti voidaan aina regeneroida ja näin kierrättää, joten jätettä ei synny paljoa. Menetelmillä on kuitenkin korkeat investointikustannukset sekä ne kuluttavat paljon energiaa sorbentin regenerointiin, mikä vähentää regeneroivien menetelmien houkuttelevuutta. Sivutuotteen mahdolliset käyttökohteet voimalaitoksen lähellä kuitenkin vähentävät kustannuksia. Tärkeimmät regeneroivat menetelmät esitetään taulukossa 2, joista käytetyin on kalkkikivipesuria muistuttava Wellman-Lord-prosessi. (Raiko et al. 2002, 351; Soud 1994, 34)

Taulukko 12.1. Tärkeimmät regeneroivat rikinpoistomenetelmät.

Prosessi	Sorbentti/toimintaperiaate	Loppu-/sivutuote
Wellman-Lord	Natriumsulfiitti	Konsentroidu SO <sub>2</sub>
Bergbau-Forschung	Aktiivihiili	Konsentroidu SO <sub>2</sub>
Linde-Solinox	Fyysinen absorptio	Konsentroidu SO <sub>2</sub>
Sumukuivauspesuri	Natriumkarbonaatti	Alkuainerikki
MgO-prosessi	Magnesiumoksidi (MgO)	Konsentroidu SO <sub>2</sub>

Polton yhteydessä vapautuvan rikkipäättön suuruus riippuu polttoaineeseen sitoutuneen rikin määrästä. Taulukossa 12.2 on esitetty eri polttoaineiden tyypillisiä rikkipitoisuuksia. Polttoaineen rikistä suurin osa vapautuu poltossa palotilaan ja muodostaa rikin oksideita. Pieni määrä rikistä voi sitoutua tuhkan alkali- ja maa-alkalimetalleihin. Suurin osa muodostuvista rikin oksideista on rikkidioksia ja vain muutama prosentti rikkitrioksia, niinpä voimalaitoksen, jossa ei ole rikinpoistoa, rikkioksidipäästöjä laskettaessa voidaan olettaa kaiken polttoaineen rikin muodostavan rikkidioksia.

Taulukko 12.2. Eri polttoaineiden rikki- ja rikkidioksidipitoisuuksia.

Polttoaine	Rikki- ja rikkidioksidipitoisuus paino-%
Kivihiili	0,2 – 5
Puu	< 0,05
Turve	0,05 – 0,5
Maakaasu	0
Kevyt polttoöljy	0,05 – 0,5
Raskas polttoöljy	1 - 4

Savukaasun mukana ilmaan pääsevä rikkidioksidi sekoittuu ilmaan ja kulkeutuu ilmajärjestelmien mukana osan muuttuessa vähitellen rikkihapoksi ja osan laskeutuessa rikkidioksidina sekä kuivina sulfaattihiukkasina.

### 12.4.1 Rikkitrioksidin muodostuminen poltossa

Pieni osa poltossa muodostuvasta rikkidioksidista reagoi edelleen rikkitrioksidiksi. Vaikka rikkidioksidin ja –trioksidin ympäristövaikutukset ovat samat ja rikkitrioksidia muodostuu hyvin vähän verrattuna rikkidioksidin määrään, niin muodostuvalla rikkitrioksidilla on kuitenkin merkitystä, sillä se reagoi savukaasussa olevan veden kanssa muodostaen rikkihappoa. Rikkihappo voi tiivistyä vesi-rikkihapposeokseksi kattilan pinnoille ja aiheuttaa metallipinnoille korroosiota.

Rikkitrioksidia muodostuu poltossa kahdella mekanismilla: termisesti korkeissa lämpötiloissa (> 1000 °C) ja katalyyttisesti matalissa lämpötiloissa (500 – 800 °C). Korkeissa lämpötiloissa rikkidioksidi voi reagoida happiatomien kanssa kolmimolekyylisessä reaktiossa  $\text{SO}_2 + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{SO}_3 + \text{M}$ , jossa M voi olla mikä tahansa kaasuatomi tai –molekyylä. Katalyyttisesti rikkitrioksidia muodostuu lähinnä tulistinvyöhykkeellä, jossa lämpötila on reaktiolle sopiva ja tulistinputkien kerrostumat toimivat katalyytteina.

### 12.4.2 Rikkidioksidipäästöjen vähentäminen

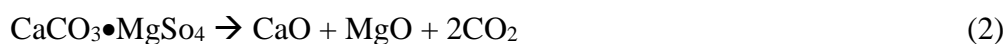
Rikkidioksidipäästöjä voidaan vähentää usealla menetelmällä: polttoaineen rikki- ja rikkidioksidipitoisuutta pienentämällä, poistamalla rikkiä jäähtyneistä savukaasuista ja poistamalla rikki tulipesässä. Seuraavaksi käsitellään vain rikinpoistoa tulipesässä.

### 12.4.3 Rikinpoisto tulipesässä

Rikinpoisto tulipesässä perustuu kalsiumyhdisteiden kykyyn sitoa rikkidioksidia. Kiinteiden polttoaineiden pölypoltossa kalkkikiveä tai muuta kalsiumyhdistettä voidaan syöttää tulipesään hienojakoisina hiukkasina. Leijukerros-poltossa kalsiumyhdisteet on mahdollista lisätä suoraan leijukerrokseen, jolloin sidonta-aineen syöttö ja poisto on yksinkertaista.

### 12.4.4 Hapettavat olosuhteet

Hapettavissa olosuhteissa polttoaineen rikki hapettuu nopeasti rikkidioksidiksi, joka voidaan sitoa sorbenttiin. Tavallisesti sorbenttina käytetään kalsiumpohjaisia alkaleja, esimerkiksi kalkkikiviä  $\text{CaCO}_3$  tai dolomiittia  $\text{CaCO}_3 \bullet \text{MgSO}_4$ , kalsiumhydroksidia  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tai kalsiumoksidia  $\text{CaO}$ . Rikinpoistoon liittyvät reaktiot ovat seuraavat



Kalsiumkarbonaatti ja -hydroksidi hajoavat kuumennettaessa, kalsinoituvat, jolloin muodostuu kalsiumoksidia (reaktiot 1-3). Reaktioista 4 ja 5 nähdään, että sekä  $\text{SO}_2$  että  $\text{SO}_3$  sitoutuvat kalsiumoksiidiin. Myös dolomiitin sisältämä  $\text{MgSO}_4$  kalsinoituu magnesiumoksidiksi, mutta syntynyt magnesiumoksidi ei osallistu rikkioksidien sitomiseen.

Kalsiumin käytön hyötysuhteella on vaikutusta kattilan termiseen hyötysuhteeseen ja esimerkiksi käytettäessä kalsiumkarbonaattia on kalsiumin käytön hyötysuhde oltava yli 35 %, jotta kattilan hyötysuhde ei laske. Laskettaessa kalkinsyötön kokonaisvaikutusta hyötysuhteeseen on huomioitava lisäksi reaktiotuotteiden mukana poistuva entalpia.

Saavutettava rikinpoistoaste riippuu muun muassa

- Lämpötilasta,
- viipymääjasta sopivalla lämpötila-alueella,
- alkalinen partikkelikoosta,
- alkalinen reaktiivisuudesta,
- savukaasun  $\text{SO}_2$  -konsentraatiosta ja
- Ca/S-moolisuhteesta.

Rikinsidonnalle on lämpötilarajat, joiden ulkopuolella rikinsidonta on hyödytöntä. Ylärajana on noin 1250 °C, jonka yläpuolella sulfaatti alkaa hajota takaisin rikkidioksidiksi, ja alarajana noin 700 °C, jonka alapuolella reaktionopeus on merkityksettömän pieni. Myöskään muodostuneen CaO:n rikinsidontakyky lämpötilariippuvainen. Korkeissa lämpötiloissa kalkkioksidi sintraantuu, jolloin sen ominaispinta-ala pienenee, raekoko kasvaa ja huokoisuus pienenee. Näiden muutosten myötä myös rikinsidontakyky heikkenee.

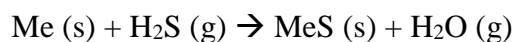
Leijukerrospoltoissa olosuhteet ovat hyvät rikinsidonnalle. Viipymääjat ovat riittävän pitkiä ja lämpötila on sopivalla alueella. Suurin rikinpoistoa edistävä tekijä on se, että leijukerrospoltoissa petimateriaalin intensiivinen jauhamisvaikutus poistaa oksidipartikkelin ympärille muodostuvaa tiukkaa sulfaattikerrosta, joka muutoin hidastaisi rikkidioksidin sitoutumista. Leijukerrospoltoissa saavutetaan parhaimmillaan yli 90%:n rikinpoisto (kiertopedillä). Pölypoltoissa kaasujen viipymäaika optimaalisella lämpötila-alueella on vain muutamia sekunteja ja rikinsidonta-aste jääkin tavallisesti alle 40%:n.

Polton yhteydessä tapahtuvan rikinpoiston tehokkuus määritetään tavallisesti kaavalla

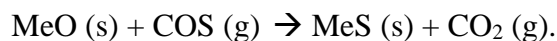
$$\eta = \frac{\dot{m}_{\text{SO}_2\text{in}} - \dot{m}_{\text{SO}_2\text{out}}}{\dot{m}_{\text{SO}_2\text{in}}} \quad (3.1)$$

jossa  $\dot{m}_{\text{SO}_2\text{in}}$  on polttoaineesta kattilaan tuleva ja  $\dot{m}_{\text{SO}_2\text{out}}$  savukaasun mukana ulos virtaava rikkidioksidimäärä. Yksikkönä on tavallisesti kg/s.

Pelkistävissä olosuhteissa, esimerkiksi kaasutuksen yhteydessä, muodostunutta rikkiveityä, H<sub>2</sub>S, ja karbonyylisulfidia, COS, voidaan absorboida sopivaan sorbenttiin. Korkeassa lämpötilassa rikkiveity voi reagoida suoraan kiinteän sorbentin (yleisesti Me) kanssa:



ja

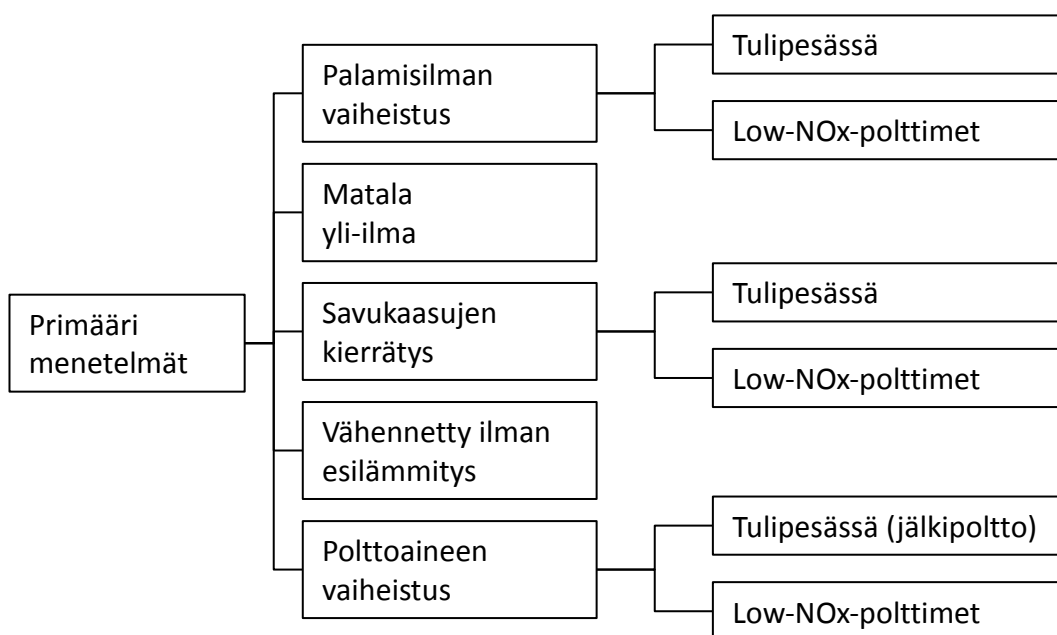


Käytetty sorbenttimateriaali voidaan regeneroida polttamalla metallisulfidi rikkidioksidiksi, joka voidaan käsiteltävä edelleen sopivalla prosessilla, joko väkeväksi SO<sub>2</sub>-kaasuksi, alkuainerikiksi tai rikkihapoksi.

## 12.5 Typen oksidien puhdistus

Typen oksidien ( $\text{NO}_x$ ) vähentämistavat voidaan jakaa kahteen luokkaan: primääri- ja sekundäärimenetelmiin.  $\text{NO}_x$ -päästöjä kannattaa vähentää ensin primäärimenetelmillä ja sen jälkeen tarvittaessa sekundäärimenetelmillä, koska primäärimenetelmät ovat edullisempia ja niillä ei ole juurikaan käyttökustannuksia. Toisin kuin rikinpoistossa, voidaan typpipäästöihin vaikuttaa jo itse palamisreaktiossa. Primäärimenetelmät asennetaan tulipesään ja niiden tavoitteena on vähentää  $\text{NO}_x$ :n syntyminen jo palamisreaktiossa eli käytetään polttoteknisiä vähennyskeinoja. Sekundäärimenetelmässä  $\text{NO}_x$ :t poistetaan savukaasuista.

Primäärimenetelmiä käytettäessä on tärkeää, että kattilan toiminta pysyy optimaalisena ja ettei poltossa synny muita haitallia yhdisteitä. Poltossa tulisikin ottaa huomioon seuraavia asioita: prosessin turvallisuus ja luotettavuus, mahdollisuus eri polttoaineiden käyttöön, täydellinen palaminen, mahdollisimman pienet päästöt ja pienet ylläpitokustannukset. Primäärimenetelmät on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 12.4. Typen oksidien primääriset vähennysmenetelmät.

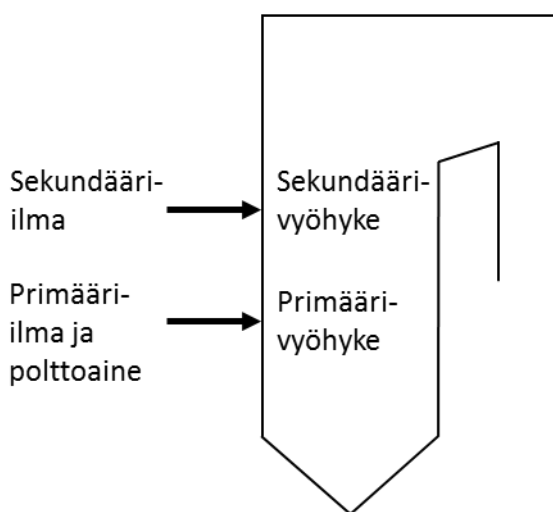
### 12.5.1 Matala yli-ilma

Matalan yli-ilman käyttäminen on yksinkertainen ja helposti toteutettavissa oleva NO<sub>x</sub>-päästöjen vähennystapa. Se vähentää termisen ja polttoaineen NO<sub>x</sub>:ien muodostumista. Menetelmä on käytössä erityisesti vanhoissa voimalaitoksissa, joissa uuden tekniikan asentaminen ei ole taloudellisesti kannattavaa. Menetelmällä päästään 10 - 44 %:n NO<sub>x</sub>-päästöjen vähennykseen.

### 12.5.2 Ilman vaiheistus

Ilmavaiheistuksessa kattilan alaosassa vallitsee ali-ilmaolosuhteet, joka vähentää polttoaineen NO<sub>x</sub>:n syntymistä. Myös termisen NO<sub>x</sub>:n syntyminen vähenee mahdollisesti, sillä palamisreaktion huippulämpötila ei ole ali-ilmalla yhtä korkea kuin stökiometrisessä palamisessa. Paras tehokkuus saavutetaan primäärivyöhykkeen ilmakertoimella  $\lambda = 0,8 \dots 0,9$  (Wu 2002, 20). Loppu ilma (n. 10 - 30 %) syötetään kattilan keski- tai yläosaan polttimien yläpuolelle.

Ilmavaiheistusta voidaan käyttää niin arina- kuin leijukattiloissa. Ilmavaiheistuksella päästään 10 - 70 %:n tehokkuuteen. Ilmavaiheistuksen periaate esitetään kuvassa 7. (Raiko et al. 2002, 311; European Commission 2006, 96, 104.)



Kuva 12.5. Ilmavaiheistuksen periaate tulipesässä (Raiko et al. 2002, 310).

Ilmavaiheistuksen huonoja puolia ovat palamisen epätäydellisyys, joka aiheuttaa CO-päästöjä ja palamattomien osuuden kasvua. Lisäksi ilmavaiheistus saattaa aiheuttaa lämpöpinnan korroosiota ja ylimääräistä likaantumista, mistä etenkin lämpöpinnan korrosio pienentää huomattavasti pinnan elinaikaa. (European Commission 2006, 104; Wu 2002, 21)

### 12.5.3 Savukaasujen kierrätys

Savukaasujen kierrätys vähentää palamiseen osallistuvan hapen määrää ja pienentää palamislämpötilaa. Täten polttoaineen ja termisen NO<sub>x</sub>:n muodostuminen vähenee. Savukaasujen kierrätys on todettu toimivaksi erityisesti korkean lämpötilan kattiloissa. Savukaasujen kierrätyksellä päästään öljy- ja kaasukattiloilla jopa 60 %:n NO<sub>x</sub>-päästöjen vähennykseen. Hiilikattiloissa vähennystehokkuus jää alle 20 %:n. Savukaasujen kierrätystä voidaan myös käyttää muiden primäärimenetelmien kanssa, jolloin päästään korkeisiin päästövähennyksiin. (Wu 2002, 22; European Commission 2006, 104.)

Savukaasujen kierrätyksen heikkoutena on pienentynyt lämmönsiirtokapasiteetti, koska kierrätys viilentää tulipesää. Tyypillisesti jälkiasennetun savukaasujen kierrätys –menetelmän takia lämmöntuotto on 10 % matalampi. Liian suuri kierrätettävän savukaasun määrä voi aiheuttaa korroosio-ongelmia lämpöpinnoille ja kasvattaa energian kulutusta savukaasupuhaltimien takia. (Wu 2002, 22; European Commission 2006, 97.)

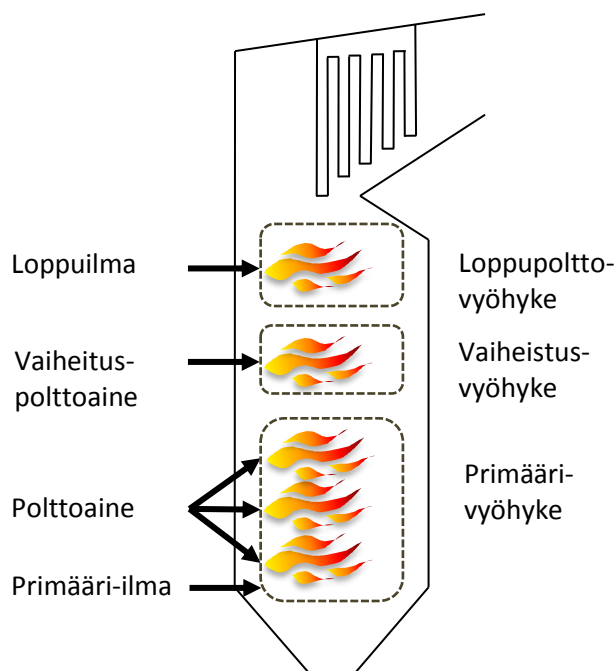
### 12.5.4 Vähennetty ilman esilämmitys

Ilman esilämmityksen vähentäminen vähentää lähinnä öljy- ja kaasukattiloiden NO<sub>x</sub>-päästöjä, koska näillä polttoaineilla pääasialliset NO<sub>x</sub>-päästöt ovat termistä NO<sub>x</sub>:ta. Ilman esilämmityksen vähentäminen laskee palamislämpötilaa, mikä vähentää termisen NO<sub>x</sub>:n muodostumista. Tekniikkaa ei kuitenkaan voida käyttää esimerkiksi hiilen kanssa, koska se vaatii korkean lämpötilan kunnolliseen palamiseen. Ilman esilämmitystä ei myöskään saa vähentää liikaa, koska se suurentaa polttoaineen kulutusta huomattavasti. (European Commission 2006, 97.)

### 12.5.5 Polttoainevaiheistus (jäkipoltto)

Jäkipoltto hyödyntää sekä ilmavaiheistusta että polttoainevaiheistusta. Tekniikkaa voidaan käyttää monilla eri polttoaineilla. Sen jälkiasennus on myös helppoa, sillä se ei vaadi muutoksia primäärivyöhykkeeseen. Tekniikalla päästään 30 - 70 %:n NO<sub>x</sub>-päästöjen vähennystehokkuuteen. (Raiko et al. 2002, 314; Wu 2002, 23.)

Tekniikan huonoja puolia ovat mahdollinen tulipesän korroosio ja suurempi likaantuminen sekä palamattomien lisääntyminen. Laitteiston hinta on noin 2,5 milj. € 250 MWth:n kattilalle, joten se ei ole yhtä kustannustehokas vaihtoehto kuin esimerkiksi low-NO<sub>x</sub>-polttimen ja tulipesän ilmapvaiheistuksen yhdistelmä. Polttoainevaiheistuksen toimintaperiaate esitetään kuvassa 8. (Raiko et al. 20002, 314; European Commission 2006, 100.)



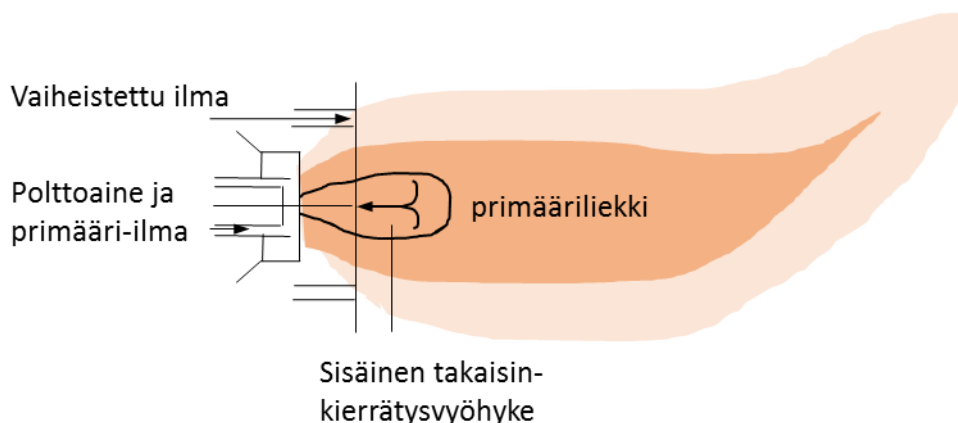
Kuva 12.6. Polttoainevaiheistuksen periaate.

Polttoainevaiheistuksen toimintaperiaate on yllä olevan kuvan mukainen kolmivaiheinen palamisprosessi. Ensimmäisessä vaiheessa pääpolttoaine poltetaan yli-ilmamäärällä primääri-vyöhykkeessä. Toisessa vaiheessa sekundääripolttoainetta, tyypillisesti maakaasua, syötetään vaiheistusvyöhykkeeseen. Näin syntyy ali-ilmainen palamisolosuhde, jossa NO pelkistyy molekyylitypeksi (N<sub>2</sub>). Vaiheistusvyöhyke vaatii yli 1000 °C:n lämpötilan. Polttoainevaiheistuksen kolmannessa, loppupalamisvaiheessa syötetään tulipesään lisää ilmaa, jotta sekundääripolttoaine palaa loppuun saakka. Optimaalinen lämpötila on alle 1000 °C. (Raiko et al. 2002, 312 - 313.)

### 12.5.6 Low-NO<sub>x</sub>-poltin

Low-NO<sub>x</sub>-polttimet (LNB) voivat toimia ilmapvaiheistuksella, polttoainevaiheistuksella, savukaasujen kierrätyksellä tai näiden yhdistelmällä. LNB:sta käytetään termiä hybridi low- NO<sub>x</sub>-poltin, kun se käyttää useampaa vähennystekniikkaa samanaikaisesti. Oheisessa kuvassa 9 esitetään ilman vaiheistuksella toimiva low-NO<sub>x</sub>-poltin. (European Commission 2006, 101 - 103.)





Kuva 12.7. Ilmavaiheistuksella toimiva low-NO<sub>x</sub>-poltin (Wu 2002, 10).

Seuraavassa taulukossa on vertailtu erityyppisten low-NO<sub>x</sub>-polttimien ominaisuuksia.

Taulukko 12.3. Low NO<sub>x</sub> –vähennystehokkuus ja rajoitukset.

Tekniikka	Vähennystehokkuus [%]	Rajoitukset
Ilmanvaiheistus	25 - 35	epävakaata liekki epätäydellinen poltto
Polttoainevaiheistus	< 20	epävakaata liekki
Savukaasujen kierrätys	50 - 60	epävakaata liekki epätäydellinen poltto

Kehittyneemmällä hybridi low-NO<sub>x</sub>-polttimilla päästään tyypillisesti 20 % korkeampiin vähennystehokkuuksiin kuin perinteisillä low-NO<sub>x</sub>-polttimilla.

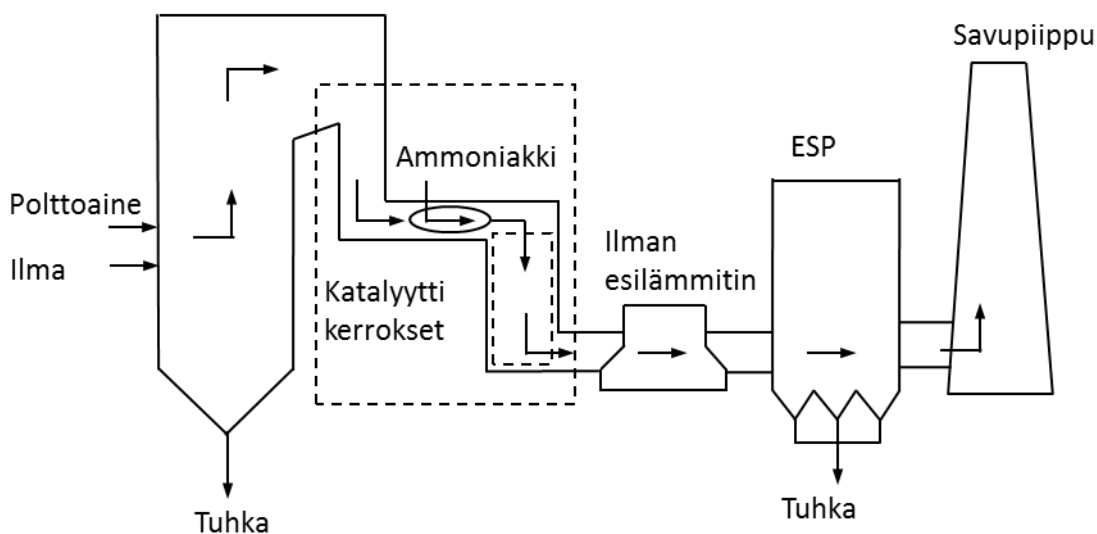
### 12.5.7 Sekundäärimenetelmät

Sekundäärimenetelmissä typenpoisto tapahtuu savukaasuista tulipesän jälkeen. Savukaasuun lisätään ureaa (OC(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>), ammoniakkia (NH<sub>3</sub>) tai jotain muuta kemikaalia. Savukaasujen NO<sub>x</sub> reagoi näiden kanssa muodostaen molekyylylitypeä tai nitraatteja. Yleisimmät menetelmät ovat selektiivinen katalyyttinen menetelmä (SCR) ja selektiivinen ei-katalyyttinen menetelmä (SNCR). Vähemmän käytettyjä menetelmiä ovat hybridi SCR/SNCR ja typen ja rikin yhteispoistojärjestelmä DESONOX. (Wu 2002, 33.)

Tavallisesti SNCR-menetelmää käytetään 200 MW:n laitoksiin saakka ja sitä suuremmissa käytetään yleensä SCR-menetelmää (Nalbandian 2004, 20).

## Selektiivinen katalyyttinen menetelmä

SCR-menetelmä on tehokkain tapa poistaa NO<sub>x</sub>:t savukaasuista ja sillä päästään jopa 95 %:n erotustehokkuuteen. Menetelmä soveltuu matalarikkisille polttoaineille (alle 2 %), koska SO<sub>2</sub> hapettuu katalyytin vaikutuksesta helposti SO<sub>3</sub>:ksi. SO<sub>3</sub> vuorostaan aiheuttaa mahdollisesti korroosiota myöhemmissä vaiheissa, jos se pääsee tiivistymään rikkihapoksi. Katalyytti myös edesauttaa ammoniumsulfaattiyhdisteiden syntymistä, mikä aiheuttaa pinnoille korroosiota ja likaantumista. Menetelmän toimintaperiaate esitetään kuvassa 10. (Raiko et al. 2002, 332 - 333; Wu 2002, 33.)



Kuva 12.8. SCR-menetelmän toimintaperiaate ”kuuma puoli, korkea tuhka”-kytkennällä (Wu 2002, 33).

Kaasumaista ammoniakkia syötetään savukaasuihin 250 - 500 °C:n lämpötilassa. Savukaasut kulkeutuvat tämän jälkeen SCR-reaktoriin, jossa olevat katalyyttikerrokset jouduttavat NO<sub>x</sub>:n pelkistymistä molekyylitypeksi ja vesihöyryksi. Reaktori koostuu hunajakkeno- tai levytyyppisistä katalysaattoripeteistä. Typen oksidien pelkistymiselle optimaalinen toimintalämpötila on 300 - 400 °C. Ureaa voidaan myös käyttää pelkistimenä pienemmässä, alle 50 MW:n kokoluokassa (European Commission 2006, 106). (Wu 2002, 33; Raiko et al. 2002, 332)

Ureaan pohjautuvia prosesseja on kehitetty myös suurempaan kokoluokkaan. Tällöin prosesseissa kuljetetaan ja varastoidaan laitokselle ureaa, joka muunnetaan ammoniakiksi ennen SCR-reaktoriin syöttämistä. Tekniikan etuja ovat urean turvallisuus: helppo kuljettavuus, käsittely sekä paloturvallisuus. Ureajärjestelmä on kuitenkin kalliimpi vaihtoehto kuin perinteinen ammoniakkijärjestelmä. (Wu 2002, 35.)

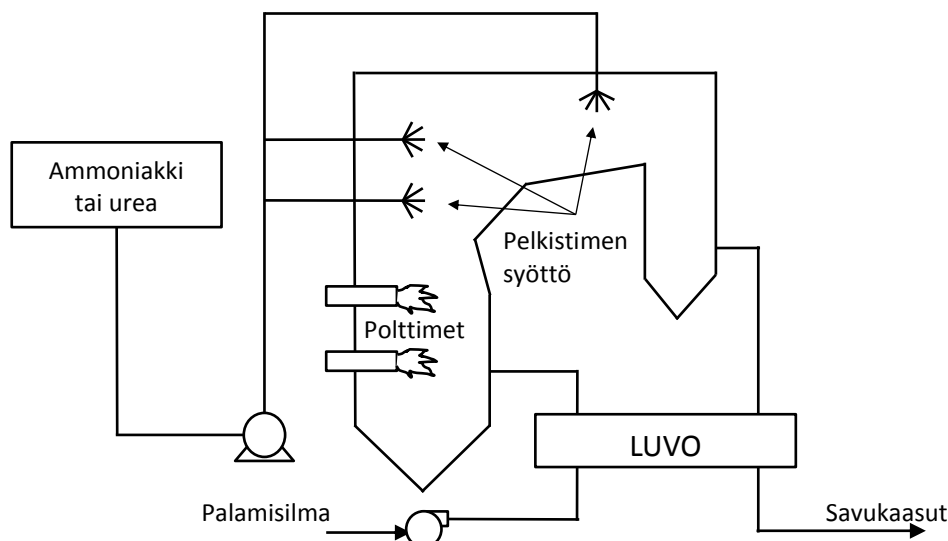
Tyypilliset SCR-reaktorin sijoitusvaihtoehdot ovat ”kuuma puoli, korkea tuhka”- (high-dust), ”kuuma puoli, matala tuhka”- (low-dust), ja ”kylmä puoli, matala tuhka”-kytkennät (tail-end). Kuvassa 10 oleva ”kuuma puoli, korkea tuhka”-kytkentä on yleisin sijoitusvaihtoehto. Siinä SCR-reaktori sijaitsee savukaasukanavassa ennen ilmanesilämmitintä (LUVO) ja sähkösuodatinta. Kytkennässä ei tarvitse lämmittää savukaasuja ennen reaktoria, joten se on kustannustehokas. Sijoitusvaihtoehdon huonot puolet ovat katalyytin kuluminen ja eroosio lentotuhkan vaikutuksesta, mikä puolestaan vähentää NO<sub>x</sub>:n pelkistystehokkuutta. Kytkennän jälkiasennuksessa tulee myös huomioida tilantarve kattilan jälkeen. (Wu 2002, 33; European Commission 2006, 110.)

”Kuuma puoli, matala tuhka”-kytkennässä SCR-reaktori on sijoitettu hiukkassuodattimen jälkeen, jolloin katalyytin kuluminen lentotuhkan vaikutuksesta saadaan poistettua. Näin katalyytin pelkistystehokkuus pysyy hyvänä ja se säilyttää toimintakuntonsa edellistä kytkentää kauemmin. Menetelmä vaatii kuitenkin joko kalliin kuuman puolen ESP:n tai savukaasujenuudelleen lämmityksen optimaaliseen pelkistyslämpötilaan. Tämän takia kytkentä on erityisesti jälkiasennuksena kallis vaihtoehto. (Wu 2002, 33; European Commission 2006, 110.)

”Kylmä puoli, matala tuhka”-kytkennässä reaktori sijaitsee savukaasukanavassa LUVO:n ja ESP:n jälkeen. Tällöin katalyytti kestää kauemmin, mutta saatu taloudellinen etu menetetään, kun savukaasut lämmitetään optimaaliseen pelkistyslämpötilaan. Kytkentä on erityisesti käytössä jälkiasennuksissa, joissa on rajalliset tilat kattilan jälkeen. (Wu 2002, 33.)

### **Selektiivinen ei-katalyyttinen menetelmä**

Typpimonoksidi voidaan pelkistää typeksi lisäämällä ammoniakkia tai ureaa savukaasuihin jo tulipesässä. Tällöin puhutaan selektiivisestä ei-katalyyttisestä menetelmästä, joka on toiselta nimeltään terminen DeNO<sub>x</sub>-prosessi. Erillistä tulipesän jälkeistä reaktoria ei tässä menetelmässä tarvita. Vaikka pelkistysreaktio tapahtuu jo tulipesässä, ei kyseessä ole polttotekninen menetelmä vaan NO<sub>x</sub> pelkistetään savukaasuista. Täten menetelmä lasketaan kuuluvaksi sekundäärimenetelmiin useimmissa lähteissä. Kuvassa 11 esitetään SNCR:n toimintaperiaate. (Raiko et al. 2002, 314 - 315; Wu 2002, 40.)



Kuva 12.9. SNCR-prosessin yksinkertaistettu toimintakaavio (Wu 2002, 40).

Lämpötila-alue pelkistysreaktiolle on 850 - 1000 °C. Kapea lämpötila-alue onkin menetelmän heikkous. Liian korkeassa lämpötilassa ammoniakki alkaa reagoimaan typpimonoksidiksi ja liian matalassa lämpötilassa NH<sub>3</sub>:n hajoaminen hidastuu aiheuttaen haitallisia NH<sub>3</sub>- päästöjä. Menetelmän tyypillinen erotustehokkuus on 30 - 50 %, joten sillä ei päästä yhtä korkeisiin erotustehokkuuksiin kuin SCR-menetelmällä (European Commission 2006, 116). Tehokkuus on kuitenkin riippuvainen kattilatyypistä ja olosuhteista, joten esimerkiksi optimaalisissa kiertoleijukattila -olosuhteissa jopa 90 %:n erotustehokkuus on mahdollinen (Mahmoudi et al. 2010, 1400). Menetelmä on halpa ja yksinkertainen, joten sitä on helppo käyttää jonkun muun typenpoistomenetelmän lisäksi. (Raiko et al. 2002, 315.)

Typenoksiedeita syntyy kolmella eri tavalla poltettaessa polttoaineita. Syntymekanismit ovat terminen (thermal) NO<sub>x</sub>, polttoaine (fuel) NO<sub>x</sub> ja nopea (prompt) NO<sub>x</sub>. Poltossa muodostuvista NO<sub>x</sub>-päästöistä typpimonoksidi (NO) käsittää noin 95 % ja typpidioksidi (NO<sub>2</sub>) noin 5 %. Typpimonoksidi hapettuu ilmakehässä edelleen typpidioksidiksi, joka aiheuttaa happamaa laskeumaa sekä osallistuu saastesumun ja otsonin syntymiseen suurkaupungeissa.

Dityppioksidia eli ilokaasua (N<sub>2</sub>O) voi syntyä leijukattiloissa käytettäessä matalia palamislämpötiloja. N<sub>2</sub>O:a ei juurikaan muodostu muissa polttomenetelmissä vaan päästöt ovat yleensä selvästi alle 5 ppmv (volume parts per million) verrattuna esim. hiilen leijupoltossa syntyvään 10 - 150 ppmv. Ilokaasu tuhoaa yläilmakehän otsonikerrosta. Muut typpiyhdisteet muodostavat hyvin pienen osan syntyvistä typenoksiedeista.

Polttoilman sisältämästä typestä osa reagoi hapen kanssa muodostaen typpimonoksidia, tätä reaktiota kutsutaan Zeldovichin mekanismiksi. Reaktion lähtökomponenttina tarvittavien happiatomien määrä riippuu lämpötilasta. Tästä syystä mekanismilla syntyvää typpimonoksidia kutsutaan yleisesti nimellä terminen NO<sub>x</sub>. Termisen NO<sub>x</sub>:n muodostumisnopeus on käytännössä merkityksetön alle 1400 °C:ssa. Lämpötilan noustessa yli 1600 °C:n muodostuu termistä NO<sub>x</sub>:ta jo merkittäviä määriä.

Pöyry (2009) on selvityksessään arvioinut olemassa oleviin laitoksiin sovellettujen päästövähennystekniikoiden kustannuksia. Kustannukset rikkidioksidi-, typenoksidi- ja hiukkaspäästöjen vähentämiseksi on esitetty seuraavassa taulukossa.

Taulukko 12.4. Päästöjen vähentämisteknologioita, niillä saavutettavia päästötasoja ja ominaiskustannuksia olemassa olevissa laitoksissa. (Pöyry)

Teknologia	Päästökomponeentti	Tyypilliset kohteet	Saavutettava päästötaso [mg/m <sup>3</sup> (n)] tai alenema	Kustannukset	
				Invest, [€/kWpa]	Käyttökust, [€/MWh pa]
Primäärikeitin (ilmajärjestelyt ym.)	NO <sub>x</sub>	Petikattilat	~ 5 - 20 %	0,3 - 4	-
Low-NO <sub>x</sub> -polttimet	NO <sub>x</sub>	Kaasukattilat	100	5 - 7	-
Dry-low-NO <sub>x</sub> -polttimet	NO <sub>x</sub>	Kaasuturbiinit	20	15 - 20	-
Low-NO <sub>x</sub> -polttimet + ilmajärjestelyt	NO <sub>x</sub>	Hiilen pölypoltto	400	5 - 6	-
Vaihto POK + low-NO <sub>x</sub> -polttiinet	SO <sub>2</sub> / NO <sub>x</sub> / hiukkaset	POR-kattilat	200 / 200 / 20	5 - 7	22
SNCR	NO <sub>x</sub>	Petikattilat	~ 20 - 50 %	7 - 13	0,25 - 0,5
SCR	NO <sub>x</sub>	Pölypolttolaitokset	~ 70 %	35 - 70	0,45 - 1,3
Kalkinsoyöttö petän	SO <sub>2</sub>	Petikattilat (turve)	~ 20 - 50 %	4 - 8	0,2 - 0,3
Pesuri	SO <sub>2</sub> / hiukkaset	Petikattilat (turve)	~ 60 % / 20	35 - 70	0,4 - 0,8
Märkä pesuri perään (kalkimaitopesuri)	SO <sub>2</sub> / hiukkaset	Hiili (nyt puolikuiva rikinpoisto)	200 / 20	50 - 70	0,4 - 0,7
Märkä rikinpoisto puolikuivan tilalle	SO <sub>2</sub> / hiukkaset	Hiili (nyt puolikuiva rikinpoisto)	200 / 20	100 - 200	0,1 - 0,9
Kalkinlisäys tai käytettävyyden parantaminen	SO <sub>2</sub>	Hiili (nyt märkämenetelmä)	200	0,5 - 3	0,03 - 0,05
Letkusuodatin	hiukkaset	Kiinteä polttoaine	20	15 - 25	0,3 - 0,4
Sähkösuodatin	hiukkaset	Kiinteä polttoaine	20	15 - 25	0,1 - 0,15
Lisäkäntä sähkösuodatin-tieteen	hiukkaset	Kiinteä polttoaine	20	8 - 13	0,03 - 0,06
Sähkösuodattimen parannus	hiukkaset	Kiinteä polttoaine	20	3 - 5	-
Märkä sähkösuodatin	hiukkaset	Kiinteä polttoaine	20	30 - 50	0,13 - 0,21

## 12.6 Pienhiukkasten puhdistus

Suomen hiukkaspäästöjen suurin yksittäinen lähde on pienen mittakaavan poltto. Pienissä tulisijoissa ja kattiloissa ei tyypillisesti ole hiukkaspäästöjä rajoittavaa puhdistintekniikkaa, ja lisäksi erityisesti kotitaloustulisijoissa polttoaineiden laatu sekä polttotavat voivat vaihdella voimakkaasti. Huonolaatuisessa palamisessa hiukkaspäästöt voivat olla monikymmenkertaiset verrattuna puhtaaseen palamiseen. Muita merkittäviä hiukkaspäästöjen

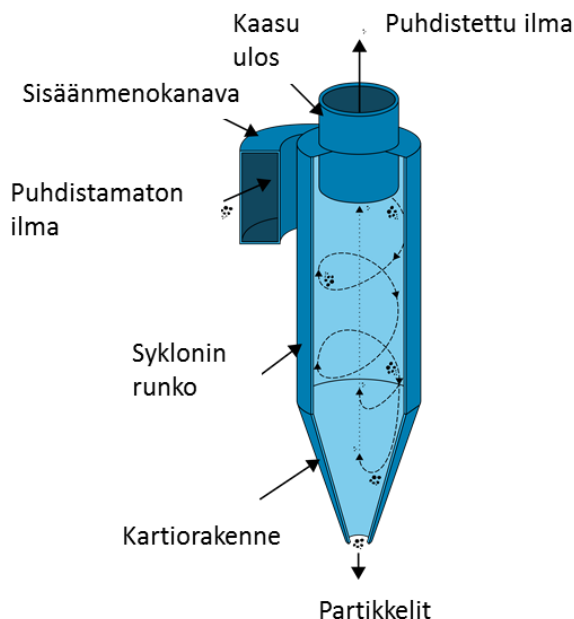
lähteitä Suomessa ovat liikenne, energiantuotanto ja teollisuuden prosessipäästöt. Suomessa vaikeimmat korkeiden hiukkaspitoisuuksien episoditilanteet aiheutuvat joko kevätaikaisesta katujen pölyämisestä tai kaukokulkeumatilanteista muualta Euroopasta.

Voimalaitoskäyttöön tarkoitettujen hiukkasten vähennysmenetelmät voidaan jakaa neljään eri luokkaan niiden toimintaperiaatteen mukaan. Luokat ovat dynaamiset erottimet, kuitusuodattimet, sähkösuodattimet ja märkäpesurit. Energiantuotannon ja liikenteen pienhiukkaspäästöjä voidaan vähentää kehittämällä tuotanto- ja moottoritekniikkaa ja ohjaamalla tuotantoa ja liikennevaihtoehtoja sellaisiin muotoihin, joiden ominaispäästöt ovat pieniä.

Dynaamiset erottimet toimivat painovoimalla tai keskipakovoimalla, joiden avulla ne voidaan jakaa sedimentaatiokammioihin ja lamellierottimiin sekä sykloneihin. Sedimentaatiokammio ja lamellierotin toimivat painovoiman avulla. Painovoimaerottimissa suurikokoinen hiukkanen painuu painovoiman vaikutuksesta pohjalle muun savukaasuvirran jatkaessa kammion läpi. Painovoimaerottimet toimivat vain suurikokoisille hiukkasille, 60 µm hiukkasten erotustehokkuus 65 - 100 % hieman käytetystä erottimesta riippuen ja 10 µm tehokkuus on vain 3 %:n luokkaa (De Nevers 2000, 253). Painovoimaerottimet ovat edullisia ja soveltuvat hyvin esierottimina, jotta kalliimmat laitteet eivät rikkoudu tai tukkeudu suurikokoisista hiukkasista. (Ohlström et al. 2005, 18.)

### **12.6.1 Sykloni**

Syklonit toimivat keskipakovoimalla, jolla on mahdollista saada hiukkasiin painovoimaa suurempi voima. Näin ollen erotustehokkuus on parempi pienemmille hiukkasille, 6,6 µm hiukkasille tehokkuus on painovoimaerottimia vastaava 65 - 100 % (De Nevers 2000, 259). Syklonit voidaan jakaa toimintaperiaatteen mukaan vastavirta- ja läpivirtasykloneihin, joista vastavirtasyklonit voidaan jakaa savukaasun sisäänmenovirtauksen perusteella aksiaalisiin ja tangentialisiin sykloneihin. Aksiaalisen vastavirtasyklonin toimintaperiaate esitetään kuvassa 12. (Ohlström et al. 2005, 18 - 19.)



Kuva 12.10. Aksiaalisella sisäänvirtauksella toimiva vastavirtasykloni.

Kuvassa 12.10 savukaasut tulevat syklonille akselin suuntaisesti ja kiinteät ohjaussiivet synnyttävät pyöriävän liikkeen savukaasuille. Hiukkaset ajautuvat pyörimisliikkeen synnyttämän keskipakoisvoiman ja hitausvoimien takia virtauksen ulkoreunaan, jossa ne osuvat syklonin seinään ja liukuvat seinää pitkin pohjan aukosta keräyssäiliöön. Läpivirtaussykloni on vastaava,

mutta puhdistettu kaasu poistuu vastakkaisesta päästä eikä vaihda suuntaa kuten yllä olevassa kuvassa. Läpivirtaussyklonia käytetään yleisesti voimalaitoksissa esierottimena, koska siinä on pienet painehäviöt ja se soveltuu suurille tilavuusvirroille.

Sykloneita on 10 cm:n halkaisijasta usean metrin halkaisijoihin, mutta erotuskyky heikkenee halkaisijan kasvaessa johtuen dynamiikasta. Tästä johtuen savukaasukanavaan voidaan asentaa useita pienempiä sykloneita rinnan, jolloin ne muodostavat ns. multisyklonin. Multisyklonilla voidaan puhdistaa suuria tilavuusvirtoja pienen syklonin erotustehokkuudella. Multisykloneiden tukkeutumisriski on suuri, joten niiden käyttö on riskialtista suuren pöly- tai kosteuspitoisuuden omaavilla savukaasuilla.

### 12.6.2 Syklonin mitoitus

Tässä kappaleessa on esitetty yksinkertainen korrelaatio syklonin mitoitukselle. Seuraavassa kuvassa on esitetty sykloniin liittyviä dimensioita.

$D_o$  syklonin halkaisija

$$H = 0.5 D_o$$

$$W_i = 0.25 D_o$$

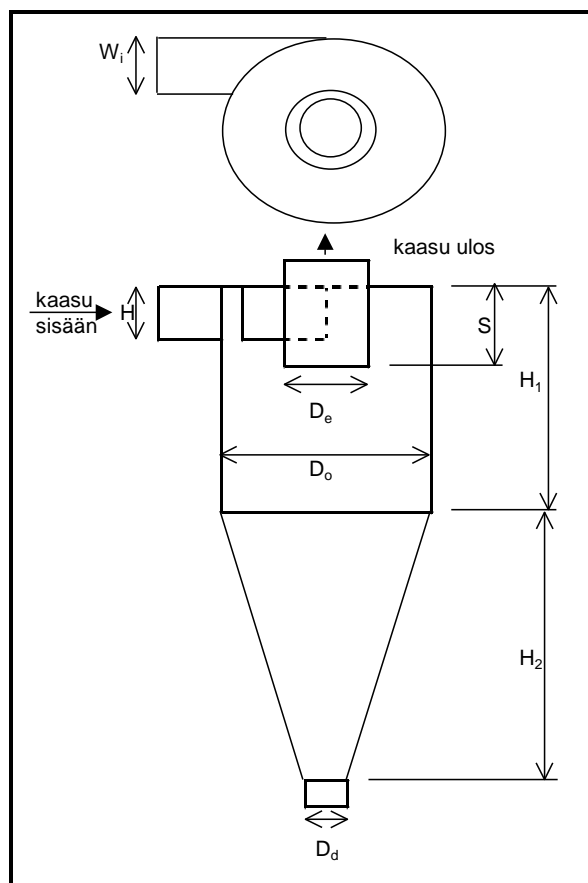
$$D_e = 0.5 D_o$$

$$H_1 = 2 D_o$$

$$H_{\text{tot}} = H_1 + H_2 = 4 D_o$$

$$S = 0.625 D_o$$

$$D_d = 0.25 D_o$$



Kuva 12.11. Standardisykloni

Leith ja Licht ovat kehittäneet hyvän syklonin erotusastetta kuvaavan mallin. Edellisessä kuvassa esitetylle standardisyklonille erotusaste voidaan mallin mukaan laskea kaavasta

$$\eta(d_p) = 1 - e^{-Md_p^N} \quad (12.2)$$

Kaavassa esiintyvä  $N$  saadaan yhtälöistä

$$N = \frac{1}{n+1} \quad (12.3)$$

missä

$$n = 1 - \left(1 - 0,67 D_o^{0,14}\right) \left(\frac{T}{283}\right)^{0,3} \quad (12.4)$$



sekä  $M$  yhtälöstä

$$M = 2 \cdot \left[ \frac{KQ}{D_o^3} \frac{\rho_p (n+1)}{18\mu} \right]^{N/2}. \quad (12.5)$$

Kaavoissa

$d_p$	hiukkashalkaisija	(cm)
$D_o$	syklonin halkaisija	(m)
$T$	lämpötila	(K)
$K$	geometrinen muotokerroin	(standardisyklonille arvo on 402,9)
$Q$	kaasun tilavuusvirta	(m <sup>3</sup> /s)
$\rho_p$	hiukkasten tiheys	(g/cm <sup>3</sup> )
$\mu$	kaasun dynaaminen viskositeetti	(g/cm s)

Tarkkaa matemaattista mallia syklonin painehäviölle ei ole kehitetty, joten luotettavimmat tulokset saadaan kokeellisesti yhdenmuotoisten prototyyppien avulla. Syklonin ominaispainehäviöön vaikuttavat

- kaasun paisuminen sen virratessa syklonikammioon,
- pyörteisyydestä aiheutuva kineettisen energian muutos,
- seinämien kitkahäviöt ja
- kaasun poistoaukon poikkipinta-alan supistuminen /7/.

Syklonin painehäviö esitetään yleensä painehäviökertoimen  $\Delta H$  avulla. Painehäviö saadaan tällöin yhtälöstä

$$\Delta p = \Delta H \left( \frac{1}{2} \rho_g \cdot u_i^2 \right)$$

Kaavassa  $\rho_g$  on kaasun tiheys yksikössä kg/m<sup>3</sup> ja  $u_i$  on tulonopeus yksikössä m/s.

Painehäviökertoimen on vakio tietylle syklonille, mutta painehäviö on verrannollinen virtausnopeuden neliöön. Eli painehäviö kasvaa voimakkaasti nopeuden noustessa, samalla erotusaste paranee. Painehäviökertoimelle on useita korrelaatioita, joista neljä on esitelty seuraavalla sivulla.

**Shepherdin korrelaatio**

$$\Delta H = 16 \frac{H \cdot W_i}{D_e^2}$$

**First:in korrelaatio**

$$\Delta H = \frac{H \cdot W_i}{D_e^2} \left[ \frac{24}{\left( \frac{H_1(H_{\text{tot}} - H_1)}{D^2} \right)^{1/3}} \right]$$

**Stairmandin korrelaatio**

$$\Delta H = 1 + 2\Phi^2 \left( \frac{2(D_o - W_i)}{D_e} - 1 \right) + 2 \left( \frac{4HW_i}{\pi D_e^2} \right)^2$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_e^2) + \pi D_o H_1 + p D_e S + \frac{\pi}{2} (D_o + D_d) \left( (H_{\text{tot}} - H_1)^2 + \left( \frac{D_o - D_d}{2} \right)^2 \right)^{1/2}$$

$$\Phi = \frac{\left( \frac{D_e}{2(D_o - W_i)} \right)^{1/2} + \left( \frac{D_e}{2(D_o - W_i)} + \frac{4G^* A}{HW_i} \right)^{1/2}}{\frac{2G^* A}{HW_i}}$$

$$G^* = 0,005$$

Paine p on yksikössä Pascal.

**Barth:in korrelaatio**

$$\Delta H = \left( \frac{4HW_i \Theta}{\pi D_e^2} \right)^2 \varepsilon$$

$$\alpha^* = 1 - \frac{1.2 \cdot W_i}{D_o} \text{ ja } \lambda = 0.02$$

$$\Theta = \frac{\pi \cdot D_e \cdot (D_o - W_i)}{4 \cdot H \cdot W_i \cdot \alpha^* + 2 \cdot (H_{\text{tot}} - S) \cdot (D_o - W_i) \cdot \pi \cdot \lambda}$$

$$\varepsilon = \frac{D_e}{D_o} \left( \frac{1}{(1 - 2\Theta(H_{\text{tot}} - S)(\lambda / D_e)^2) - 1} \right) + 4.4 \cdot \Theta^{-2/3} + 1$$

### 12.6.3 Sähkösuodattimet

Sähkösuodattimet (ESP eli electrostatic precipitator) ovat käytetyin hiukkaserotinmenetelmä ja ne muodostavat noin 70 % käytetystä tekniikasta polttolaitoksissa. ESP:llä on pieni painehäviö, hyvä erotuskyky myös pienille (alle 1 µm) hiukkasille ja se kykenee käsittelemään suuria tilavuusvirtoja ja pölypitoisuuksia. Sähkösuodattimilla päästään jopa yli 99,8 % erotustehokkuuteen.

Erotusasteen minimi on 0,1 - 1 µm hiukkaskoossa, joista läpi pääsee jopa 10 % hiukkasista. Pienet alle 1 µm hiukkaset ovat terveydelle kaikkein haitallisimpia. Tavallisesti käytössä on kuiva ESP, mutta myös märkä ESP on mahdollinen. ESP:n toimintaperiaate esitetään kuvassa 12.12.

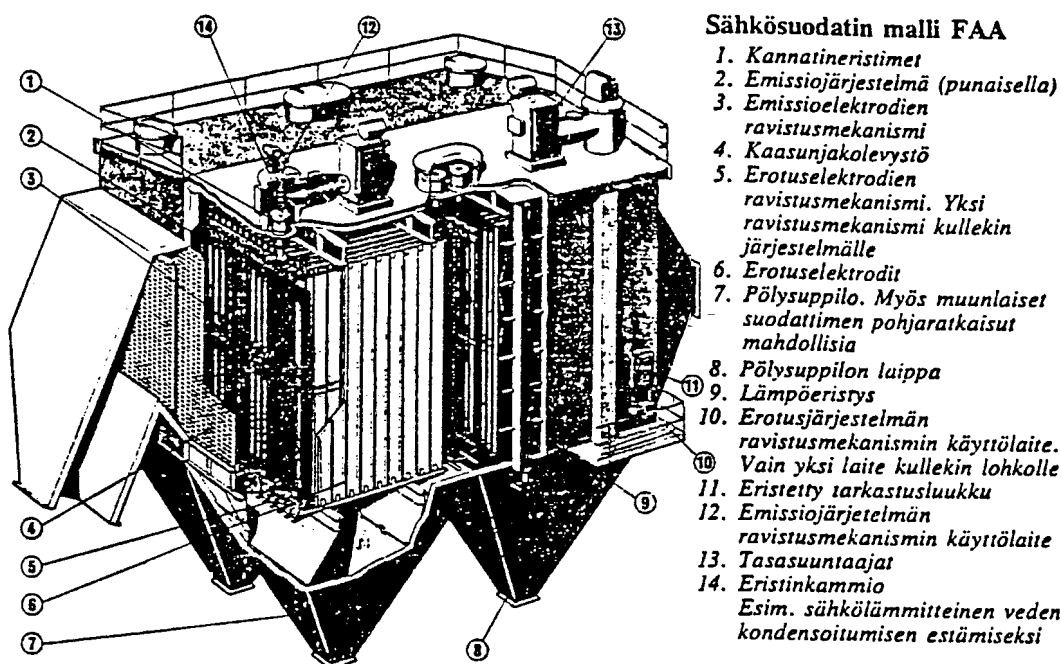
*Kuva 12.12. ESP:n toimintaperiaate (Soud 1995, 15).*

ESP:n toiminta voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: partikkelin varaaminen koronapurkauksella, partikkeleiden kerääminen positiiviselle keräinelektrodille ja keräinelektrodin pinnan puhdistaminen. ESP:ssä varauselektrodina on ohut lanka, jonka lähelle muodostuu sähkökenttä. Voimakkaan sähkökentän aiheuttama koronapurkaus synnyttää ionivirran keräinlevyyn päin, jolloin savukaasun partikkelit varautuvat ja ajautuvat keräinelektrodiin. Keräinlevyt puhdistetaan mekaanisesti aika ajoin, jotta niille ei muodostu liian paksua likakerrosta. Likakerros heikentää erotustehokkuutta, koska likakerros toimii keräinelektrodin pinnassa eristeenä. Märkä ESP toimii muutoin samalla lailla, mutta keräinelektrodi puhdistetaan pesemällä se nesteellä

ESP:n erotustehokkuus on paras, kun savukaasupartikkeleiden ominaisvastus eli resistiivisyys  $\rho$  on 107 - 2·1010 Ω·cm. Jos partikkeleiden ominaisvastus on liian suuri, muodostavat ne eristävän kerroksen elektrodille, mikä heikentää koronapurkausta. Liian matalalla ominaisvastuksella partikkelit taas menettävät varauksensa helposti ja saattavat irtota keräinelektrodilta takaisin savukaasuvirtaan. (European Commission 2006, 56.) ESP:t voidaan jakaa kuumaja- ja kylmäpuolisuodattimiin. Kuumapuolisuodatin sijaitsee ennen LUVO:a ja sen toimintalämpötila on 320 - 400 °C. Kylmäpuolisuodatin sijaitsee LUVO:n jälkeen, jolloin toimintalämpötila on 120 - 150 °C. Kylmäpuolisuodatin on näistä yleisemmin käytössä, koska kuumapuolisuodattimen materiaalit ovat kalliimpia (Nalbandian 2004, 13). (Ohlström et al. 2005, 21.)

## Sähkösuodin

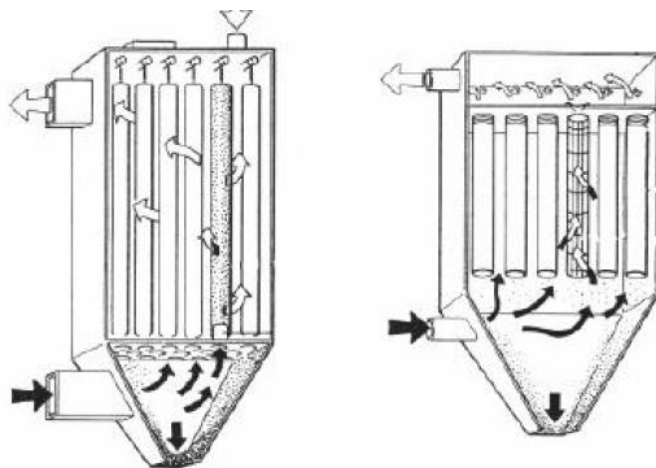
Pölypitoinen savukaasu johdetaan maadoitettujen kokoojalevyjen ja korkeajännitteisten (tasajännite 50...80 kV) emissioelektrodien väliin. Emissioelektrodille syntyy nk. Koronapurkaus, joka varaa kaasun pölyhiukkaset negatiivisella varauksella, jolloin ne ajautuvat sähköisten voimien vaikutuksesta kokoojalevyille. Kokoojalevyjä puhdistetaan aika ajoin tärisyttämällä, jolloin pöly putoaa suodattimen pohjalla oleviin siiloihin. Sähkösuodin toimii lämpötila-alueella 100...400 °C.



Kuva 12.13. Sähkösuodin.

### 12.6.4 Kuitusuodattimet

Kuitusuodattimia käytetään tyypillisesti, kun vaaditaan hyvää erotustehokkuutta, tai kun ESP:n käytöstä tulisi pölyn ominaisuuksien takia liian kallis. Esimerkiksi pölyn resistiivisyys voi olla liian korkea tai matala, jolloin kuitusuodattimen käyttö on taloudellisesti kannattavampaa. Myös matalilla pölypitoisuuksilla kuitusuodatin on taloudellisempi erotusmenetelmä. Kuitusuodattimen erotustehokkuus pienille hiukkasille on 99 % ja kokonaiserotustehokkuus kaikille hiukkasosille on 99,95 % (Zhu 2003, 32). Kuitusuodattimissa on kuitenkin korkeammat painehäviöt kuin ESP:ssä. Erilaisia kuitusuodattimia on esitetty kuvassa 12.14. (Ohlström et al. 2005, 24 - 25.)



Kuva 12.14. Erilaisia voimalaitoksen letkutyyppisiä kuitusuodattimia: vasemmalla in side out –rakenne ja oikealla outside in -rakenne (Ohlström et al. 2005, 26).

Kuvasta 12.14 nähdään, että kuitusuodatin koostuu yhdestä tai useammasta kuitusuodatinpussi tai -letku rivistä, joiden läpi savukaasu viedään. Kuvassa vasemmalla oleva inside out rakenteisessa suodattimessa savukaasut kulkevat suodatinelementtien sisältä ulos. Kuvassa oikealla puolestaan olevassa outside in -rakenteessa savukaasut virtaavat ulkoa suodatinelementteihin ja suodatinelementit ovat varustettu tukirakenteilla. Voimalaitosten suodattimet ovat usein ns. letkusuodatin-tyyppisiä. Kuitusuodatin on sijoitettu tyypillisesti LUVO:n jälkeen ja sen toimintalämpötila on 120 - 180 °C. Kun hiukkasia on kerääntynyt suodattimen sisälle tarpeeksi, se tyhjennetään. Kuitusuodattimet voidaan jakaa tyhjennystavan mukaan kolmeen eri luokkaan pulssi-suihku-, ravistus- ja käänteisilma tyhjennyksellä toimiviin suodattimeen. (Zhu 2003, 32.) Kuitusuodattimen käyttö- ja huolto kustannukset ovat ESP:n vastaavia korkeammat. Suodatinmateriaali tulee vaihtaa 2 - 5 vuoden välein ja suodattimen vaihtohinta on vähimmillään noin 10 % investointikustannuksesta. (European Commission 2006, 60.)

### Letkusuodin

Letkusuotimessa savukaasu johdetaan letkumaisen suodatinkankaan läpi, jolloin hiukkaset jäävät suodatinkankaaseen. Suodatin puhdistetaan johtamalla sen läpi aika ajoin paineilmapulsseja, jolloin kiintoainne putoaa suodattimen pohjalla olevaan siiloon. Myös erilaisia suodattimien ravustuslaitteistoja käytetään kertyneen pölykerroksen poistamiseen. Letkusuotimet sopivat hyvin käytettäväksi myös rikinpoiston yhteydessä, jolloin merkittävä osa rikinsidontaa tapahtuu vielä suodatinkankaan pinnalle kertyneessä pölykerroksessa.

### 12.6.5 Märkäpesurit

Märkäpesurit voidaan jakaa kolmeen ryhmään niiden käyttötarkoituksen perusteella: rikinpoistopesurit, lämmön talteenottopesurit ja hiukkasten poistoon tarkoitetut pesurit. Suomessa näistä on yleisimmin käytössä rikinpoistoon tarkoitetut pesurit, joissa partikkelit poistuvat samalla SO<sub>2</sub>:n kanssa. Ne ovat kuitenkin toisinaan sijoitettu vasta varsinaisen hiukkaserottimen jälkeen jolloin pölypitoisuus on matala. Muun tyyppiset hiukkaserottimet ovat Suomessa harvinaisia. (Ohlström et al. 2005, 26.) Märkäpesurit voidaan myös jaotella niiden toimintaperiaatteen mukaan venturipesureihin ja pesutorneihin. Käytetyimmässä venturipesurissa neste syötetään savukaasuihin tasaisesti. Nesteen sekainen savukaasu virtaa suppeneva-laajenevasuuttimen läpi, jossa virtaus kiihtyy. Kiihtyessään neste sumuuntuu muodostaen pisaroita. Partikkelit jäävät painavampien pisaroiden sisään, jolloin niiden erotus on helpompaa. Pesutorneissa pisarat ruiskutetaan suuttimilla vastavirtaan nousevaan savukaasuvirtaukseen. Venturipesureilla savutetaan 99 % erotustehokkuus ja muilla pesureilla 80 % erotustehokkuus. Tornipesureihin verrattuna venturipesureilla on merkittävästi suurempi energiankulutus ja ne voivat tukkeutua partikkeli määrän kasvaessa poikkeuksellisesti. (Raiko-dippa; EC-R Inc. 1998) Märkäpesureiden heikkouksia ovat kuitenkin korkeat painehäviöt, korrosio ja eroosio sekä jätevedenpuhdistuskustannukset. (Ohlström et al. 2005, 26, 28; European Commission 2006, 62.)

Taulukkoon 12.5. on listattu eri pienhiukkasten hallintalaitteiden edut ja haitat

Taulukko 12.5. Pienhiukkasten puhdistuslaitteiden edut ja haitat.

Puhdistuslaite	Edut	Haitat
Sykloni	yksinkertainen rakenne, alhaiset hankinta- ja käyttökustannukset	korkea partikkelireduktio vaatii pienen syklonin, tukkeutuminen tahmaisen savukaasun tai runsaan partikkelimäärän takia
Sähkösuodin	tehokas partikkelisidonta, sopii pienille partikkeleille, voi käsitellä suuria savukaasutilavuuksia, pieni painehäviö	tahmeiden ja märkien partikkelien kertyminen pinnoille, reduktio riippuu partikkelin resistiivisyydestä, räjähdysvaara, re-emissio
Kuitusuodatin	joustava eri savukaasutilavuuksille ja partikkelityypeille, hyvä sidontahyötysuhde, edesauttaa rikinsidontaa kuivalla menetelmällä	vaatii kuivan virtauksen, räjähdys- ja palamisvaara, suuri koko, savukaasukoostumus ja lämpötila voivat vahingoittaa kuituja
Märkäpesuri	re-emissio hyvin epätodennäköistä, soveltuu kuumalle ja märälle savukaasulle, voi sitoa useita päästöjä	happojen korroosio, suuri energiatarve (käyttökustannukset), pesuveden regenerointi ja lietteen käsittely

## 12.7 Primäärienergiatarpeen alentaminen

Primäärienergian kulutuksen alentamisella on paitsi kasvihuonekaasun  $CO_2$  pitoisuutta alentava vaikutus niin myös muiden pienempipitoisten komponenttien väheneminen kuten hiilimonoksidin  $CO$ , rikkidioksidin  $SO_2$  jne. Primäärienergia kulutusta voidaan alen-  
taa mm. seuraavin keinoin:

- Lämpöhäviöt. Käyttämällä riittävää ja oikein suunniteltua eritystä voidaan rakennuksen ominaisenergian kulutusta helposti laskea arvosta  $200 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  arvoon  $100 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ . Lisäksi optimoimalla energian jakelua ja kuormitusta voidaan saada vielä lisäsäästöä jopa  $60 \text{ kWh/m}^2$ .
- Lämmön talteenotto. Poistuvan prosessilämmön, kuten savukaasujen sisältämän, talteen ottaminen tuottaa merkittävää säästöä primäärienergia kulutukseen (esim. palamisilman esilämmittäminen savukaasuilla).
- Esilämmitys. Tämä keino on yleisesti käytetty kaiken tyyppisissä voimakattiloissa lämmittämällä palamisilmaa savukaasuilla.
- Kondenssilämpö. Moderneissa kotitalouskattiloissa voidaan savukaasujen sisältämä vesihöyry tiivistää käyttämällä ilma-ilma lämmönvaihdinta, jolloin kondensoituessa vapautuva latentti lämpö voidaan hyödyntää.
- Matalan lämpöarvon omaava höyry.

## 12.8 Teollisuuspäästödirektiivin vaikutukset Suomessa

Olemassa olevien voimalaitosten savukaasujen puhdistuslaitteilla on edessään muutoksia, kun nykyiset päästöraajat tiukkenevat jo vuoden 2016 alusta. Erityisesti typen oksidien, rikkidioksidin ja hiukkasten päästöraja-arvoja kiristetään. Muutokset kiristyneiden päästöarvojen saavuttamiseksi tulee tehdä perustuen asiantuntevaan kokonaistarkaste-  
luun. Valtioneuvoston asetus suurten polttolaitosten päästöjen rajoittamisesta (suuret polttolaitokset, SuPo, 936/2014) astuu voimaan IE-direktiivin (teollisuuspäästödirektiivi, 2010/75/EU) mukaisesti vuonna 2016. Erityisesti savukaasujen sisältämien typen oksidien, rikkidioksidin ja hiukkasten päästöraja-arvoja kiristetään, minkä lähtökohtana on parhaan käyttökelpoisen tekniikan (BAT) ja niin sanottujen BAT-päätelmien asettamien toimialakohtaisten päästötasojen soveltaminen. Tämä onkin ehkä merkittävin muutos aiempaan SuPo-asetukseen verrattuna, samalla kun direktiivin soveltamisala laajenee kaikkiin vähintään 15 megawatin kattiloihin, mikäli niiden yhteenlaskettu kokonaispolttoinen teho ylittää 50 megawattia ja savukaasut johdetaan samaan ulkopiippuun.



Epävarmuutta suurten polttolaitosten osalta luo se, että kyseisiä BAT-päätelmiä ei ole vielä julkaistu. Ne voivat asettaa lisää tiukennuksia teollisuuspäästädirektiivin liitteessä V mainittuihin vähimmäistasoihin nähden, ja niiden voimaantuminen tulee ajoittumaan neljän vuoden päähän tulevasta julkaisemisajankohdasta.

Yhdessä eri joustomahdollisuuksien kanssa yksittäistä olemassa olevaa voimakattilaa koskevat uudet päästöraja-arvot voivatkin astua voimaan vasta jopa vuoden 2023 alussa, kun huomioidaan esimerkiksi direktiivin sisältämä kaukolämpöpöikkeitä. Tiukentuvien päästömääräysten täyttäminen edellyttää joka tapauksessa muutoksia käytettävän polttoaineen laatuun ja/tai investointeja sovellettaviin poltto- ja puhdistustekniikoihin.

Suomessa vuonna 2016 on yhteensä n. 300 energiantuotantoyksikköä, jotka lasketaan suoraan tai piipputulkinnan kautta yli 50 MW:n laitoksena teollisuuspäästädirektiiviin. Suuret polttolaitokset muodostavat 65 % hiukkas-, 85 % rikkidioksidi- ja 88 % typenoksidipäästöistä, mitkä syntyvät Suomen energiantuotantoyksiköistä. (Makkonen 2013, 14.) Vaikutusten arviointia hankaloittaa uuden BREF-asiakirjan oleminen vasta luonnosvaiheessa. Pöyryn (2009) tutkimuksen mukaan investointikustannukset ovat 637 M€. Tässä on kuitenkin huomioituna ainoastaan ilman piipputulkintaa olevat laitokset, joita on 137 kappaletta. Investointikustannusarvion ulkopuolelle jää siten noin 160 kattilaa, jotka piipputulkinnan myötä kuuluvat IE-direktiiviin. Pöyry on arvioinut kustannusvaikutuksiksi kokonaisuudessaan Suomessa 0,7 - 3,5 miljardia euroa.

Olemassa oleville laitoksille uudet päästöraajat astuivat voimaan 1.1.2016 ja osa voimalaitoksista on jo tehnyt tarpeelliset investoinnit puhdistusjärjestelmien parannukseen. Suomen laitoksista 63 kuuluu kansalliseen siirtymäsuunnitelmaan, jossa laitosten päästöjen on vähennyttävä taulukon 5 mukaisesti (YMp 2016, 3).

Taulukko 12.6. Kansallisen siirtymäsuunnitelmaan kuuluvien laitosten yhteenlasketut rikkidioksidin, typenoksidien ja hiukkasten päästöjen enimmäismäärät tonneina vuodessa.

Päästö	2016	2017	2018	2019	2020 (6 kk)
SO <sub>2</sub> [t/a]	31273	26016	20760	15503	7752
NO <sub>x</sub> [t/a]	32500	28056	23612	19168	9584
PM [t/a]	3764	2984	2204	1424	712

## 13 ILMANSAASTEIDEN LEVIÄMINEN ILMAKEHÄSSÄ

Ideaalitilanteessa pystytään ennustamaan pitoisuudet tietyistä päästölähteestä tietyllä säällä ja paikalla sekä tietyssä aikana, jota todellisuudessa ei näin kuitenkaan pystytä tekemään. Tässä luvussa esitetään sekä melko yksinkertaisia että monimutkaisempiakin malleja, jotka kaikki ovat yksinkertaistuksia todellisuudesta. Tässä kappaleessa esitellyt mallit perustuvat yksinkertaisiin massataseisiin. Yleinen tasapainoyhtälö pätee tietylle joukolle rajoja, jolloin voidaan kirjoittaa massavirroille tase

$$S_m = Q_{in} - Q_{out} + \Delta Q_f - \Delta Q_r \quad (13.1)$$

jossa  $S$  on nettomuutos ja alaindeksit  $f$  ja  $r$  viittaavat muodostumiseen ja häviämiseen. Kaikki mallit pätevät kerrallaan yhteen saastekomponenttiin. Useita malleja voidaan soveltaa monille komponenteille, mutta niitä pitää käyttää erikseen komponentti kerrallaan.

### 13.1 Mallityypit

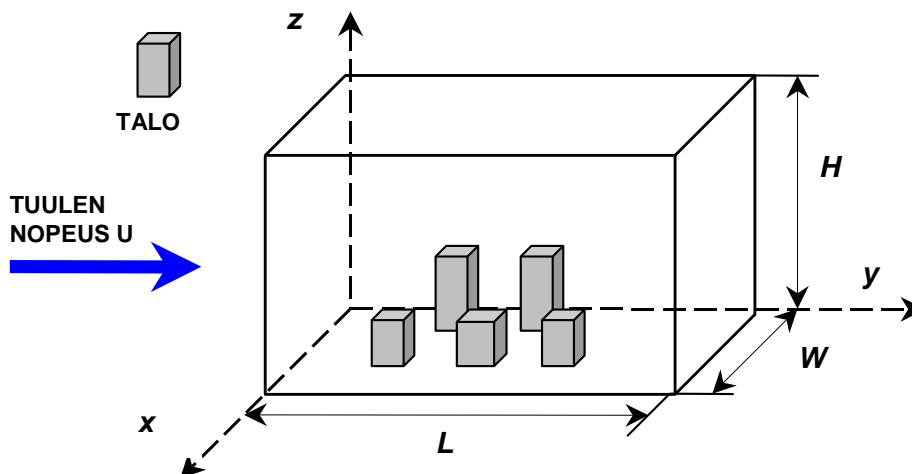
Tarjolla olevien leviämismallien kirjo on hyvin laaja. Mallien alueellinen kattavuus ja tarkkuus sekä ajallinen erottelukyky vaihtelevat paljon samoin niiden soveltuvuus eri päästölähdetyypeille. Eroja mallien välillä on myös niiden kyvyssä ottaa huomioon maastomuodot ja meteorologiset tekijät. Lisäksi leviämisen matemaattis-fysikaalinen laskentatapa vaihtelee paljon ja malleihin voi olla sisällytetty vaihtelevassa määrin erilaisia ilmakemiallisen ja -fysikaalisen muutunnan tai laskeumaprosessien laskentakaavoja.

Leviämismallit voidaan jakaa matemaattis-fysikaalisten laskentatapojen perusteella karkeasti viiteen luokkaan: laatikko-, gauss-, euler-, lagrange- ja virtaustyyppiset mallit. Joissakin malleissa erilaisia laskentatapoja on yhdistelty samaan mallikokonaisuuteen.

#### 13.1.1 Laatikkomallit

Yleensä laatikkomallit eivät yksinkertaisuutensa vuoksi sovellu kaupunkisuunnittelun tarpeisiin, mutta niitä on yhdistetty menestyksekkäästi joihinkin muihin mallityyppeihin ilmansaasteiden kemiallisen muutunnan tai ilmapvirtausten katukuilupyörteen laskentaa varten. Esimerkiksi OSPM-katukuilumalli on gauss- ja laatikkomallin yhdistelmä.

Käsitellään suorakulmaista kaupunkia (kuva 13.1). Jotta pystyttäisiin laskemaan ilman-saasteen konsentraatio yhtälöllä (13.1) kaupungissa, tehdään seuraavia oletus:



Kuva 13.1. Suorakulmion mallinen kaupunki, josta käy ilmi laatikkomallissa käytetyt symbolit.

- Kaupunki on suorakulmio, jonka leveys on  $W$ , pituus  $L$  ja yksi sivu on tuulen suuntaisen.
- Ilmakehän turbulenssi saa aikaan saasteiden täydellisen sekoittumisen sekoituskorkeuteen  $H$  asti, jonka yläpuolella ei ole sekoitusta.
- Tämä turbulenssi on tarpeeksi voimakas nousutuulen suunnassa niin, että komponentin konsentraatio on tasainen koko tilavuudessa. Tämä oletus on suuri yksinkertaistus, sillä yleensä konsentraatio on suurempi myötätuulen puolella.
- Tuuli kulkee  $x$ -suunnassa nopeudella  $u$ . Nopeus on vakio ja riippumaton ajasta, paikasta tai korkeudesta maan pinnasta. Käytännössä tuuli on voimakkaampaa korkeammalla.
- Kaupunkiin vapautuvan saastekomponentin pitoisuus ( $x = 0$ ) on vakio ja sen suuruus on  $b$ . Pitoisuuden yksikkö on joko  $\text{g}/\text{m}^3$  tai  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\mu\text{g} = 10^{-6} \text{ g}$ ).
- Saasteen virtausnopeus kaupungissa on  $Q$  (tyypillisesti  $\text{g}/\text{s}$ ). Normaalisti se ilmaistaan pinta-alaa kohti olevalla suurella  $q$ , jonka yksikkö on  $\text{g}/(\text{s m}^2)$ . Eli

$$Q = qA \quad (13.2)$$

missä  $A$  on kaupungin pinta-ala ( $A = W \cdot L$ ). Virtausnopeus on vakio eikä muutu ajan mukana.

- Laatikon yläosan tai tuulen suuntaisten sivujen kautta ei poistu saastekomponenttejä.
- Kyseinen saastekomponentti on riittävän pitkäikäinen ilmakehässä, että sen tuhoutumisnopeus kaavassa 13.1 on nolla.

Näitä oletuksia käyttäen voidaan laskea kaavan (13.1) kaikki termit. Valitaan tutkittavaksi tilavuudeksi  $V = W \cdot L \cdot H$ . Koska kaikkien oletusten mukaisesti virtaukset ja päästönopeudet ovat ajasta riippumattomia, huomataan, että kyseessä on tasapainotila, jossa mikään ei muutu ajan mukana. Kaikille tasapainotiloille yhtälön (13.1) kasaantumisnopeus on nolla.

Komponentin virtausnopeutta voidaan pitää joko syntymisnopeutena tai virtauksena laatikkoon. Kumpikin antaa saman tuloksen; yleensä käsitellään  $Q$ :ta virtauksena laatikkoon alemman etuosan kautta. eli syntymisnopeus on nolla. Kaava (13.1) supistuu nyt muotoon

$$0 = Q_{in} - Q_{out} \quad (13.3)$$

Laatikon sisään tulee kaksi virtausta. Saastekomponentin virtausnopeus kaupungin nousutuulen puolella on

$$Q_{in} = u \cdot W \cdot H \cdot b \quad (13.4)$$

Kolme ensimmäistä termiä muodostavat ilman tilavuusvirran. Kun se kerrotaan pitoisuudella, saadaan massavirta (g/s) Toinen virtausnopeus laatikon sisään on kaupungin emittoiman saastekomponentin virtausnopeus

$$Q_{in} = Q = q \cdot W \cdot L \quad (13.5)$$

Edellisten oletusten mukaan konsentraatio koko kaupungissa on sama ja suuruudeltaan  $c$ . Ainoa komponentin poistumistie on laatikon myötätuulen puolelta. Virtausnopeus saadaan yhtälöstä

$$Q_{out} = u \cdot W \cdot H \cdot c \quad (13.6)$$

Sijoittamalla edelliset yhtälöt yhtälöön (13.1) ja ratkaisemalla  $c$ , saadaan

$$c = b + qL/uh \quad (13.7)$$

joka on yksinkertainen, kiinnitetyn laatikon malli.

**Esimerkki 13.1.**

Kaupunkia kuvaavat seuraavat parametrit:  $W = 5$  km,  $L = 15$  km,  $u = 3$  m/s,  $H = 100$  m. Hiilimonoksidin (CO) taustapitoisuus on  $b = 15$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Päästönopeus pinta-alaa kohti on  $q = 4 \cdot 10^{-6}$  g/(s·m<sup>2</sup>). Mikä on CO:n konsentraatio  $c$  kaupungin yllä? Sijoittamalla luvut kaavaan (6.7) saadaan suoraan hiilimonoksidin konsentraatio

$$c = 5 \mu\text{g}/\text{m}^3 + (4 \text{ mg}/\text{sm}^2) [15 \text{ 000m}/(3 \text{ m/s} \cdot 1000\text{m})] = 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$W$  ei vaikuta laskettuihin tuloksiin. Eli vaikka kaksinkertaistettaisiin laatikon leveys pitäen  $q$  vakiona,  $c$  ei muuttuisi. Selvästi yhtälö (13.7) on yksinkertaistus siitä, mitä oikeasti tapahtuu luonnossa. Kuitenkin siinä esiintyvät kaikki tärkeät muuttujat, oikeilla merkeillä ja tehoilla. Se osoittaa, että nousutuulen konsentraatio pitkäikäiselle komponentille lisätään kaupungin päästöihin, jotka lisääntyvät  $q$ :n ja  $L$ :n kasvaessa ja laskevat  $u$ :n ja  $H$ :n kasvaessa.

Yksinkertainen kiinnitetyn laatikon malli ja sen sovellukset ennustavat konsentraatioita vain tietyissä meteorologisissa olosuhteissa. Jotta saataisiin selville konsentraation vuosikeskiarvo  $\bar{c}_m$  jollekin päästökomentille, täytyy käyttää useita arvojakaumia tuulen nopeudelle  $u$  ja  $H$ :lle, laskea konsentraatio kullekin yhtälöllä (13.7) ja kertoa jakaumalla ja summata lopuksi yhteen. Eli

$$\bar{c}_m = \sum_{\Delta t=0}^t (c \times f_c)_{\Delta t} \quad (13.8)$$

jossa  $c$  ja  $f_c$  ovat pitoisuuden hetkellinen arvo ja sen tapahtuman taajuus.

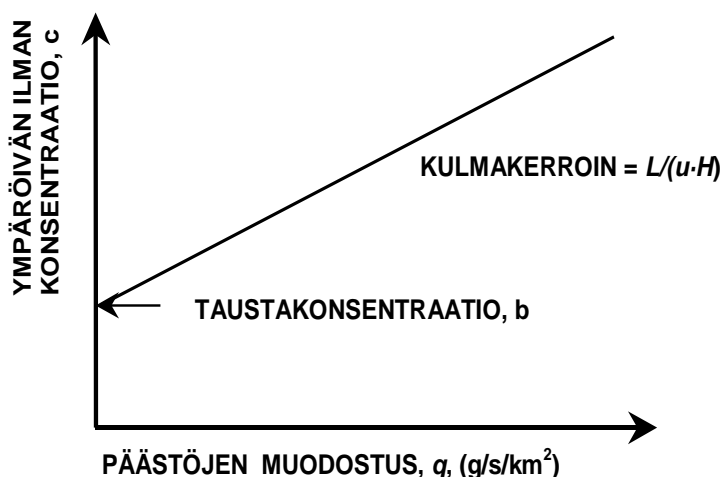
**Esimerkki 13.2.**

Esimerkin 13.1 kaupungille, 40 % ajasta vallitsee seuraavat olosuhteet:  $u = 3$  m/s,  $H = 1000$  m. Jäljelle jäävänä 60 % ajasta tuuli on kuvan 6.1 mukainen ja sen nopeus on 6 m/s ja sekoituskorkeus on  $H=1000$  m. Mikä on CO -pitoisuuden vuosikeskiarvo kaupungissa? Lasketaan ensin konsentraatio käyttäen yhtälöä (13.7). Huomaa, että tuulen suunnan muutos vaihtaa dimensioiden  $W$  ja  $L$  paikkaa.. Eli

$$c = 5 \mu\text{g}/\text{m}^3 + (4 \text{ mg}/\text{sm}^2) [5 \text{ 000m}/(6 \text{ m/s} \cdot 1000\text{m})] = 8,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Summataan tämä esimerkissä saatuun konsentraatioon.

$$c_m = 8,3 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot 0,6 + 25 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot 0,4 = 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$$



Kuva 13.2. Yhtälön (13.7) graafinen esitys,  $L/(u \cdot H)$  on vakio.

Realistisen sovelluksen tekeminen yhtälöllä (13.8) vaatisi useiden olosuhteiden vaikutusten yhteenlaskua. Kaupungeissa, joissa päästöjen suurin syy on poltto talojen lämmitykseen, päästövirta pinta-alaa kohden on paljon korkeampi talvella kuin kesällä. Muut päästöt vaihtelevat tunnista tuntiin ja päivästä päivään. Autojen päästöt ovat korkeammat työaikaliikenteen aikoina. Yhtälöä (13.7) muokataan tarpeen mukaan, jos otetaan huomioon myös nämä päästöt. Samoin, jos halutaan soveltaa yhtälöä suurimman konsentraation määrittämiseen, täytyy tietää tuulen nopeus ja suunta, sekoituskorkeus ja taustakonsentraatio, joka vastaa pahinta tilannetta. Jos pidetään  $u$ ,  $L$  ja  $H$  vakioina yhtälössä (13.7), voidaan kaava esittää kuvaajana, joka on suora (ks. kuva 13.2)

Kuvaaja osoittaa, että jos olosuhteet ovat vakiot, konsentraatio on yhtä suuri kuin taustakonsentraatio  $b$  lisättynä kaupungin aiheuttama konsentraation. Jos esimerkiksi konsentraatio on  $c_1$  ja päästön virtausnopeus  $q_1$  ja halutaan pienentää konsentraatio  $c_2$ :een, voidaan virtaus  $q_2$  laskea yhtälöstä (13.7)

$$q_2 = [(c_2 - b) \cdot uH] \cdot (q_1 / L) \quad (13.9)$$

Kuitenkin, jos tunnetaan  $q_1$  ja  $c_1$ , voidaan kirjoittaa analoginen yhtälö  $q_1$ :lle ja ratkaista  $uH/L$ . Sijoitetaan  $uH/L$  yhtälöön (13.9) ja järjestellään uudelleen, saadaan,

$$q_2 / q_1 = (c_2 - b) / (c_1 - b) \quad (13.10)$$

Tässä kaavassa ei esiinny meteorologisia parametreja lainkaan vaan ne on oletettu vakioiksi vallitsevan ( $q_1, c_1$ ) ja tulevan ( $q_2, c_2$ ) tilanteen välissä ja siksi ne ovat supistuneet yhtälöstä pois.

Jos mitatut päästöarvot ylittävät käytössä olevan standardin, täytyy  $c_2$  ja  $q_2$  tehdä pienemmiksi kuin alkuperäiset arvot. Suhteellinen päästön vähennys  $\Delta c$  saadaan kaavasta

$$\Delta c = -(q_1 - q_2)/q_1 = 1 - (q_2/q_1) = 1 - (c_2 - b)/(c_1 - b) = (c_1 - c_2)/(c_1 - b) \quad (13.11)$$

### Esimerkki 13.3.

Ilmanlaadun standardi partikkeleille (TSP) USA:ssa vuonna 1971 oli  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  vuosikeskiarvona. Vuonna 1970 eräässä kaupungissa mitattu vuosikeskiarvo oli  $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Taustakonsentraatioksi arvioitiin  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Kuinka paljon päästöjä piti vähentää, jotta saavutettiin vuoden 1971 raja-arvo ilman konsentraatiolle?

$$\Delta c = (190 - 75)/(190 - 20) = 0,67 \quad (67\%)$$

Yhtälöä (13.11) ja muita sen variaatioita on käytetty laajalti raja-arvojen saavuttamiseksi tarvittaviin päästön vähennyksiin. Sen etuja ovat sen yksinkertaisuus ja tarvittavan tiedon saatavuus. Se on kuitenkin suuri yksinkertaistus periaatteeltaan monimutkaisesta tilanteesta ja on epätodennäköistä, että tulokset olisivat tarkkoja paitsi erikoistapauksissa. Lisäksi, kuten esimerkistä 13.3 havaittiin, usein oletetaan suurta päästöjen vähentämistarvetta. Monimutkaisemmat mallit eivät yleensä sisällä tätä oletusta. Usein mallia käytetäänkin pienemmissä kaupungeissa.

Toinen epäkohta kiinnitetyn laatikon malleissa on se, etteivät ne tee eroa suuren määrän pieniä lähteitä (autot, kodit, pienteollisuus jne.) ja pienen määrän suuria lähteitä (voimalaitokset, sulattamot jne.) välillä. On riittävästi todisteita siitä, että useimmissa olosuhteissa saasteen päästökohdan nostaminen korkeammalle vähentää konsentraatiota maan tasolla, mutta saattaa lisätä konsentraatiota kauempana päästölähteestä. Ei ole olemassa mitään helppoa tapaa korjata tätä laatikkomallissa.

Mitä kaava (13.7) kertoo mahdollisuuksista vähentää ilmansaasteita omassa kaupungissa? Olemassa olevassa kaupungissa ei voida tehdä mitään  $u$ :lle,  $H$ :lle ja  $L$ :lle. Jos rakennetaan uutta kaupunkia, olisi ihanteellista, jos kaupunki olisi pitkä ja kapea, kohtisuorassa tuulen suuntaa vastaan tai paikka, jossa  $H$  ja  $u$  ovat suuria. Nämä valinnat minimoivat ilmansaasteiden konsentraatioita. Jo olemassa olevalle kaupungille muunneltavat parametrit ovat  $b$  ja  $q$ . Taustakonsentraatio  $b$  vähenee, kun nousutuulen puoleiset naapurit vähentävät päästöjään. Jotta  $q$  pienenesi, täytyy omia päästöjä rajoittaa.

### 13.1.2 Gaussin malli

Gaussilaisissa malleissa ilmansaasteiden leviäminen noudattaa normaalijakaumaa pysty- ja vaakasuunnassa. Ne soveltuvat hyvin paikallisten päästöjen leviämismallinnukseen, kun ympäristö on avoin ja tasainen. Gaussilaisten mallien luotettavuus heikkenee, kun tuulen nopeus on hyvin alhainen tai kun ollaan aivan päästölähteen vieressä. Maanpinnan korkeuserojen ja rakennusten aiheuttamaa vaikutusta ilmavirtauksiin voidaan osin huomioida gaussilaisissa malleissa ns. rosoisuusparametrin avulla tai hieman yksityiskohtaisemmin 3D-maastomallin avulla. Gaussilaiset mallit eivät kuitenkaan sovellu hyvin kohteisiin, joissa rakennukset aiheuttavat kuilumaisia tai puolikuilumaisia esteitä katujen reunoille.

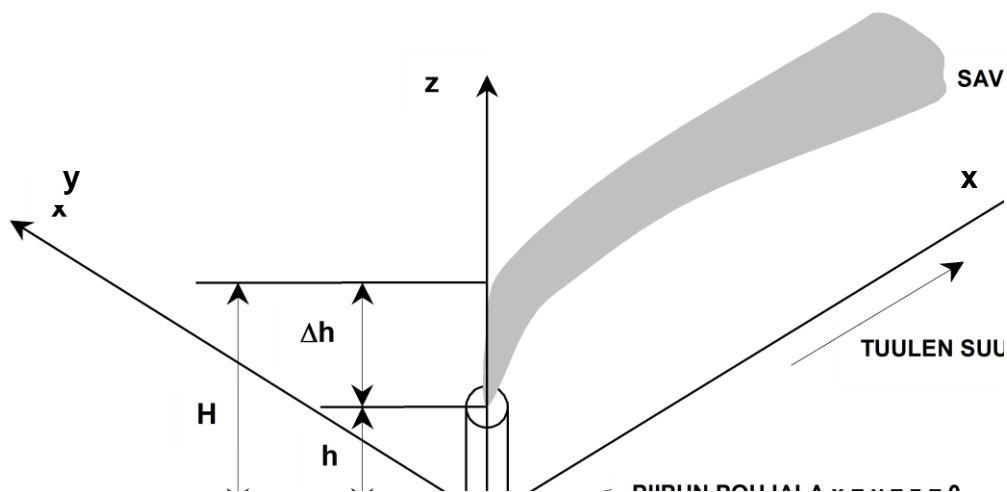
Gaussilaisissa malleissa kuvataan yleensä hyvin yksinkertaisesti ilmakemialliset reaktiot, mutta joissakin kehittyneemmissä sovelluksissa huomioidaan esimerkiksi otsonin taustapitoisuuden vaikutus typenoksidien muuntumiseen.

Suurin osa diffuusiomalleista perustuu Gaussin malliin, joka pohjautuu massataseeseen. Siinä tarkastellaan pistemäistä lähdettä, kuten voimalaitoksen savupiippua, ja yritetään laskea myötävirtaan kulkeva konsentraatio tästä lähteestä. Kuvassa 13.3 on esitetty kaaviomainen kuva tilanteesta, jossa origo on savupiipun juurella ja  $x$ -akseli on tuulen suuntainen. Saastunut kaasuvirta nousee piipusta ja kääntyy  $x$ -akselin suuntaiseksi leviten matkallaan  $y$  ja  $z$ -suuntiin.

Tällaiset savupatsaat nousevat yleensä huomattavan korkealle, koska niiden lämpötila on paljon korkeampi kuin ympäristön lämpötila ja nopeus ylöspäin. Gaussin mallin laskelmissa savupatsaan oletetaan lähtevän pisteestä, jonka koordinaatit ovat  $(0,0,H)$ , missä  $H$ :ta kutsutaan *piipun teholliseksi korkeudeksi*, joka on piipun fyysisen korkeuden (kuvassa  $h$ ) ja savupatsaan nousukorkeuden (kuvassa  $\Delta h$ ) summa. Oletetaan, että päästölähde sijaitsee pisteessä  $(0,0,H)$  ja päästö on tasaista eikä siihen vaikuta nostetta ja virtausnopeus on  $Q$  (normaalisti g/s). Oletetaan, että tuulen nopeus on  $x$ -suuntainen, ja sen nopeus on  $u$  ja riippumaton ajasta, paikasta ja korkeudesta. Ongelmana on laskea lähteen aiheuttama päästö pisteessä  $(x,y,z)$ ,  $x > 0$ .

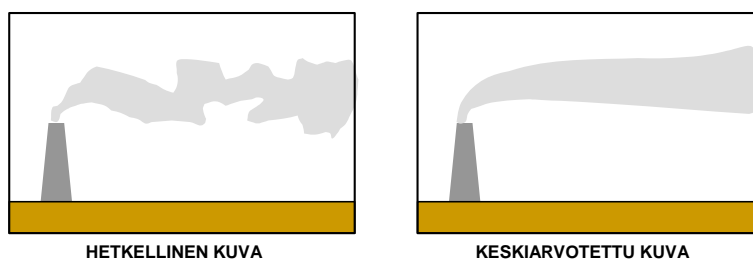
Jos molekylaarinen diffuusio olisi ainoa savupatsaan ja ilman sekoittumisen aiheuttaja, savu leviäisi hitaasti ja näkyisi ohuena juovana liikkuen alas taivaalta. Todellinen savupatsaan aiheuttaja on kuitenkin suuren skaalan turbulентtinen sekoitus ilmakehässä, jota voidaan havainnollistaa vertaamalla hetkellistä kuvaa savupatsaasta sen aikakeskiarvotettuun kuvaan (kuva 13.4).





Kuva 13.3. Gaussin mallin koordinaatisto ja nimistö

Millä hetkellä hyvänsä savu näyttää olevan mutkitteleva ja kääremäinen liikkeessään taivaalla. Tämä mutkitteleva liike johtuu ilmakehän turbulenssista, joka on vaakasuoran tuulen suuren mittakaavan pyörteiden aiheuttama. Turbulenssi on luonnostaan satunnaista, joten savupatsaan muoto voi hetkellisesti vaihdella paljon mutta kokonaisliike on kuitenkin samanlaista. Aika tasoittaa näitä hetkellisiä muutoksia ja esim. valottamalla valokuvaa savupatsas näyttää tasaiselta ja symmetriseltä. Tästä syystä konsentraatiomittarin asentaminen tiettyyn pisteeseen savupatsaassa osoittaisi konsentraation heilahtelun epä säännöllisesti keskiarvon ympärillä. Gaussin mallissa pyritään laskemaan vain tätä keskiarvoa puuttumatta hetkellisiin arvoihin. Laskelmien aikajakso tulisi olla vähintään 10 minuuttia, mieluummin puolesta tunnista tuntiin.



Kuva 13.4. Hetkellinen ja keskiarvotettu kuva savupatsaasta

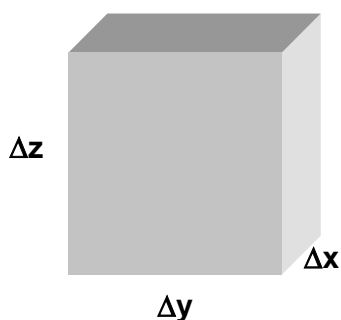
Tarkastellaan aluksi tilannetta ilmassa kulkevan näkökulmasta (Lagrange –näkökulma). Tällöin maa jää alapuolelle. Kuljetaan aluksi tuulen mukana savupiipun tulovirtauksen puolella, jolloin alkukonsentraatio on nolla ( $b = 0$ ). Kun kuljetaan piipun yli, saavutaan alueelle, jossa on suurin konsentraatio. Tämä paikka sijaitsee piipun päässä ohuessa saastuneessa ilmajuvassa. Tämä ilma laajenee turbulenttisen sekoituksen johdosta.

Laajenemisen mallintamiseksi sovelletaan massatasetta pieneen tilavuuteen savupatsaan keskellä. Kuution mitat on esitetty kuvassa 6.5. Oletetaan, että materiaalia ei synny eikä tuhoudu, joten yhtälön (13.1) oikeanpuoleisimmat termit ovat nolliä, joten saadaan

$$\text{Kasaantumisnopeus} = \Sigma(\text{virtaus sisään}) - \Sigma(\text{virtaus ulos}) \quad (13.12)$$

Kasaantumisnopeus on komponentin määrän aikaderivaatta. Komponentin määrä on puolestaan sen tilavuuden ja konsentraation tulo ja kun tilavuus on vakio saadaan

$$\text{Kasaantumisnopeus} = \partial(cV)/\partial t = V \cdot (\partial c/\partial t) = \Delta x \Delta y \Delta z \cdot (\partial c/\partial t) \quad (13.13)$$



Kuva 13.5. Massataseessa käytetyn kuution dimensiot.

Kuution sisään ei ole kokonaisvirtaa, koska se liikkuu tuulen mukana. Kuutioon on kuitenkin virtausta kaikkien kuuden tahkon kautta johtuen turbulenttisesta sekoituksesta. Tälle sekoittumiselle ei ole täydellistä matemaattista tai fysikaalista mallia, mutta sitä voidaan approksimoida seuraavalla kaavalla

$$\text{Massavirta/pinta-ala} = (dm/dt)/A = -K (\partial c/\partial n) \quad (13.14)$$

missä  $c$  = konsentraatio,  $n$  = etäisyys tarkastelusunnassa ( $x$ ,  $y$  tai  $z$ ) ja  $K$  = turbulenttinen dispersiovakio. Koska virtauksen yksikkö on (massa/aika/pinta-ala) ja  $\partial c/\partial n$ :n on (massa/pituus<sup>4</sup>), täytyy  $K$ :n yksikön olla (pituus<sup>2</sup>/aika) eli m<sup>2</sup>/s. Tämä on sama kuin molaarisen tai termisen diffusiviteetin ja yhtälö on samaa muotoa kuin lämmönjohtumisen yhtälö. Tämä ei osoita, että prosessit olisivat samanlaisia, pikemminkin se osoittaa, että yhtälöt on pakotettu samaan muottiin. Yhtälön (6.14) miinusmerkki osoittaa, että virtaus on suuremmasta konsentraatiosta pienempään.

Kuutiolla on kaksi tahkoa, jotka ovat  $x$ -suuntaisia, kummankin tahkon pinta-ala on  $\Delta y \Delta z$ . Käyttämällä yhtälöä (6.14) kahdesti nettomassavirta  $\dot{m}_{c,x}$  kahden tahkon läpi turbulenttisen diffuusion johdosta saadaan yhtälöstä

$$\dot{m}_{c,x} = \left[ \left( -\frac{K\partial c}{\partial x} \right)_x - \left( -\frac{K\partial c}{\partial x} \right)_{x+\Delta x} \right] \Delta y \Delta z \quad (13.15)$$

missä ensimmäinen termi edustaa virtausta lähimmän tahkon läpi ja toinen virtausta kauimmaisen tahkon läpi. Samalla tavalla voidaan kirjoittaa muille tahkoille  $\partial c/\partial z$  :n ja  $\partial c/\partial y$  :n suhteen. Näiden summa on kasaantumisnopeus. Sijoittamalla yhtälöt (6.13), (6.15) ja kaksi näille analogista yhtälöä yhtälöön (6.12) ja jakamalla  $\Delta x \Delta y \Delta z$ :lla, saadaan

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\left( \frac{K\partial c}{\partial x} \right)_{x+\Delta x} - \left( \frac{K\partial c}{\partial x} \right)_x}{\Delta x} + \frac{\left( \frac{K\partial c}{\partial y} \right)_{y+\Delta y} - \left( \frac{K\partial c}{\partial y} \right)_y}{\Delta y} + \frac{\left( \frac{K\partial c}{\partial z} \right)_{z+\Delta z} - \left( \frac{K\partial c}{\partial z} \right)_z}{\Delta z} \quad (13.16)$$

Toisaalta 
$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left( \frac{\left( K \partial c / \partial x \right)_{x+\Delta x} - \left( K \partial c / \partial x \right)_x}{\Delta x} \right) = \frac{K \partial^2 c}{\partial x^2} \quad (13.17)$$

eli jos otetaan raja-arvo äärettömän pienestä kuutiosta, yhtälö (13.16) muuttuu muotoon

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{K \partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{K \partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{K \partial^2 c}{\partial z^2} \quad (13.18)$$

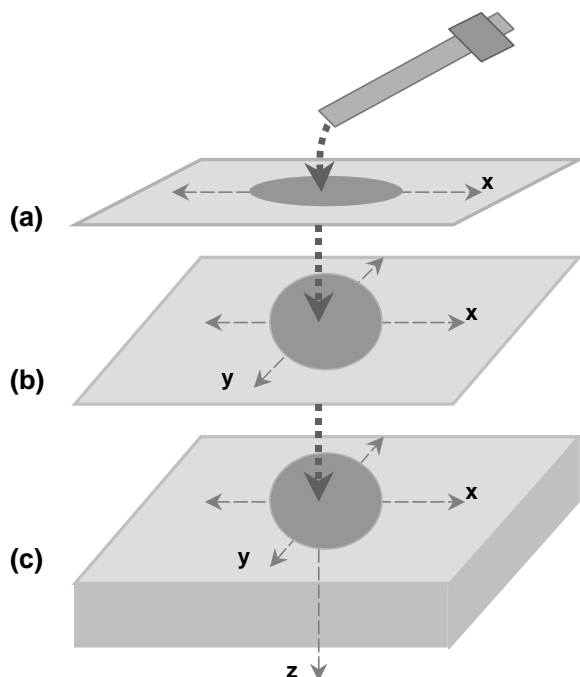
Tämä on lämmönjohtumisen yhtälö kiinteässä kappaleessa, muuttujat on vain nimetty uudelleen. Turbulenttisisessa diffuusiassa  $K$  ei ole vakio kaikissa suunnissa, joten niitä merkitään tästä eteenpäin  $K_x$ ,  $K_y$  ja  $K_z$ .

**1-, 2- ja 3-dimensionaalinen leviäminen.** Gaussin yhtälöä sovelletaan yleensä päästön 1-, 2-, tai 3-dimensionaaliseen leviämiseen, joita nyt sovelletaan yhtälöön (13.18). Kuvassa (13.6) on esitetty yksinkertainen havainnollistus näistä kolmesta eri dimensionaalista leviämisistä. Jos kuvan (13.6) pipetistä tiputetaan  $X$  g värjättyä liuosta origoon ( $x = y = z = 0$ ) ajanhetkellä  $t = 0$ , voidaan konsentraatio missä tahansa paikassa laskea yhtälöstä (6.18). 1-, 2-, ja 3-dimensionaalisen (1-D, 2-D ja 3-D) leviämisen konsentraatiot voidaan ratkaista seuraavilla kaavoilla

$$c = \frac{X}{2(\pi t)^{1/2} K_x^{1/2}} \exp \left[ - \left( \frac{1}{4t} \right) \left( \frac{x^2}{K_x} \right) \right] \quad (1-D) \quad (6.19)$$

$$c = \frac{X}{4\pi t (K_x K_y)^{1/2}} \exp \left[ - \left( \frac{1}{4t} \right) \left( \frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y} \right) \right] \quad (2-D) \quad (13.20)$$

$$c = \frac{X}{8(\pi t)^{3/2} (K_x K_y K_z)^{1/2}} \exp \left[ - \left( \frac{1}{4t} \right) \left( \frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z} \right) \right] \quad (3-D) \quad (13.21)$$



*Kuva 13.6.* 1-, 2- ja 3-D leviäminen. Pipetistä tippuu muutama pisara väriainetta imupaperille. (a) Paperin pala on kapea, joten leviämistä tapahtuu vain  $x$ -suunnassa. (b) Paperi on ohut arkki, ja väriaine leviää kahteen suuntaan. (c) Paperi on paksu paperipino, jossa leviämistä tapahtuu kolmeen suuntaan.

Kun verrataan näitä yhtälöitä, huomataan, että lisäämällä dimensioita nimittäjä kasvaa kertoimella  $2(\pi t)^{1/2} K^{1/2}$  ja oikealle puolelle eksponenttitermiin tulee lisäys  $(x_i^2/K_i)$ . Kaa-voista huomataan myös, että origossa ( $x = y = z = 0$ ) eksponenttitermi on  $\exp^0 = 1$ , joten kaikissa kolmessa yhtälössä alkukonsentraatio on määräävä tekijä. Se kerrotaan eksponenttitermillä, joka on aina pienempi kuin 1, joka osoittaa, kuinka paljon alkukonsentraatio pienenee siirryttäessä kauemmaksi origosta. Origin konsentraatio on verrannollinen termeihin  $(1/t^{1/2})$ ,  $(1/t)$  ja  $(1/t^{3/2})$  1-D, 2-D ja 3-D leviämisisissä.

**3-D leviäminen.** Tutkitaan ensin muodon vaikutusta hetkelliseen lyhyen ajanjakson päästöön savupiipusta, kuva (13.3), siten että  $x = y = 0$  ja  $z = H$ . Vapautunut päästömäärä on  $X = Q \cdot \Delta t$ , missä  $Q$  on suuri ja  $\Delta t$  pieni. Sijoitetaan arvot yhtälöön (13.21), jolloin saadaan

$$c = \frac{Q\Delta t}{8(\pi t)^{1/2} (K_x K_y K_z)^{1/2}} \exp \left[ - \left( \frac{1}{4t} \right) \left( \frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y} + \frac{(z-H)^2}{K_z} \right) \right] \quad (13.22)$$

missä  $t$  = aika päästön vapautumisesta (= etäisyys saastepilven keskeltä/tuulen nopeus) ja  $\Delta t$  = päästön kesto.

Yhtälössä (13.22), jossa tarkasteltiin asiaa savun mukana kulkemisen näkökulmasta,  $x$  edusti etäisyyttä saastepilven keskeltä, jonka oletettiin liikkuvan paikallisen tuulen mukana. Kaavan (13.22)  $x$  ei ole sama kuin kuvassa 13.3. Siinä  $x$  on etäisyys liikkuvan savun keskeltä. Edellisessä luvussa käytetään samaa määritelmää ja vaihdetaan sitten maassa seisijan näkökulmaan (Euler-näkökulma), jossa  $x$ :n merkitys on sama kuin kuvassa 13.3 eli etäisyys piipun pohjasta. Yhtälöä (13.22) käytetään vain satunnaisesti ilmansuojelulaskuissa, koska yleensä kiinnostuksen kohteena ovat jatkuvat päästöt. Kuitenkin sitä käytetään paljon turvallisuusanalyseissä.

**2-D leviäminen (Gaussin savupatsas).** Yhtälöä (13.22) vastaavan tasapainotilan yhtälön löytämiseksi muodostetaan massatase ohuelle ilmakerrokselle, joka on  $x$ -suunnassa  $1\text{m}$  ja  $y$ - ja  $z$ -suuntaiset mitat ovat äärettömän pieniä ja joka kulkee tuulen nopeudella. Tämä levy kuljettaa materiaa viereisiin ilmalevyihin turbulentsin dispersion ansioista, mutta se saa takaisin lähes yhtä suuren osan näistä levyistä siten, että nettomateriansiirto  $x$ -suunnassa on olematonta ja se asetetaan nolllaksi. Tämä tekee ongelmasta 2-D:n, johon käytetään yhtälöä (6.20). Tässä tapauksessa aika, joka kuluu ilmalevyn kulkemiseen oletetun pistemäisen lähteen yli on  $1\text{ m}/u$  eli päästö, joka alunperin menee tutkittavaan levyyn, on  $X = Q/u$ . Sijoitetaan nämä yhtälöön (13.20), jolloin saadaan

$$c = \frac{X}{4\pi t (K_y K_z)^{1/2}} \exp \left[ - \left( \frac{1}{4t} \right) \left( \frac{y^2}{K_y} + \frac{(z-H)^2}{K_z} \right) \right] \quad (13.23)$$

missä symboleilla on sama merkitys kuin aiemminkin. Jos koordinaatisto olisi valittu siten, että päästölähde olisi mielivaltaisessa pisteessä  $(x', y', z')$  yhtälön (6.22) eksponenttitermit olisivat  $(x-x')^2$ ,  $(y-y')^2$  jne. Valittu origo yksinkertaistaa yhtälöitä. Usein origoksi,  $z = 0$ , valitaan maan taso.

Vaikka yhtälö (6.23) olisi käyttökelpoinen, kirjallisuudessa esiintyy yleensä seuraavien kaavojen avulla tehdyt sijoitukset

$$K_y = 0,5\sigma_y^2(u/y) \quad (13.24)$$

$$K_z = 0,5\sigma_z^2(u/z) \quad (13.25)$$

$$t = x/u \quad (13.26)$$

missä  $\sigma_y$  on vaakasuora ja  $\sigma_z$  on pystysuora dispersiokerroin. Niiden yksikkö on sama kuin pituuden yksikkö, yleensä metri. Tehdään sijoitukset yhtälöön (6.23), jolloin saadaan

$$\begin{aligned} c &= \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \\ &= \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \end{aligned} \quad (13.27)$$

Yhtälö (13.26) muuttaa yhtälöä Lagrangen näkökulmasta katsottuna, missä  $x$  on liikkuvan pilven keskellä, Eulerin näkökulmaan, missä  $x$  edustaa etäisyyttä päästön lähteestä. Suurin osa tämän kappaleen jäljellä olevista yhtälöistä on esitetty Eulerin muodossa, jolloin etäisyydet mitataan piipun pohjasta eikä pilven keskeltä.

Yhtälö (13.27) on kolmen termin tulo. Jos asetetaan  $y=(z-H)=0$  niin kaksi oikeanpuoleista termiä on  $\exp(0)=1$ , mikä osoittaa, että ensimmäinen termi on savupatsaan keskiviivan konsentraatio. Kaksi  $\sigma$ :aa kasvaa etäisyyden kasvaessa, joten keskiviivan konsentraatio pienenee. Toinen termi osoittaa, kuinka konsentraatio pienenee, kun liikutaan vaakasuoraan, sivuttain,  $y$ :n ja  $-$ suuntiin, patsaan keskiviivalta. Koska toisessa termissä on  $y^2$ , se on sama liikuttaessa  $+$  tai  $-$  suuntaan. Se on aina  $\leq 1$ . Kolmas termi on kuten toinenkin, mutta osoittaa, miten konsentraatio pienenee kun liikutaan pystysuoraan pois keskiviivan korkeudesta ( $z=H$ ). Se on myös symmetrinen ja aina  $\leq 1$ . Kolme termiä on riippumattomia toisistaan, mutta käyttävät samaa  $\sigma$ :n arvoa.

#### Esimerkki 13.4.

Tehdas tuottaa (~emittoi) 20 g/s SO<sub>2</sub>:ta korkeudella H. Tuulen nopeus on 3 m/s ja 1 km:n etäisyydellä  $\sigma_y$ :n ja  $\sigma_z$ :n arvot ovat 30m ja 20m. Mikä on SO<sub>2</sub> konsentraatio savupatsaan keskiviivalla 60 metrin päässä sivulla ja 20 metriä keskiviivan alapuolella? Keskiviivalla  $y=0$  ja  $z=H$ , joten molemmat eksponenttitermit ovat nollia. Koska  $\exp(0)=1$ , eksponenttitermi on yksi, jolloin keskiviivalla saadaan

$$c = 20 \text{ (g/s)} / [2\pi(3 \text{ m/s})(30 \text{ m})(20 \text{ m})] = 0,0017 \text{ g/m}^3 = \underline{1770 \text{ }\mu\text{g/m}^3}$$

Pisteessä, joka ei ole keskiviivalla, täytyy edellä saatu konsentraatio kertoa yhtälöllä

$$\exp\{-0,5 [(60\text{m}/30\text{m}) + (-20\text{m}/20\text{m})]\} = \exp\{-0,5 (4+1)\} = 0,0818$$

eli

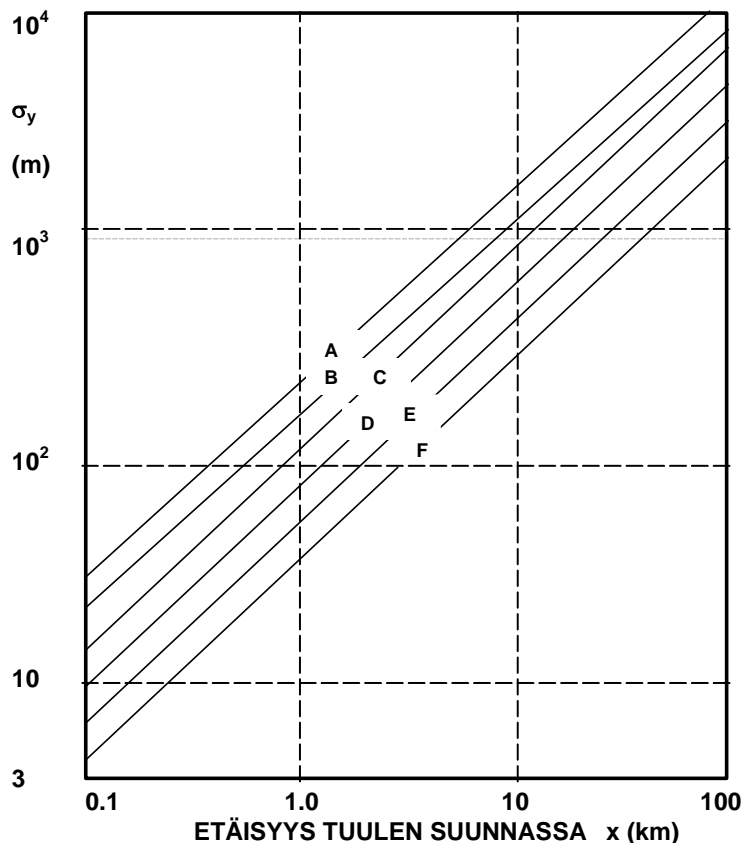
$$c = 1770 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot 0,0818 = 145 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Yhtälö (6.27) olettaa, että savupatsas on symmetrinen  $y$ :n ja  $z$ :n suhteen. Eli jos olisi laskettu konsentraatio 60 m toiselle puolelle ja 20 m patsaan yläpuolella, tulos olisi ollut sama. Eri  $\sigma_y$ :n ja  $\sigma_z$ :n arvot tarkoittavat, että leviäminen vaakaa- ja pystysuorassa on erilaista. Usein  $\sigma_y > \sigma_z$  niin, että tietyllä  $x$ :n arvolla vakiokonsentraation hahmotelma on ellipsin muotoinen, jolla on suuri vaakasuora akseli. Lähellä maan pintaa symmetria häiriintyy. Käyttäkseen yhtälöä (6.27) täytyy tietää oikeat arvot  $\sigma_y$ :lle ja  $\sigma_z$ :lle. Yhtälöistä (6.24) ja (6.25) niille saadaan muodot

$$\sigma_y = \{2K_y x/u\}^{1/2} \quad \text{jne.} \quad (13.28)$$

Kuitenkin, jos tutkitaan  $K$ :n arvoja yhtälössä (13.14), huomataan, että niihin on vain kiinnitetty mielivaltaisen arvo, joka on riippumaton ilmakehän käyttäytymisestä. Tuntuu kohtuulliselta olettaa, että ne olisivat riippuvaisia tuulen nopeudesta ja ilmakehän turbulenssin asteesta, joka on tuulen nopeuden ja auringon lämmitysasteen (*insolation*) ja kenties jonkun muunkin tekijän funktio. On myös realistista olettaa, että annetulle auringonsäteilylle  $K$ :n arvo on suoraan verrannollinen tuulen nopeuteen eli  $K_y/u$  ja  $K_z/u$  ovat vakioita. Siten yhtälöstä (13.28) voidaan päätellä, että olosuhteista riippumatta jokaisen  $\sigma$ :n tulisi olla verrannollinen tuulen suuntaisen etäisyyden neliöjuureen.

Kokeelliset tulokset eivät noudata näitä oletuksia kovin hyvin. Saatavilla olevasta tiedosta on tehty korrelaatioita, joista Turnerin korrelaatiot on esitetty kuvissa (13.7) ja (13.8). Niissä on esitetty  $\log(\sigma_y)$  ja  $\log(\sigma_z)$   $\log(x)$ :n funktiona. Jos edelliset laskut olisivat oikeita, kaikille ilmakehän olosuhteille kuvaajat olisivat suorita, joiden kulmakerroin olisi  $1/2$ . Kokeellisten tulosten parhaat korrelaatiot osoittavat, että vaakasuorat dispersion kertoimet  $\sigma_y$  muodostavat suoraparven (eri olosuhteille), mutta niiden kulmakerroin on 0,894 eikä 0,5. Pystysuoran dispersion kerroin  $\sigma_z$  muodostaa viuhkamaisen kuvion eri ilmakehän olosuhteille.



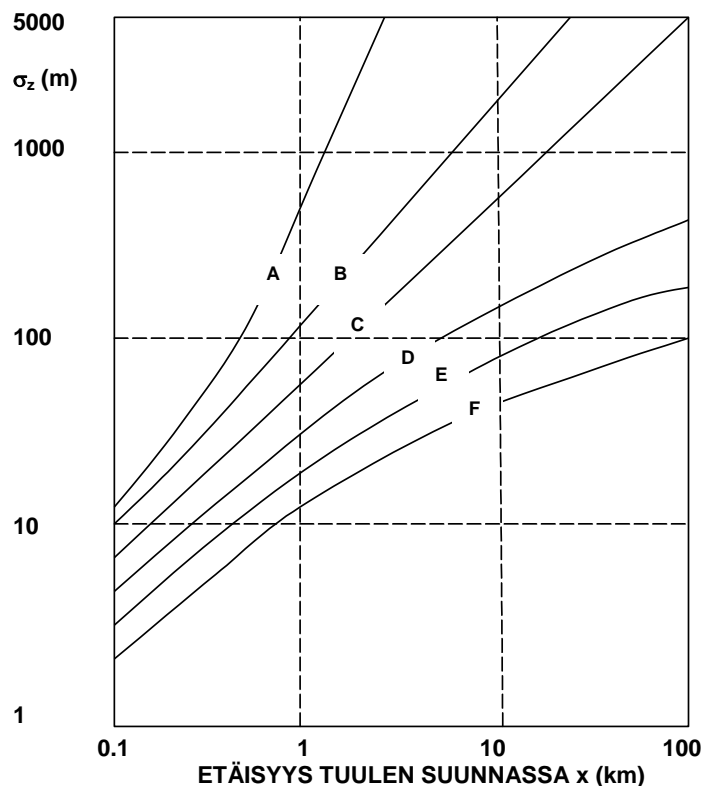
Kuva 13.7. Vaakasuora dispersiokerroin  $\sigma_y$  etäisyyden funktiona (etäisyys lähteestä tuulen suunnassa) erilaisille stabiiliuskategorioille.

Kokeelliset tulokset ovat ristiriidassa edellä esitetyn teorian kanssa, koska siinä ilmacehän sekoittumisen yhtälö (13.14) on liian yksinkertainen huomioidakseen kaikki ilmacehässä todella tapahtuvat ilmiöt. Eli edellä suoritetun derivoinnin avulla saadaan looginen massatase päästöjen dispersiolle pistemäisestä lähteestä, joka on kuitenkin suuri yksinkertaistus todellisuudesta. Mutta  $\sigma_y$ :a  $\sigma_z$ :a täytyy pitää kokeellisina arvoina, joiden arvoa ei voida vielä teoriasta laskea. Mutta jos kuvia 13.7 ja 13.8 pidetään riittävinä kokeellisten tulosten edustajina, voidaan käyttää niitä yhdessä yhtälön (13.27) kanssa, kun tehdään oletuksia konsentraatiosta myötätuulen suuntaan. Tämä on yleisin tällä hetkellä käytössä oleva menetelmä rutiinilaskelmissa konsentraation leviämisestä.

Kuvien 13.7 ja 13.8 perusteena oleva kokeellinen tieto on rajoitettua ja ei välttämättä suoraan sovellettavissa kaupunkeihin. Suurin osa tiedosta otettiin tasaisista tuulista ruohoarojen yläpuolelta. Niitä sovelletaan kuitenkin kaupunkeihin, koska parempaa tietoa ei ole tarjolla. Kuvaajat perustuvat mittauksiin, joissa  $x \leq 1$  km. Tämän etäisyyden ylittävät arvot on ekstrapoloitu. Vertailut kokeisiin osoittavat, että mallin kehittyneet versiot ennustavat konsentraatioita melko hyvin. Kirjaimet A–F kuvissa 13.7 ja 13.8 esittävät ilmacehän stabiiliuden tasoja. Kirkkaana, kuumana kesäaamuna, kun tuuli on heikkoa, aurinko



lämmittää maata, joka lämmittää puolestaan yläpuolista ilmaa ja aiheuttaa ilman nousemisen ja näin sekoittaa saasteet tehokkaasti. Ilmakehä on epästabiili ja  $\sigma_y$  ja  $\sigma_z$  ovat suuria. Pilvettömänä talvivyönä maa jäähtyy viilentäen ilmaa. Ilma muodostaa inversiokerroksen, jolloin ilmakehästä tulee stabiili ja saasteiden sekoitus estyy, joten  $\sigma_y$  ja  $\sigma_z$  ovat pieniä.



Kuva 13.8. Pystysuora dispersiokerroin  $\sigma_z$  etäisyyden funktiona (etäisyys lähteestä tuulen suunnassa) erilaisille stabiiliuskategorioidelle.

### Esimerkki 13.5.

Arvioi  $\sigma_y$ :lle ja  $\sigma_z$ :lle arvot pisteessä, joka on 0,5 km päästölähteestä tuulen suuntaan kirkkaana kesäpäivänä. Tuulen nopeus on 6 m/s. Taulukosta 13.1 voidaan päätellä, että kirkkaana kesäpäivänä auringon säteily on ”voimakasta”, joten käytetään kategoriata C. Kuvista 13.7 ja 13.8 luetaan arvot  $\sigma_y = 56$  m ja  $\sigma_z = 32$  m.

Taulukko 13.1. Stabiiliuskategoriat

Päivä                      Yö

Pinnan tuulen nopeus (10m), m/s	Tuleva auringonsäteily			Ohutta pilveä tai $\geq 4/8$ pilviä	Selkeää tai $\leq 3/8$ pilviä
	Voimakas	Kohtalainen	Heikko		
0–2	A	A-B	B	—	—
2–3	A-B	B	C	E	F
3–5	B	B-C	C	D	E
5–6	C	C-D	D	D	D
$\geq 6$	C	D	D	D	D

### 13.1.3 Sovelluksia

Tällä hetkellä yhtälö (13.27) on paras yksinkertainen menetelmä konsentraatioiden enustamisessa savupatsaissa, jotka ovat korkealla maasta. Yleensä ollaan kuitenkin kiinnostuneempia konsentraatioista maan tasolla. Sokea yhtälön (13.27) sovellus antaa harhaanjohtavia tuloksia. Sen mukaan komponentti jatkaa leviämistään kaikilla  $z$ :n arvoilla, jopa negatiivisilla.

Maa vaimentaa pystysuoraa dispersiota. Ylös ja alas kulkevat satunnaiset pyörteet, jotka levittävät savua pystysuuntaan eivät voi tunkeutua maahan. Tämän huomioiminen laskuissa tapahtuu yleensä olettamalla, että komponentit, jotka olisivat ilman maata kulkeutuneet alle  $z = 0$ , ”heijastuvat” takaisin ylöspäin aivan kuin maa olisi peili. Eli konsentraatio on savupatsaan aiheuttama konsentraatio lisättynä maasta heijastunut konsentraatio. Savupatsaan peilikuvan aiheuttama konsentraatio on sama kuin yhtälössä (13.27) paitsi että  $(z-H)^2$  korvataan  $(z+H)^2$ :lla. Sen mukaan maan tasolla,  $z=0$  sekä pääsavupatsaan että peilikuvan arvot ovat samat. Korkealla ilmassa, esimerkiksi korkeudella  $z=H$ , oikealla savupatsaalla on suuri konsentraatio [ $\exp(0)=1$ ], kun peilikuvan konsentraatio, esim.  $\exp[-1/2(2H/\sigma_z)^2]$ , on pieni. Yhdistetty vaikutus saadaan, kun kirjoitetaan yhtälö (13.27) ja analoginen yhtälö peilikuvulle, lasketaan ne yhteen, jolloin saadaan

$$c = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{-0,5(y/\sigma_y)^2} \left\{ e^{-0,5[(z-H)/\sigma_z]^2} + e^{-0,5[(z+H)/\sigma_z]^2} \right\} \quad (13.29)$$

#### Esimerkki 13.6.

Esimerkissä 13.4 laskettiin konsentraatio 20 metrin päässä savupatsaan keskiviivasta. Maan vaikutusta ei huomioitu. Toista lasku tapauksille  $H=20\text{m}$  ja  $H=30\text{m}$ .

Tapaukselle  $H=20\text{m}$  lasketaan konsentraatio maan tasolla. Yhtälöstä (13.29) huomataan, että kun  $z=0$ , kaksi sulkeissa olevaa termiä oikealla ovat identtiset ja kumpikin on yhtä

suuri kuin esimerkissä 13.4. Siten vastaus on tasan kaksi kertaa esimerkin 13.4 termin suuruinen eli  $2 \times 145 \mu\text{g}/\text{m}^3 = 290 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tämä on yleinen tulos tapaukselle, jossa  $z=0$ . Yhtälö (6.29) antaa kaksinkertaisen tuloksen yhtälön (13.27) tulokseen verrattuna. Tapaukselle  $H=30\text{m}$  saadaan

$$c = 1770 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} e^{-0,5\left(\frac{60\text{m}}{30\text{m}}\right)^2} \left[ e^{-0,5\left(\frac{10\text{m}-30\text{m}}{20\text{m}}\right)^2} + e^{-0,5\left(\frac{10\text{m}+30\text{m}}{20\text{m}}\right)^2} \right] = 1770 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} e^{-2} [e^{-1/2} + e^{-2}] = 177 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$$

Tästä huomataan, että kolmanneksen kauempana maasta kuin savupatsaan keskiviiva, yhtälö (13.29) antaa 22 % suuremman tuloksen kuin yhtälö (13.27). Yhtälö (13.29) pätee hyvin maan tasolle ja sitä korkeammalle. Suurilla  $z$ :n arvoilla  $(z+H)^2$ :n vaikutus tulee olemattomaksi ja tulos on lähes sama kuin yhtälöllä (13.27) saatu. Useimmiten ollaan kiinnostuneita maan tason konsentraatioista. Jos sijoitetaan  $z = 0$  yhtälöön (13.29) ja supistetaan, saadaan

$$c = \left[ Q / (2\pi\sigma_y\sigma_z) \right] e^{[-0,5(y/\sigma_y)^2]} e^{[-0,5(H/\sigma_z)^2]} \quad \text{kun } z = 0 \quad (13.30)$$

Tätä voidaan pitää yhtälön (13.27) muunnelmana maan tasolle, jossa otetaan huomioon heijastus maan pinnalta. Yhtälöiden (13.27) ja (13.30) käyttöä on yksinkertaistettu monin tavoin. Seuraavaksi esitellään yksi tapa, joka on luultavasti hyödyllisin. Kun  $y=0$  ja  $z=0$ , mikä vastaa suoraan keskiviivan alapuolella olevaan maan tasoa,  $y$ :n eksponenttitermi tippuu pois yhtälöstä (13.30). Kun molemmat puolet kerrotaan  $u/Q$ :lla, saadaan

$$cu = \left[ Q / (\pi\sigma_y\sigma_z) \right] e^{-0,5(H/\sigma_z)^2}, \quad \text{kun } z = 0 \text{ ja } y = 0 \quad (13.31)$$

Oikean puolen yhtälö riippuu vain  $H$ :sta ja kahdesta dispersiokertoimesta.

### Esimerkki 13.7.

Laske yhtälön (12.31) oikeanpuoleinen termi, kun etäisyys tuulen suuntaan on  $x=0,5\text{km}$  ja  $H=50\text{m}$ , käyttäen C-luokan stabiiliutta. Esimerkistä 12.5 tiedetään, että C-stabiiliusluokalle  $x=0,5\text{km}$ ,  $\sigma_y=56\text{m}$  ja  $\sigma_z=32\text{m}$ . Eli

$$\frac{cu}{Q} = \frac{1}{\pi(56\text{m})(32\text{m})} \exp -0,5\left(\frac{50\text{m}}{32\text{m}}\right)^2 = 5,24 \cdot 10^{-5} \text{m}^{-2}$$

Jos lasku toistettaisiin suurelle määrälle eri etäisyyksiä ja tehollisia piipun korkeuksia, voitaisiin piirtää  $cu/Q$  piipun korkeuden funktiona. Kuvassa 13.9 on esitetty tällainen piirros, stabiiliusluokkaa C käyttäen.

**Esimerkki 13.8.**

Laitos tuottaa (~emittoi) 100g/s SO<sub>2</sub>:a piipusta, jonka tehollinen korkeus on  $H=50\text{m}$ . Tuulen nopeus on 3 m/s ja stabiiliusluokka C. Arvioi maan tason konsentraatiot suoraan savupatsaan keskiviivan alla etäisyyksillä 0.2; 0.4; 0.5; 1.5 ja 10 km tuulen suunnassa. Kuvasta 13.9 voidaan lukea suoraan  $cu/Q$ :n arvo, kun  $x=0.2\text{ km}$

$$c = (cu/Q)(Q/u) = (1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2})(100 \text{ g/s} / 3 \text{ m/s}) = 5,7 \cdot 10^{-5} \text{ g/m}^3 = 57 \mu\text{g/m}^3$$

Muut arvot saadaan vastaavasti.

<b>Etäisyys (km)</b>	<b><math>cu/Q</math> (m<sup>-2</sup>)</b>	<b><math>c</math> (μg/m<sup>3</sup>)</b>
0,2	$1,7 \cdot 10^{-6}$	57
0,4	$4,4 \cdot 10^{-5}$	1467
0,5	$5,3 \cdot 10^{-5}$	1767
1,0	$3,6 \cdot 10^{-5}$	1200
5,0	$2,7 \cdot 10^{-6}$	83
10	$7,8 \cdot 10^{-7}$	24

Jos toistetaan esimerkki 13.8 eri päästönopeudella tai tuulen nopeudella, huomataan, että  $(cu/Q)$ :n muodosta johtuen muutokset voidaan tehdä yksinkertaisella kertolaskulla. Jos halutaan tietää maan tason maksimikonsentraatio ja etäisyys päästölähteestä, voidaan se saada selville tarkastelemalla kuvaa 13.9.

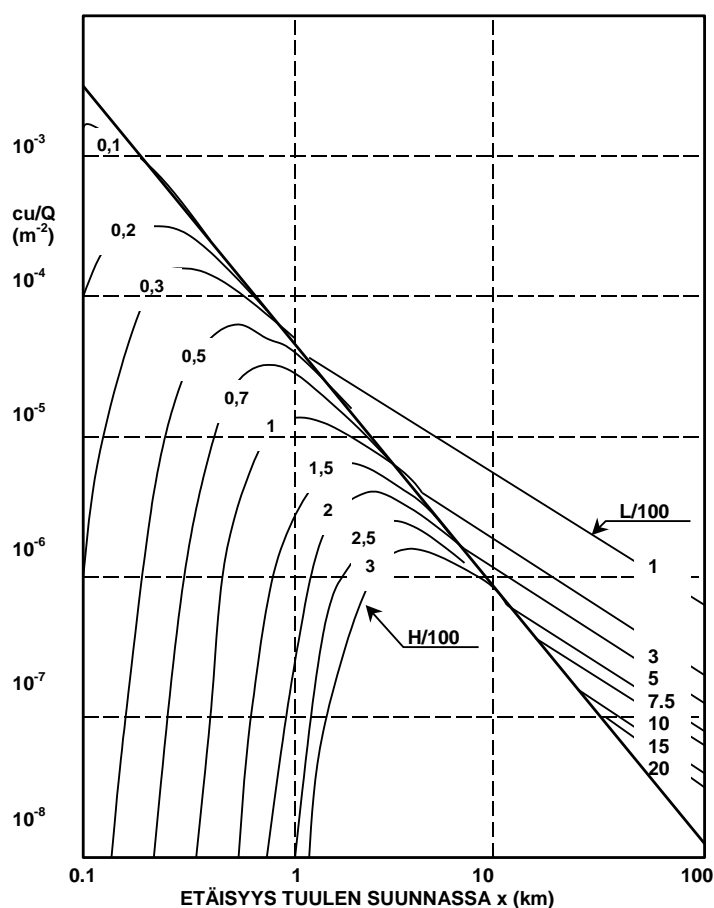
**Sekoituskorkeuden rajat, 1-D leviäminen.**

Kun savupatsas virtaa tuulen suunnassa, se kasvaa, kunnes se on täydellisesti sekoittunut sekoituskorkeuden  $H$  alapuolella (kuva 13.1). Sen jälkeen se ei enää leviä pystysuoraan vaan ainoastaan vaakasuoraan, joten 2-D leviäminen on muuttunut 1-D leviäväksi. Kuvan 13.9 sekoituskorkeutta on merkitty  $L$ :llä ja viivat on piirretty suurista kulkuetäisyyksistä, mikä osoittaa, että havaitut konsentraatiot ovat suuremmat kuin 2-D leviämisen kaavoilla lasketut konsentraatiot suurille etäisyyksille. Laatikkomallissa  $H$  on sekoituskorkeus ja  $L$  kaupungin pituus tuulen suunnassa. Gaussin savupatsasmallissa taas  $H$  on piipun tehollinen korkeus ja  $L$  sekoituskorkeus. Palataan yhtälöön (13.19), josta huomataan, että vaakasuoraan levinneen päästön määrä on

$$X = Q/(uL) \tag{13.32}$$

mikä selittää sen, että savupatsaan 2-D leviäminen tapahtuu tasaisesti korkeuden  $L$ . Sijoitetaan tämä yhtälöön (6.19) ja tehdään yhtälöiden (6.24)-(6.26) sijoitukset, jolloin saadaan

$$c = Q / (\sqrt{2\pi u L \sigma_y}) \times e^{-0.5(y/\sigma_y)^2} \quad (13.33)$$



Kuva 13.9.

Maan tason  $c_u/Q$  (suoraan savupatsaan keskiviivan alapuolella) etäisyyden funktiona ja tehollinen piipun korkeus  $H$  metreinä C-kategorialle.  $L$  on ilmakehän sekoituskorkeus metreissä.

Tätä yhtälöä ( $y=0$ ) on käytetty, kun kuvaan 13.9 on tehty oikeanpuoleiset suorat. Savupatsas muuttuu yhä himmeämmäksi ja himmeämmäksi kulkiessaan tuulen mukana muuttuen lopulta näkymättömäksi. Syy tähän on se, että tyypillinen savupatsas leviää kahteen suuntaan ( $y$  ja  $z$ ), mutta patsasta katsova henkilö näkee sen vain yhdessä suunnassa (1-D). Savupatsaan sameus (näkyvä paksuus) saadaan yhtälöstä

$$D_{sp} = C_{d,opt} \times \int_{sp} c dy \quad (13.34)$$

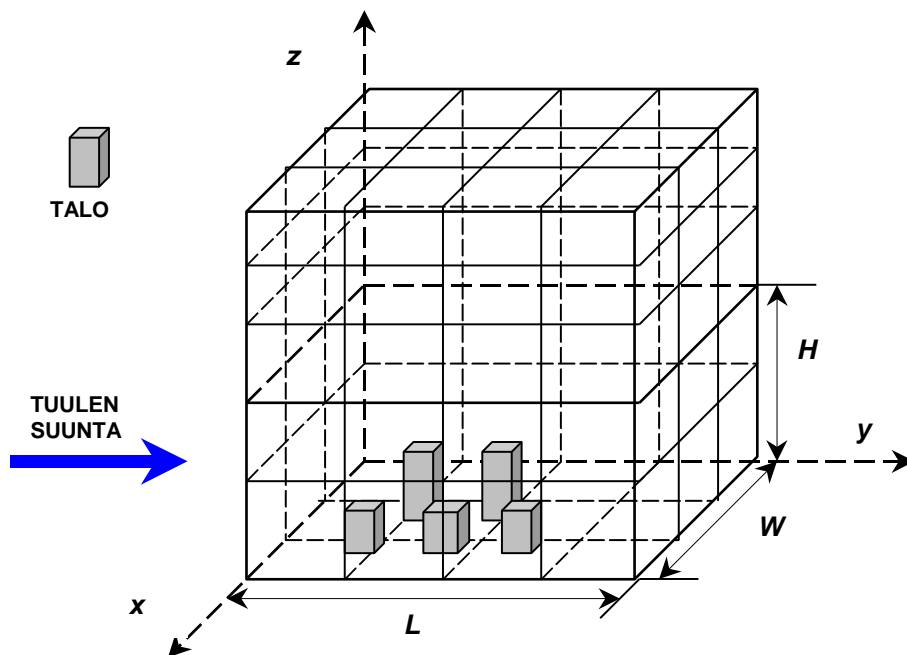
jossa  $D_{sp}$  ja  $C_{d,opt}$  ovat savupatsaan paksuus ja partikkelin koon ja optiset ominaisuudet huomioiva vakio. Mikäli savupatsas leviäisi vain yhteen suuntaan, integraali kaavan oikealla puolella olisi vakio ja patsaan näkyvä paksuus olisi riippumaton etäisyydestä tuulen suunnassa. Mutta normaalissa patsaan leviämisessä konsentraatio pienenee nopeammin kuin patsaan leveys kasvaa, joten integraalin arvo pienenee etäisyyden kasvaessa ja patsaan sameus häviää vähitellen.

### 13.1.4 Monisolumallit

Edellisiin monimutkaisiin yhtäaikaisiin reaktioihin hyvin ja tarkasti soveltuvia reaktionopeuden laskukaavoja ei ole esitetty. Eniten käytetty tällaisiin ongelmiin käytetty malli on monisolumalli, missä kaupungin yläpuolinen ilma on jaettu moniin soluihin, joita tarkastellaan erillisinä. Kuvassa 6.10 on esitetty tällainen solumalli. (yleensä mallia sovelletaan otsoniin, mutta sitä voitaisiin käyttää myös muiden sekundääristen päästöjen mallintamiseen).

UAM mallissa ruudukko  $x$  ja  $y$  -suunnassa on samankokoinen, normaalisti 2-5 km kumpaankin suuntaan. Pystysuorassa suunnassa on normaalisti neljä tai kuusi kerrosta, puolet sekoituskorkeuden alapuolella ja puolet yläpuolella. Rajat kulkevat ylös ja alaspäin sen mukaan, mikä on sekoituskorkeus päivän aikana ja paikasta riippuen kaupungissa. Kuvassa 6.10 on yhteensä  $5 \times 4 \times 3 = 60$  solua. Suurelle kaupungille soluja voi olla tuhansia.

Kaikki yhtälön (6.21) termit pätevät kullekin solulle. Mallisimulointi kaupungille jonakin ajanjaksona alkaa sillä, että oletetaan päästöjen alkujakautuma ja esiaste kaikissa soluissa. Sitten ohjelma laskee jollakin aika-askeleella, tyypillisesti 3-6 minuuttia, konsentraation muutoksen numeerisesti integroimalla yhtälön (6.1). Tämä vaatii tietoa tuulen nopeudesta ja suunnasta kunkin solun keskellä sekä kunkin maan tason solun arvioidut päästöt ja aliohjelman, joka laskee kemialliset muutokset aika-askeleen aikana soluissa. UAM laskee ensin tuulen aiheuttamat konsentraation muutokset solujen rajalla käyttäen edellisen aika-askeleen lopputilannetta. Sen jälkeen se laskee kemiallisten reaktiot soluissa. Lopuksi ohjelma laskee molempien tulokset lasketaan yhteen ja saadaan arvioi kunkin solun konsentraatiosta aika-askeleen kuluttua.



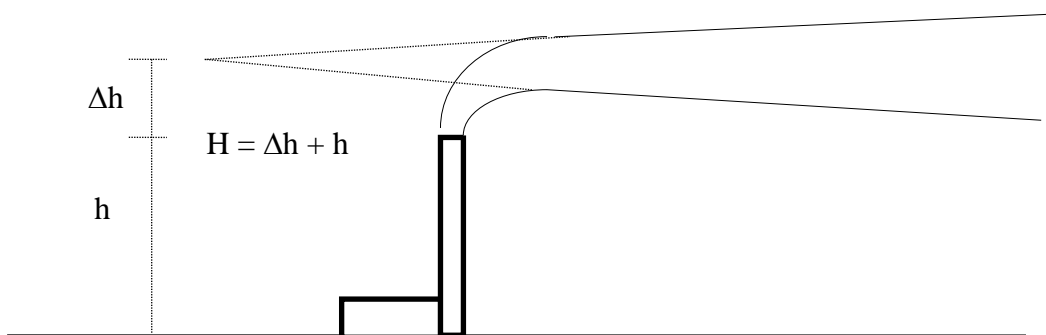
Kuva 13.10. UAM malli kaupungin yllä olevan ilman jakamiseksi pienempiin soluihin.

Kokonaisen päivän simuloimiseen tarvitaan tietoa tuulen käyttäytymisestä yleensä alueella sekä auringon säteilystä ja päästöistä. Jos tietoa ei ole saataville, ohjelma arvioi sen ja usein se valitsee päivän, jolloin konsentraatio on ollut suurin. Mallin säädeltäviä parametreja muokataan, kunnes ne tarpeeksi hyvin vastaavat päivän tilannetta. Ohjelma ajetaan sitten uudestaan eri päästöillä, joka vastaa odotettua tilannetta ja säätilaa kyseiselle päivälle. Näin malli suorittaa ennustuksen *pahimman päivän* tilanteesta odotetuilla päästöillä tulevaisuudessa. Malli soveltuu melko hyvin suurkaupunkeihin, joissa on paljon päästöjä, mutta huonosti alueisiin, joissa ongelmat ovat pienempiä tai joissa päästöt eivät muutu nopeasti ilmakehässä (esim.  $SO_2$ ), koska ohjelman tarvitsemaa suurta tietomäärää ei ole saatavilla.

## 13.2 Savupatsaan nousu

Kuvassa 13.3 on esitetty savupatsaan nousu  $\Delta h$  piipun yli ennen savun tasoittumista. Savu nousee ensin pystysuoraan ennen kuin liike muuttuu vaakasuoraksi. Patsaat nousevat kevyesti, koska ne ovat kuumempia kuin ympäröivä ilma ja koska ne tulevat piipusta pystysuoralla nopeudella, joka nostaa niitä ylöspäin. Niiden nousu ylös pysähtyy, koska sekoittuessaan ympäröivään ilmaan ne menettävät nopeuttaan ja jäähtyvät sekoituksen vaikutuksesta. Lopulta ne tasoittuvat, kun niiden lämpötila on sama kuin ympäristön lämpötila.

Savukaasujen vapautuessa savupiipusta nämä yleensä nousevat savupiipun huippua korkeammalle johtuen savukaasujen sisältämästä liike- ja lämpöenergiasta. Tämä savunou-  
sema on merkittävä varsinkin lähialueiden pitoisuuksia ajatellen. Tehollinen päästökor-  
keus on savunouseman ja piipun todellisen korkeuden summa. Tämä on esitetty seuraa-  
vassa kuvassa.s



Kuva 13.11. Savunouseman  $\Delta h$  määrittelmä.

Savunouseman suuruutta pystytään arvioimaan laskentaamallien avulla. Esimerkiksi Briggsin kaavoilla laskettu savukaasunousetta  $\Delta h$  on:

Savukaasujen lämpösisältö  $Q_h > 20 \text{ MW}$ ,

$$x < 10 \text{ h} \quad \Delta h = \frac{1.6 \cdot F_b^{1/3} \cdot x^{2/3}}{u} \quad (13.35)$$

$$x > 10 \text{ h} \quad \Delta h = \frac{1.6 \cdot F_b^{1/3} \cdot (10h)^{2/3}}{u} \quad (13.36)$$

$F_b$  on savukaasujen lämpösisältöä kuvaava parametri,



$$F_b = \frac{9.82 \cdot Q_h}{3.14 \cdot c_{ps} \cdot T_a \cdot \rho_s} \quad (13.37)$$

Jos savukaasujen lämpösisältö  $Q_h < 20 \text{ MW}$

$$\Delta h = \frac{1.6 F_b^{1/3} (3.5 x^*)^{2/3}}{u}, \quad (13.38)$$

$$x^* = 2.16 F_b^{0.4} h^{0.6}. \quad (13.39)$$

Kaavoissa

$F_b$	on	savukaasun lämpösisältöparametri	(-)
$u$	on	tuulen nopeus	(m/s)
$h$	on	piipun korkeus	(m)
$c_p$	on	savukaasun ominaislämpö	(kJ/kgK)
$Q_h$	on	savukaasujen lämpöteho	(W)
$x$	on	vaakaetäisyys piipusta	(m)

Hollandin malli on muotoa:

$$\Delta h = \frac{v_s}{u} D \left[ 1.5 + \left( \frac{2.68 \cdot 10^{-3} \cdot p \cdot (T_s - T_a) \cdot D}{T_s} \right) \right] \quad (13.40)$$

Kaavassa

$u$	on	tuulen nopeus	(m/s)
$v_s$	on	kaasun nopeus sen poistuessa piipusta	(m/s)
$T_s$	on	kaasun lämpötila piipussa	(K)
$T_a$	on	ulkoilman lämpötila	(K)
$p$	on	ulkoilman paine (= savukaasun paine)	(mbar)
$D$	on	piipun halkaisija	(m)

Carson ja Moses –korrelaatiolla savunousema saadaan kaavalla:

$$\Delta h = -0.029 \frac{v_s}{u} D + 2.62 \frac{Q^{0.5}}{u} \quad (13.41)$$

Kaavassa

$v_s$  on savukaasun nopeus (m/s)

$Q$  on savukaasun lämpösisältö ( $m_s \cdot c_p \cdot \Delta T$ ) (kW)

## LÄHTEET

1. Jotuni, P., Ryti H., Otto Pöyhönen. 1967. Tekniikan käsikirja 2. Kahdeksas painos. K.J. Gummerus Osakeyhtiö, Jyväskylä
2. Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J., Hupa, M. 1995. Poltto ja palaminen. Gummerus Kirjapaino, Jyväskylä.
3. Borman, G., Ragland K. 1998. Combustion Engineering. McGraw-Hill, Singapore.
4. Laitinen, R., Toivonen, J. 1995. Yleinen ja epäorgaaninen kemia. Otava, Hämeenlinna
5. Raiko, R., Huhtanen, J-P. 1990. Ilman ja savukaasun entalpian ja ominaislämmön polynomisovitteet. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Raportti nro 72, Tampere.
6. Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P., Pakkanen, H. 1997. Höyrykattilatekniikka. EDITA, Helsinki.
7. Fogelholm, C-J. 1994. Energiatalous ja ympäristönsuojelu. Hakapaino Oy, Helsinki.
8. de Nevers, Noel. 2000. Air Pollution Control Engineering. Second Edition, USA
9. Flegan, R., Seinfeld, J. 1988. Fundamentals of Air Pollution Engineering. Prentice Hall, New Jersey
10. Kara, M., Mattila, L. et al. 1999. Energia Suomessa. 2. Painos. Oy Edita Ab, Helsinki
11. Turunen T. 2008. Energiakatsaus 4/2007. Työ- ja elinkeinoministeriö, energiaosasto. Suomen graafiset palvelut, Kuopio.
12. Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus [verkojulkaisu]. ISSN=1799-795X. 2012. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 13.12.2013]. Saantitapa: [http://www.tilastokeskus.fi/til/ehk/2012/ehk\\_2012\\_2013-12-12\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.tilastokeskus.fi/til/ehk/2012/ehk_2012_2013-12-12_tie_001_fi.html)
13. NESTE. 1989. Öljykattilalaitoksen käyttö- ja suunnittelutietoa. Valtion painatuskeskus, Helsinki
14. Kiely, G. 1997. Environmental Engineering. McGraw-Hill, United States of America

15. ETY. 1989. Kaukolämmityksen käsikirja. ETY, raportti 23/1989, Helsinki
16. Ympäristökeskuksen nettisivut. Kattilalaitosten ympäristölupaohje. 16.12.2003  
<http://www.vyh.fi/palvelut/lomake/ymlupa/kattilaliiteohje.pdf>
17. <http://energia.fi/julkaisut/ie-direktiivin-paastoraja-arvojenkustannusvaikutukset-suurille-polttolaitoksille-poyry-en>
18. Suurten polttolaitosten savukaasujen puhdistusmenetelmät, 2016, Matias Pessa  
[https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/122833/Kandidaatintyo\\_Pessa\\_Matias.pdf?sequence=2](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/122833/Kandidaatintyo_Pessa_Matias.pdf?sequence=2)
19. savukaasujen puhdistus kotimaisen polttoaineen kattilalaitoksessa, 2014, Tuomas Paso,  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/70577/PASO\\_TUOMAS.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/70577/PASO_TUOMAS.pdf?sequence=1)

# LIITTEET

## Liite 1

### Etuliitteitä

p =	piko	=	$10^{-12}$	k	=	kilo
	=		$10^3$			
n =	nano	=	$10^{-9}$	M	=	mega
	=		$10^6$			
$\mu$ =	mikro	=	$10^{-6}$	G	=	giga
	=		$10^9$			
m =	milli	=	$10^{-3}$	T	=	tera
	=		$10^{12}$			
c =	sentti	=	$10^{-2}$	P	=	peta
	=		$10^{15}$			
d =	desi	=	$10^{-1}$			

### Energian yksiköitä

Toe	=	ekvivalenttinen öljytonni	J	=	joule
Wh	=	wattitunti	cal	=	kalori

## Liite 2

### Energiayksiköiden muuntokertoimet

	TJ	Gcal	Mtoe	GWh
TJ	1	239	$23,9 \cdot 10^{-6}$	0,278
Gcal	$4,19 \cdot 10^{-3}$	1	$10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$
Mtoe	$41,9 \cdot 10^3$	$10^7$	1	$11,6 \cdot 10^3$
GWh	3,6	$0,860 \cdot 10^3$	$86,0 \cdot 10^{-6}$	1

**Liite 3**

Polttoaineiden muutto ekvivalenteiksi öljytonneiksi:

Raakaöljy	t	=	1	toe
Raskas polttoöljy (normaali)	t	=	0,970	toe
Raskas polttoöljy (vähärikkinen)	t	=	0,982	toe
Kevyt polttoöljy	t	=	1,015	toe
Dieselöljy	t	=	1,02	toe
Petrolit	t	=	1,034	toe
Teollisuusbenssiini	t	=	1,059	toe
Moottori- ja lentobensiinit	t	=	1,035	toe
Kivihiili	t	=	0,611	toe
Koksi	t	=	0,669	toe
Maakaasu	1000m <sup>3</sup> (0 °C)	=	0,859	toe
Jyrsinturve	m <sup>3</sup>	=	0,078	toe

**Liite 4**Energian kokonaiskulutus energialähteittäin (1000 toe) ja CO<sub>2</sub>-päästöt (Mt) /12/.

vuosi	Öljy	Hiili	Maakaasu	Ydinenergia	Sähkön nettotuonti	Vesi- ja tuulivoima	Turve	Metsäteollisuuden jäteliemet	Teollisuuden ja energiatuotannon puupolttoaineet	Puun pienkäyttö	Muut	ENERGIAN KOKONAISKULUTUS	CO <sub>2</sub> -päästöt (Mt)
1970	9 861	2 263	0	0	45	811	21	1 154	354	1 615	144	17 208	40
1975	10 771	2 263	632	0	343	1 039	42	0	0	0	172	18 386	44
1980	10 994	4 209	769	1 726	104	870	407	1 785	823	1 051	143	22 615	54
1985	9 204	4 007	815	4 685	406	1 050	983	2 105	837	1 063	218	24 979	51
1990	9 024	3 997	2 168	4 723	924	924	1 273	1 994	783	1 072	233	27 261	53
1995	8 291	4 002	2 810	4 723	723	1 100	1 897	2 619	1 343	1 120	235	28 738	55
2000	8 497	3 562	3 389	5 622	1 021	1 249	1 493	3 294	2 024	1 084	366	31 602	53
2005	8 673	3 117	3 562	5 825	1 463	1 169	1 651	3 156	2 269	1 292	560	32 736	53
2006	8 740	5 182	3 807	5 733	980	986	2 240	3 727	2 474	1 335	552	35 756	64
2007	8 633	4 573	3 522	5 863	1 080	1 219	2 447	3 656	2 227	1 347	606	35 172	62
2008	8 316	3 391	3 601	5 745	1 098	1 476	1 949	3 433	2 476	1 407	723	33 617	53
2009	8 013	3 631	3 214	5 889	1 039	1 105	1 719	2 631	2 334	1 498	773	31 846	51
2010	8 438	4 516	3 551	5 703	903	1 121	2 258	3 241	2 773	1 663	853	35 021	59
2011	8 068	3 543	3 106	5 801	1 191	1 097	2 029	3 227	2 909	1 418	864	33 254	52
2012*	7 798	3 107	2 762	5 749	1 500	1 468	1 577	3 263	2 862	1 488	925	32 499	4

\*ennakkotieto

**Liite 5**

Kaasumaisten polttoaineiden ominaisuuksia.

Ominaisuus		Maakaasu	Biokaasu
Kosteus	%	-	2
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa	MJ/kg	35.6	15.8
Tiheys	MJ/m <sup>3</sup> (n)	0.72	
Metaani, CH <sub>4</sub>	mol-%	>98	50
Etaani, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	mol-%	>1	-
Propaani, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ja muut hiilivedyt, C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	mol-%	<0.5	-
Typpi, N <sub>2</sub>	mol-%	<1	-
Hiilidioksidi, CO <sub>2</sub>	mol-%	0.03	38

**Liite 6**

Kiinteiden polttoaineiden tyypillisiä ominaisuuksia.

Ominaisuus		Kivihiili,	Kivihiili,	Jyrsin-	Puu	Kuori,	Kuori,	Kuori,
		Puol.	Engl.	turve		Koivu	Mänty	
Kosteus	%	9	12	50	55	55	60	60
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa	MJ/kg	28,8		20,8	19,1	22,7	20,0	18,6
Kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo	MJ/kg	26		9,2	7,25	8,9	6,5	6,0
Irtotiheys saapumistilassa	kg/i-m <sup>3</sup>			340	150-350		250-350	250-350
Kuiva-aineen koostumus								
Hiili, C	p-%	73,2	75,7	55,0	50,4	56,6	54,5	50,6
Vetyttöisyys, H <sub>2</sub>	p-%	4,7	4,7	5,5	6,2	6,8	5,9	5,9
Rikkittöisyys, S	p-%	1,0	1,0	0,2				
Happipitoisuus, O <sub>2</sub>	p-%	9,1	6,0	32,6	42,5	34,2	37,7	40,2
Typpipitoisuus, N <sub>2</sub>	p-%	1,0	1,6	1,7	0,5	0,8	0,3	0,5
Tuhkapitoisuus	p-%	11,0	11,0	5,0	0,4	1,6	1,6	2,8

## Liite 7

Nestemäisten polttoaineiden tyypillisiä ominaisuuksia.

Ominaisuus		Kevyt polttoöljy	Raskas polttoöljy
Kosteus	%	0,01	0,3
Tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa	MJ/kg	42,7	40,7
Kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo	MJ/kg	42,7	40,6
Irtoiheys saapumistilassa	Kg/m <sup>3</sup>	840-845 (15°C)	920-1020 (15°C)
Kuiva-aineen koostumus			
Hiili, C	p-%	86,17	87,76
Vetyttöisyys, H <sub>2</sub>	p-%	13,7	10,4
Rikkittöisyys, S	p-%	0,1	0,9
Happipitoisuus, O <sub>2</sub>	p-%		0,5
Typpipitoisuus, N <sub>2</sub>	p-%	0,02	0,4
Tuhkapitoisuus	p-%	0,01	0,04

## Liite 8

Hiilidioksidin päästökertoimia.

	tCO <sub>2</sub> /TJ
Bensiini	72,8
Raskas polttoöljy	76,6
Kevyt polttoöljy	73,4
Dieselöljy	73,8
Kivihiili	92,7
Nestekaasu	62,5
Maakaasu	55,8
Biokaasu	55,5
Mustalipeä	108,9
Jyrsin- ja palaturve	104,9
Hake, kuori, puru	108,5
muu puu	108,5



**Liite 9****Ominaisuudet**

<i>SUURE</i>	<i>MER-KINTÄ</i>	<i>MKS-järjestelmä</i>	<i>Tekn. järj.</i>	<i>CGS-järj.</i>	<i>Tekn. yks.</i>	<i>CGS. Yks.</i>
Ominaisentalpia	h	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = J/kg	kcal/kg	cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = erg/sg	0,239	10 <sup>4</sup>
Ominais-sisäenergia	u	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = J/kg	kcal/kg	cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = erg/sg	0,239	10 <sup>4</sup>
Ominais-entropia	s	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> K = J/kgK	kcal/kgK	cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> = erg/sgK	0,239	10 <sup>4</sup>

**Lämpötila**

Lämpötilalle on yleisesti käytössä kolmenlaisia asteikkoja, nimittäin Celsius, Kelvin ja Fahrenheit –asteikot. Meillä on lisäksi käytössä prof. H. Rytin kehittämä lämpötila-asteikko, jossa laatuna on MJ/kmol. Merkitään lämpötiloja eri asteikoissa luetellussa järjestyksessä  $t_C$ ,  $T_K$ ,  $t_F$  ja  $T_{Ryti}$ . Näiden välillä ovat seuraavat riippuvuudet.

$$t_C = T_K - 273,15 = \frac{5}{9}(t_F - 32)$$

$$T_K = t_C + 273,15 = \frac{5}{9}t_F + 255,37 = T_{Ryti} \cdot 120,28$$

$$t_F = \frac{9}{5}t_C + 32 = \frac{9}{5}T_K - 459,67$$

$$T_{Ryti} = T_K / 120,28$$

**Paine**

<i>Paine-yksikkö</i>	<i>Psi</i>	<i>Hg-tuuma</i>	<i>atm</i>	<i>bar</i>	<i>at</i>	<i>Torr</i>
1 psi	1	2,036	0,068	0,069	0,070	51,72
1 Hg-tuuma	0,491	1	0,033	0,034	0,035	25,4
1 atm	14,70	29,92	1	1,013	1,033	760
1 bar	14,50	29,53	0,987	1	1,020	750,1
1 at	14,22	28,96	0,968	0,981	1	735,6
1 Torr	0,019	0,039	0,001	0,001	0,001	1

psi = pound per square inch (Englanti, USA)

atm = fysikaalinen ilmakehä

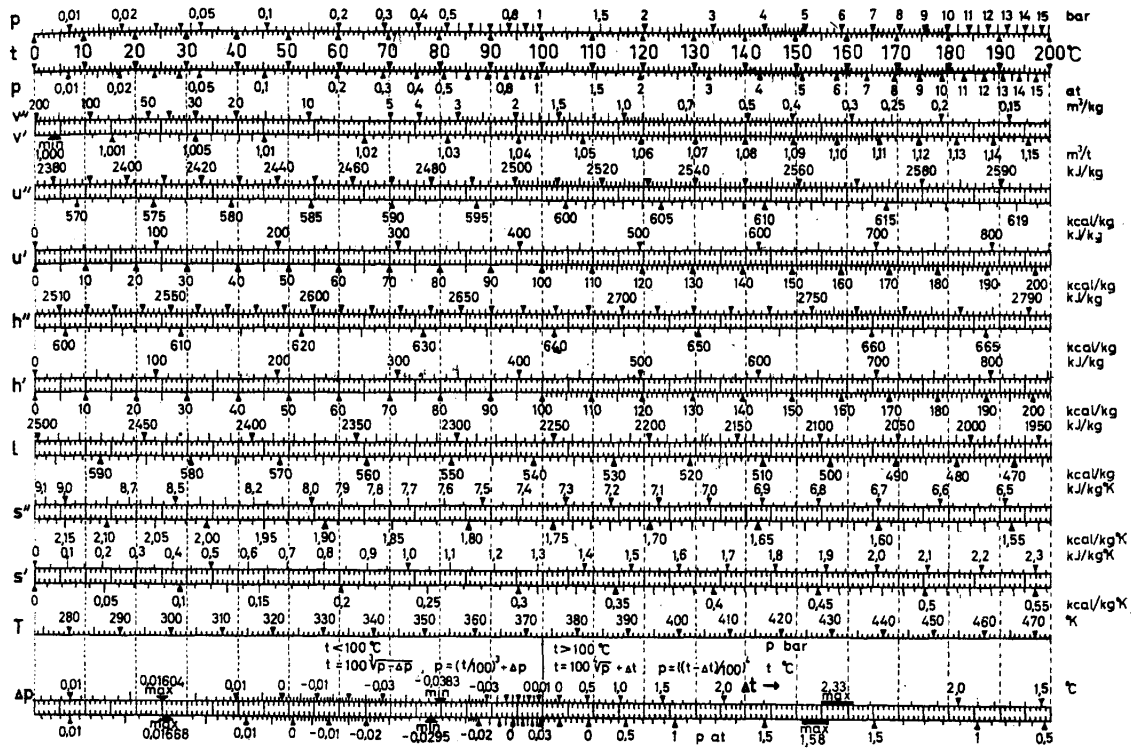
bar = 10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup>

at = teknillinen ilmakehä = 1 kp/cm<sup>2</sup>

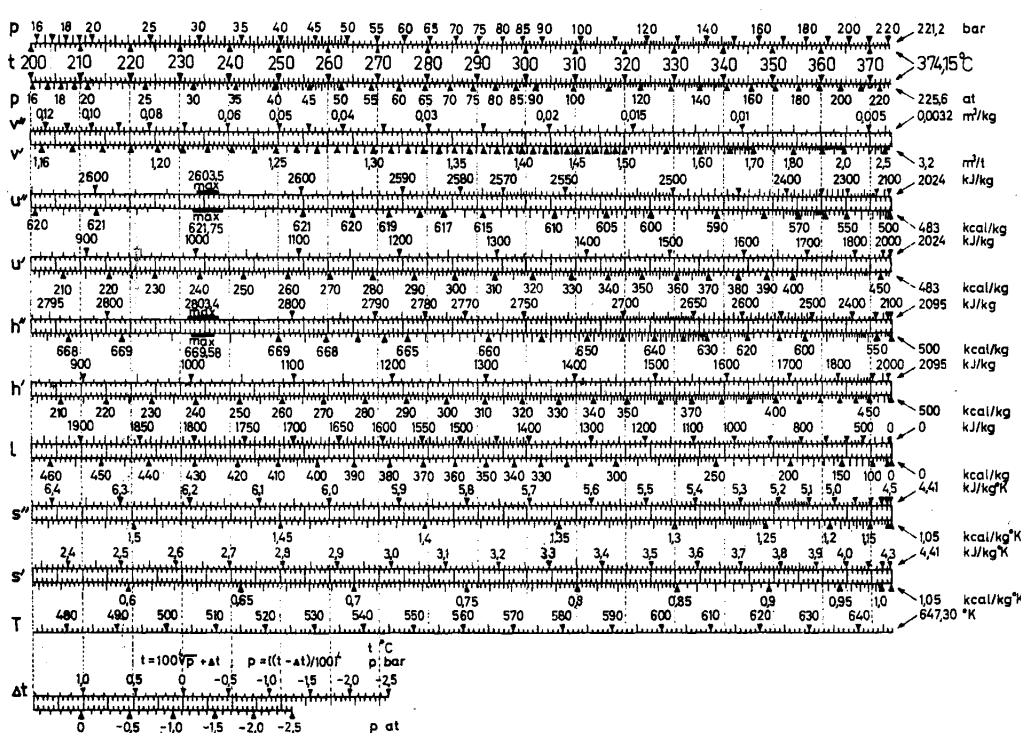
Torr = 1 mmHg 0°C :ssa

**Liite 10**

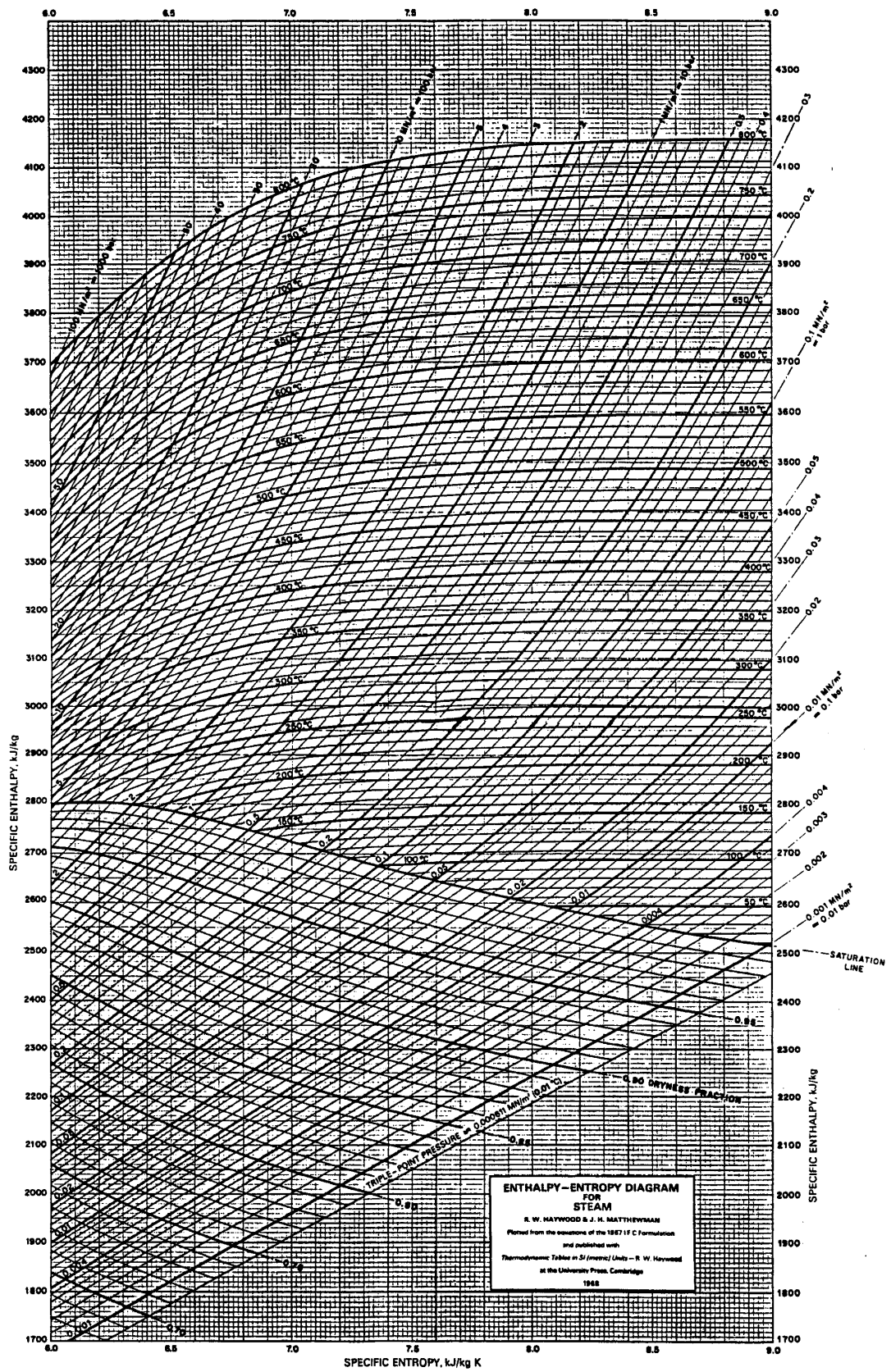
Kylläisen veden ja vesihöyryn ominaisuuksia.



Kuva 17 Kylläisen veden (C) ja vesihöyryn (C) ominaisuuksia. Alinmalla asteikkoja saadaan höyrynäytteen ja lämpötilan välisen yhteyden paremmalla tarkkuudella (alipäättää lukun-ottamatta) kuin yllämainittu. Kaavassa esiintyy eksponentti 3 kun  $t < 100^\circ\text{C}$  ja 4 kun  $t > 100^\circ\text{C}$ .  
 Lähde: F. G. Keyes: The Thermodynamic Properties of Water Substance, 0 to 150 °C, Chem. Phys. 1947, s. 602. 0-100 °C) ja H. F. Stimson, D. G. Dinglough: Thermal Properties of Saturated Water and Steam, NBS, R-1229, J. Res. NBS, 1959, s. 301. Lämpötila- ja paine-asteikot: Kallunki, J. ja Kallunki, P. (1970) Valt. Tekn. Tutk. Keskuksen julkaisu, s. 100-105. Jäl- kimmäinen: Osoiti, Aho Akademi, Laatinut dipl. ins. Mauri Sorininen

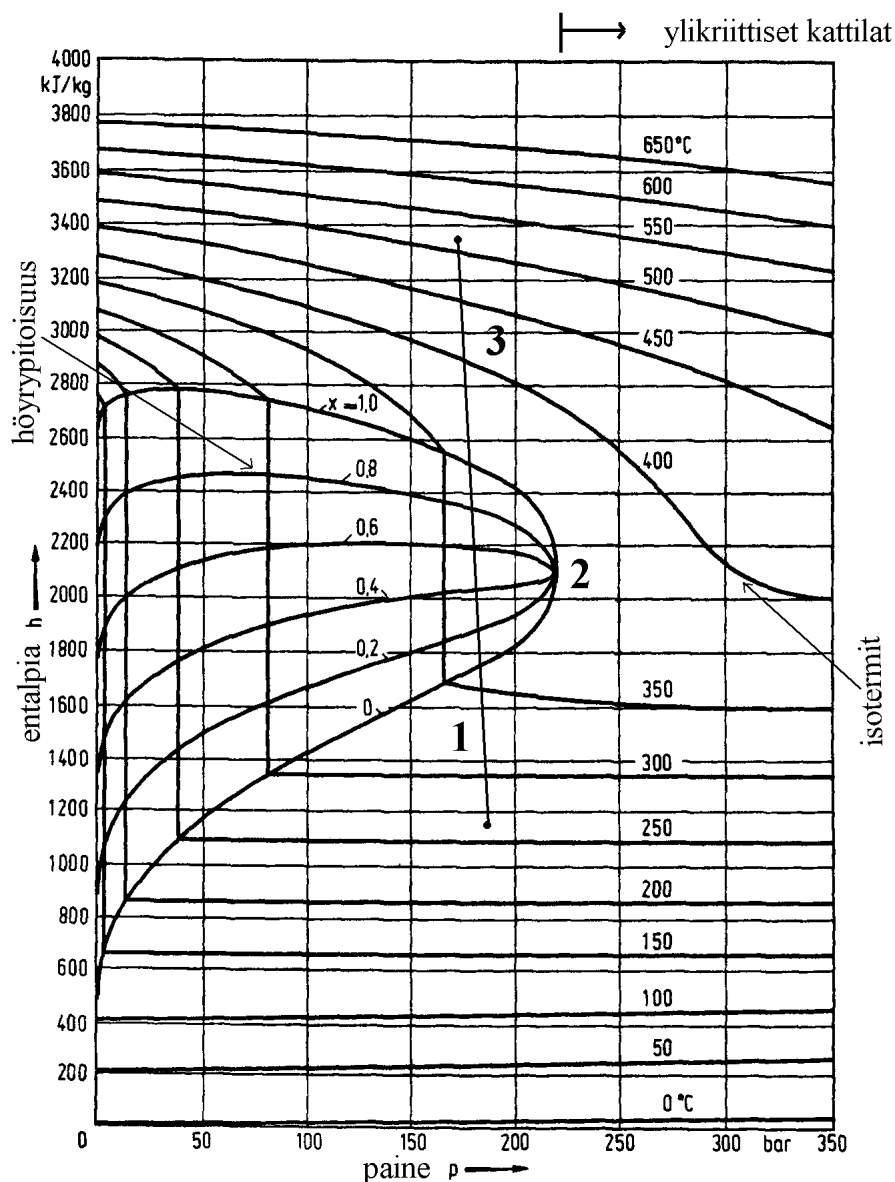


**Liite 11**  
hs-piirros



## Liite 12

Veden hp-piirros.



Kuvaan on merkitty eräässä kattilassa tapahtuva höyryn kehitys:

1. kattilan syöttövesi lämpiää ekonomaiserissa (=eko) kylläiseksi vedeksi
2. kylläinen vesi höyrystyy kylläiseksi höyryksi höyrystimessä
3. kylläinen höyry tulistuu tulistimessa.

Kattilan painehäviöistä pääosa tapahtuu tulistimissa.

Kuvasta selviää, että kriittisen paineen alapuolella pienikin paineen muutos muuttaa paljon höyrystymiseen tarvittavaa energiamäärää. Koska valmiissa kattilassa ei voida muuttaa lämpöpintojen määriä kuormituksen muuttuessa, ei kattiloita yleensä rakenneta painealueelle 200 – 220 bar.

## Liite 12

Orgaanisten yhdisteiden muodostumisentalpioita.

*Orgaanisten yhdisteiden molaarisia muodostumisentalpioita ja vapaita muodostumisentalpioita 25 °C, 1 atm* *1 cal = 4,1840 J*

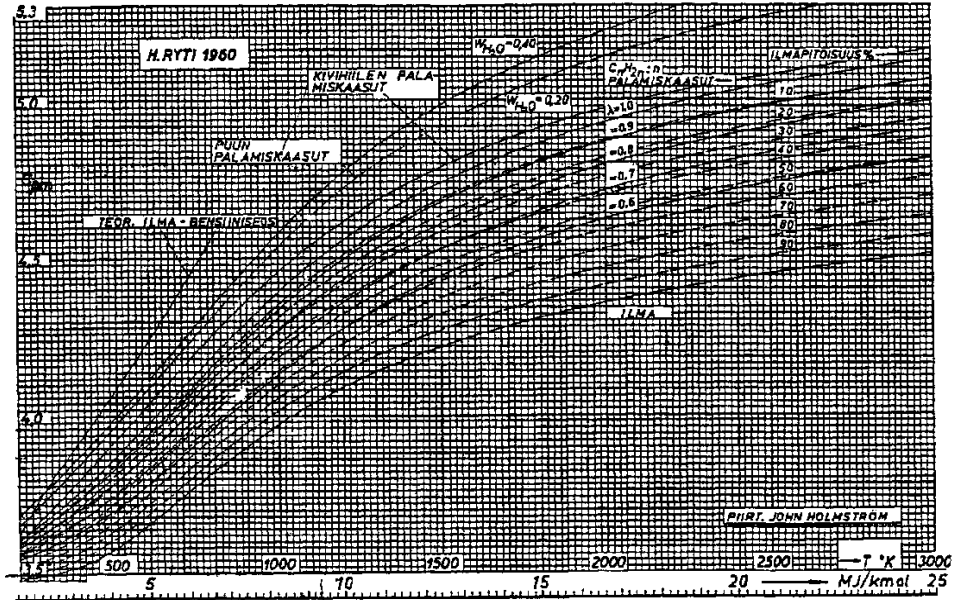
## Hillivetyjä

Nimi	Kaava	Tila	$\Delta H_{mf}^{\circ}$ Mcal/kmol	$\Delta H_{mf}^{\circ}$ MJ/kmol
Hiilidioksidi	CO <sub>2</sub>	g	-94,0517	-393,512
Hiilimonoksidi	CO	g	-26,4157	-110,523
» , palaminen		g	-67,6360	-282,989
Vesi	H <sub>2</sub> O	l	-68,3128	-285,821 <sup>2)</sup>
Veden höyrystyminen		g	-57,7937	-241,809
ideaalikaasuksi		l → g	10,5191	44,012
Metaani	CH <sub>4</sub>	g	-17,880	-74,808
Etaani	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	g	-20,222	-84,610
Propani	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	g	-24,802	-103,771
n-Butaani	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	g	-30,13	-126,05
i-Butaani	→	g	-32,12	-134,39
n-Pentaani	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	g	-34,97	-146,33
→	→	l	-41,34	-172,95
i-Pentaani	→	g	-36,90	-154,38
→	→	l	-42,82	-179,17
Tetrametyylimetaani	→	g	-39,65	-165,88
→ (=neopentaani)	→	l	-44,95	-188,08
n-Heksaani	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	g	-39,93	-167,06
→	→	l	-47,49	-198,69
2-Metyylipentaani	→	g	-41,63	-174,17
→	→	l	-48,79	-204,13
3-Metyylipentaani	→	g	-40,99	-171,49
→	→	l	-48,25	-201,87
2,2-Dimetyylibutaani	→	g	-44,32	-185,43
→	→	l	-50,97	-213,25
2,3-Dimetyylibutaani	→	g	-42,46	-177,64
→	→	l	-49,45	-206,89
n-Heptaani	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	g	-44,86	-187,67
→	→	l	-53,60	-224,24
2-Metyyliheksaani	→	g	-46,56	-194,82
→	→	l	-54,89	-229,68
3-Metyyliheksaani	→	g	-45,92	-192,14
→	→	l	-54,31	-227,25
3-Etyylipentaani	→	g	-45,30	-189,55
→	→	l	-53,73	-224,82
2,2-Dimetyylipentaani	→	g	-49,25	-206,08
→	→	l	-57,01	-238,55
2,3-Dimetyylipentaani	→	g	-47,58	-199,09
→	→	l	-55,77	-233,36
2,4-Dimetyylipentaani	→	g	-48,26	-201,94
→	→	l	-56,13	-234,87
3,3-Dimetyylipentaani	→	g	-48,13	-201,39
→	→	l	-56,03	-234,86

**Liite 13**

Eräiden kaasujen sekä grafiitin taulukkoentalpiat, entropiat <sup>1)</sup> ja ominaislämpöt. (TKK2, s. 592.)

Eräinen kaasuseosten ominaislämpö lämpötilan funktiona, TKK2, s.591 (likimääräislaskuihin)



Taulukko 28 [16]  $T_B = 2.5 \text{ MJ/kmol}$

$N_2$	$O_2$			
	$T$	$C_{pm}$	$H_m - H_{m0}$	$S_{m1}$
	MJ/kmol	MJ/kmol	MJ/kmol	MJ/kmol
0.100	3.5015	8.4019	11.731	13.342
0.200	3.5004	8.0519	14.281	15.902
0.300	3.5003	7.7018	15.665	17.281
0.400	3.5003	7.3518	16.661	18.295
0.500	3.5003	7.0018	17.438	19.067
0.600	3.5003	6.6518	18.076	19.704
0.700	3.5004	6.3017	18.616	20.246
0.800	3.5004	5.9517	19.083	20.713
0.900	3.5005	5.6016	19.485	21.126
1.00	3.5005	5.2515	19.864	21.494
1.10	3.5005	4.9016	20.197	21.828
1.20	3.5006	4.5514	20.502	22.133
1.30	3.5007	4.2014	20.782	22.413
1.40	3.5007	3.8514	21.042	22.672
1.50	3.5007	3.5012	21.283	22.914
1.60	3.5008	3.1513	21.509	23.140
1.70	3.5008	2.8011	21.721	23.353
1.80	3.5010	2.4510	21.921	23.553
1.90	3.5010	2.1009	22.111	23.742
2.00	3.5012	1.7507	22.290	23.922
2.10	3.5013	1.4008	22.461	24.094
2.20	3.5016	1.0506	22.624	24.257
2.30	3.5019	0.7003	22.780	24.414
2.40	3.5024	0.3501	22.929	24.564
2.50	3.5030	0	23.072	24.708
2.60	3.5038	0.3504	23.209	24.847
2.70	3.5048	0.7009	23.341	24.980
2.80	3.5061	1.0514	23.469	25.110
2.90	3.5076	1.4021	23.592	25.235
3.00	3.5095	1.7531	23.711	25.355
3.10	3.5116	2.1041	23.826	25.474
3.20	3.5142	2.4552	23.937	25.588
3.30	3.5171	2.8069	24.046	25.697
3.40	3.5203	3.1588	24.151	25.801
3.50	3.5240	3.5109	24.253	25.913
3.60	3.5280	3.8636	24.352	26.016
3.70	3.5325	4.2165	24.449	26.116
3.80	3.5373	4.5701	24.543	26.214
3.90	3.5426	4.9239	24.635	26.310
4.00	3.5481	5.2785	24.725	26.404
4.10	3.5542	5.6337	24.812	26.496
4.20	3.5606	5.9894	24.898	26.586
4.30	3.5672	6.3458	24.982	26.674
4.40	3.5742	6.7029	25.064	26.761
4.50	3.5816	7.0607	25.145	26.846
4.60	3.5892	7.4192	25.223	26.929
4.70	3.5971	7.7785	25.301	27.011

<sup>1)</sup>  $S_{m1}$  on molaarinen entropia fugasiiteissa (ideaalikaasun paineessa) 1 bar.

Huom.  $h_i = \frac{H_{m,i}}{M}$       $[h_i] = \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Taulukko 28 [16] (jatkoa)

N <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>	
T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>	T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>
MJ/kmol		MJ/kmol		MJ/kmol		MJ/kmol	
19,5	4,3845	68,576	31,008	19,5	4,3845	68,576	31,008
20,0	4,3927	70,770	31,119	20,0	4,3927	70,770	31,119
20,5	4,4005	72,969	31,228	20,5	4,4005	72,969	31,228
21,0	4,4078	75,171	31,334	21,0	4,4078	75,171	31,334
21,5	4,4147	77,376	31,438	21,5	4,4147	77,376	31,438
22,0	4,4214	79,585	31,540	22,0	4,4214	79,585	31,540
22,5	4,4276	81,798	31,639	22,5	4,4276	81,798	31,639
23,0	4,4336	84,013	31,736	23,0	4,4336	84,013	31,736
23,5	4,4394	86,231	31,832	23,5	4,4394	86,231	31,832
24,0	4,4448	88,452	31,925	24,0	4,4448	88,452	31,925
24,5	4,4500	90,676	32,017	24,5	4,4500	90,676	32,017
25,0	4,4551	92,902	32,107	25,0	4,4551	92,902	32,107
25,5	4,4598	95,131	32,195	25,5	4,4598	95,131	32,195
26,0	4,4645	97,362	32,282	26,0	4,4645	97,362	32,282
26,5	4,4690	99,596	32,367	26,5	4,4690	99,596	32,367
27,0	4,4733	101,83	32,450	27,0	4,4733	101,83	32,450
27,5	4,4775	104,07	32,533	27,5	4,4775	104,07	32,533
28,0	4,4816	106,31	32,613	28,0	4,4816	106,31	32,613
28,5	4,4854	108,55	32,693	28,5	4,4854	108,55	32,693
29,0	4,4892	110,79	32,771	29,0	4,4892	110,79	32,771
29,5	4,4929	113,04	32,848	29,5	4,4929	113,04	32,848
30,0	4,4965	115,29	32,923	30,0	4,4965	115,29	32,923
30,5	4,4998	117,54	32,997	30,5	4,4998	117,54	32,997
31,0	4,5032	119,79	33,071	31,0	4,5032	119,79	33,071
31,5	4,5065	122,04	33,143	31,5	4,5065	122,04	33,143
32,0	4,5096	124,29	33,214	32,0	4,5096	124,29	33,214
32,5	4,5128	126,55	33,284	32,5	4,5128	126,55	33,284
33,0	4,5158	128,81	33,353	33,0	4,5158	128,81	33,353
33,5	4,5187	131,06	33,421	33,5	4,5187	131,06	33,421
34,0	4,5216	133,32	33,487	34,0	4,5216	133,32	33,487
34,5	4,5245	135,59	33,553	34,5	4,5245	135,59	33,553
35,0	4,5272	137,85	33,619	35,0	4,5272	137,85	33,619
35,5	4,5299	140,11	33,683	35,5	4,5299	140,11	33,683
36,0	4,5325	142,38	33,746	36,0	4,5325	142,38	33,746
36,5	4,5352	144,65	33,809	36,5	4,5352	144,65	33,809
37,0	4,5377	146,91	33,871	37,0	4,5377	146,91	33,871
37,5	4,5402	149,18	33,931	37,5	4,5402	149,18	33,931
38,0	4,5428	151,45	33,992	38,0	4,5428	151,45	33,992
38,5	4,5452	153,73	34,051	38,5	4,5452	153,73	34,051
39,0	4,5476	156,00	34,110	39,0	4,5476	156,00	34,110
39,5	4,5500	158,27	34,168	39,5	4,5500	158,27	34,168
40,0	4,5524	160,55	34,225	40,0	4,5524	160,55	34,225
40,5	4,5548	162,83	34,281	40,5	4,5548	162,83	34,281
41,0	4,5571	165,10	34,337	41,0	4,5571	165,10	34,337
41,5	4,5595	167,38	34,393	41,5	4,5595	167,38	34,393

Taulukko 28 [16] (jatkoa)

N <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>	
T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>	T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>
MJ/kmol		MJ/kmol		MJ/kmol		MJ/kmol	
4,80	3,6053	8,1386	25,376	4,80	3,6053	8,1386	25,376
4,90	3,6137	8,4996	25,451	4,90	3,6137	8,4996	25,451
5,00	3,6224	8,8613	25,524	5,00	3,6224	8,8613	25,524
5,10	3,6312	9,2240	25,596	5,10	3,6312	9,2240	25,596
5,20	3,6403	9,5876	25,666	5,20	3,6403	9,5876	25,666
5,30	3,6494	9,9521	25,736	5,30	3,6494	9,9521	25,736
5,40	3,6587	10,317	25,804	5,40	3,6587	10,317	25,804
5,50	3,6682	10,684	25,871	5,50	3,6682	10,684	25,871
5,60	3,6777	11,051	25,938	5,60	3,6777	11,051	25,938
5,70	3,6874	11,419	26,003	5,70	3,6874	11,419	26,003
5,80	3,6970	11,789	26,067	5,80	3,6970	11,789	26,067
5,90	3,7068	12,159	26,130	5,90	3,7068	12,159	26,130
6,00	3,7165	12,530	26,193	6,00	3,7165	12,530	26,193
6,10	3,7264	12,902	26,254	6,10	3,7264	12,902	26,254
6,20	3,7363	13,275	26,315	6,20	3,7363	13,275	26,315
6,30	3,7461	13,649	26,375	6,30	3,7461	13,649	26,375
6,40	3,7560	14,024	26,434	6,40	3,7560	14,024	26,434
6,50	3,7658	14,400	26,492	6,50	3,7658	14,400	26,492
6,60	3,7756	14,778	26,550	6,60	3,7756	14,778	26,550
6,70	3,7853	15,156	26,606	6,70	3,7853	15,156	26,606
6,80	3,7950	15,536	26,663	6,80	3,7950	15,536	26,663
6,90	3,8047	15,917	26,718	6,90	3,8047	15,917	26,718
7,00	3,8143	16,297	26,773	7,00	3,8143	16,297	26,773
7,50	3,8612	18,311	27,038	7,50	3,8612	18,311	27,038
8,00	3,9058	20,157	27,288	8,00	3,9058	20,157	27,288
8,50	3,9479	22,120	27,526	8,50	3,9479	22,120	27,526
9,00	3,9873	24,104	27,753	9,00	3,9873	24,104	27,753
9,50	4,0238	26,107	27,970	9,50	4,0238	26,107	27,970
10,0	4,0577	28,127	28,177	10,0	4,0577	28,127	28,177
10,5	4,0890	30,164	28,376	10,5	4,0890	30,164	28,376
11,0	4,1180	32,216	28,567	11,0	4,1180	32,216	28,567
11,5	4,1447	34,281	28,750	11,5	4,1447	34,281	28,750
12,0	4,1694	36,360	28,927	12,0	4,1694	36,360	28,927
12,5	4,1922	38,451	29,098	12,5	4,1922	38,451	29,098
13,0	4,2132	40,552	29,263	13,0	4,2132	40,552	29,263
13,5	4,2327	42,664	29,422	13,5	4,2327	42,664	29,422
14,0	4,2508	44,785	29,576	14,0	4,2508	44,785	29,576
14,5	4,2676	46,914	29,726	14,5	4,2676	46,914	29,726
15,0	4,2831	49,052	29,871	15,0	4,2831	49,052	29,871
15,5	4,2976	51,197	30,011	15,5	4,2976	51,197	30,011
16,0	4,3111	53,349	30,148	16,0	4,3111	53,349	30,148
16,5	4,3237	55,508	30,281	16,5	4,3237	55,508	30,281
17,0	4,3355	57,673	30,410	17,0	4,3355	57,673	30,410
17,5	4,3466	59,844	30,536	17,5	4,3466	59,844	30,536
18,0	4,3569	62,019	30,659	18,0	4,3569	62,019	30,659
18,5	4,3667	64,200	30,778	18,5	4,3667	64,200	30,778
19,0	4,3758	66,386	30,895	19,0	4,3758	66,386	30,895

Taulukko 28 [16] (jatkoa)

CO		CO <sub>2</sub>				
T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> ← H <sub>mB</sub>	S <sub>m1</sub>	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> ← H <sub>mB</sub>	S <sub>m1</sub>
MJ/kmol		MJ/kmol		MJ/kmol		
5,20	3,6828	9,6435	26,411	5,7647	14,025	29,498
5,30	3,6937	10,012	26,481	5,7982	14,603	29,608
5,40	3,7045	10,382	26,550	5,8310	15,184	29,717
5,50	3,7153	10,753	26,619	5,8631	15,769	29,824
5,60	3,7251	11,125	26,685	5,8944	16,357	29,930
5,70	3,7360	11,499	26,751	5,9251	16,948	30,034
5,80	3,7468	11,873	26,816	5,9552	17,542	30,138
5,90	3,7577	12,248	26,880	5,9846	18,139	30,240
6,00	3,7685	12,624	26,944	6,0133	18,739	30,341
6,10	3,7793	13,002	27,006	6,0414	19,342	30,440
6,20	3,7901	13,380	27,067	6,0689	19,947	30,539
6,30	3,8003	13,759	27,129	6,0959	20,555	30,636
6,40	3,8108	14,140	27,188	6,1223	21,166	30,732
6,50	3,8215	14,523	27,248	6,1480	21,780	30,827
6,60	3,8313	14,905	27,306	6,1732	22,396	30,921
6,70	3,8421	15,288	27,364	6,1979	23,014	31,014
6,80	3,8524	15,672	27,422	6,2222	23,635	31,106
6,90	3,8623	16,058	27,478	6,2458	24,259	31,197
7,00	3,8623	16,445	27,533	6,2690	24,885	31,287
7,10	3,8718			6,2917	25,513	31,376
7,20				6,3139	26,143	31,465
7,30				6,3356	26,776	31,552
7,40				6,3570	27,410	31,638
7,50	3,9196	18,394	27,801	6,3777	28,047	31,724
7,60				6,3982	28,686	31,808
7,70				6,4181	29,326	31,892
7,80				6,4376	29,969	31,975
7,90				6,4568	30,614	32,057
8,00	3,9648	20,364	28,056	6,4755	31,261	32,138
8,10				6,4938	31,909	32,219
8,20				6,5118	32,559	32,299
8,30				6,5293	33,211	32,378
8,40	4,0060	22,358	28,297	6,5465	33,865	32,456
8,50				6,5634	34,521	32,534
8,60				6,5799	35,177	32,610
8,70				6,5962	35,836	32,686
8,80				6,6120	36,496	32,762
8,90				6,6275	37,158	32,837
9,00	4,0438	24,369	28,527	6,6426	37,821	32,911
9,50	4,0788	26,400	28,747	6,7145	41,160	33,272
10,0	4,1114	28,448	28,957	6,7783	44,535	33,618
10,5	4,1411	30,512	29,159	6,8382	47,940	33,951
11,0	4,1679	32,589	29,351	6,8915	51,372	34,270
11,5	4,1924	34,680	29,538	6,9391	54,829	34,578
12,0	4,2155	36,781	29,717	6,9833	58,310	34,874
12,5	4,2372	38,895	29,889	7,0232	61,812	35,160
13,0	4,2562	41,016	30,055	7,0605	65,333	35,436

Taulukko 28 [16] (jatkoa)

CO		CO <sub>2</sub>				
T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> ← H <sub>mB</sub>	S <sub>m1</sub>	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> ← H <sub>mB</sub>	S <sub>m1</sub>
MJ/kmol		MJ/kmol		MJ/kmol		
0,500	3,5000	-7,0026	18,168	3,5002	-7,7108	19,748
0,600	3,5000	-6,6526	18,807	3,5008	-7,3609	20,387
0,700	3,5000	-6,3026	19,347	3,5032	-7,0106	20,927
0,800	3,5000	-5,9526	19,814	3,5096	-6,6600	21,395
0,900	3,5008	-5,6024	20,226	3,5224	-6,3086	21,808
1,00	3,5010	-5,2524	20,594	3,5438	-5,9552	22,180
1,10	3,5010	-4,9023	20,929	3,5747	-5,5995	22,519
1,20	3,5010	-4,5523	21,233	3,6151	-5,2400	22,832
1,30	3,5010	-4,2022	21,513	3,6640	-4,8760	23,123
1,40	3,5010	-3,8521	21,773	3,7202	-4,5069	23,397
1,50	3,5010	-3,5021	22,014	3,7822	-4,1319	23,656
1,60	3,5010	-3,1519	22,240	3,8484	-3,7503	23,902
1,70	3,5010	-2,8018	22,452	3,9176	-3,3621	24,137
1,80	3,5010	-2,4518	22,652	3,9897	-2,9669	24,363
1,90	3,5020	-2,1016	22,842	4,0606	-2,5643	24,581
2,00	3,5020	-1,7514	23,021	4,1329	-2,1546	24,791
2,10	3,5020	-1,4012	23,192	4,2045	-1,7377	24,994
2,20	3,5023	-1,0510	23,355	4,2754	-1,3138	25,191
2,30	3,5031	-0,7008	23,510	4,3450	-0,8827	25,383
2,40	3,5038	-0,3504	23,660	4,4133	-0,4448	25,569
2,50	3,5051	0	23,803	4,4801	0	25,751
2,60	3,5064	0,3505	23,941	4,5453	0,4512	25,928
2,70	3,5086	0,7012	24,073	4,6089	0,9088	26,101
2,80	3,5102	1,0521	24,201	4,6707	1,3729	26,269
2,90	3,5128	1,4034	24,323	4,7311	1,8429	26,434
3,00	3,5162	1,7549	24,442	4,7899	2,3191	26,596
3,10	3,5199	2,1065	24,558	4,8469	2,8008	26,754
3,20	3,5235	2,4588	24,670	4,9025	3,2883	26,908
3,30	3,5277	2,8113	24,778	4,9567	3,7813	27,060
3,40	3,5326	3,1644	24,884	5,0094	4,2795	27,209
3,50	3,5374	3,5179	24,986	5,0606	4,7832	27,355
3,60	3,5435	3,8719	25,086	5,1106	5,2919	27,498
3,70	3,5495	4,2265	25,183	5,1594	5,8053	27,639
3,80	3,5561	4,5818	25,278	5,2068	6,3235	27,777
3,90	3,5634	4,9378	25,370	5,2531	6,8466	27,913
4,00	3,5707	5,2946	25,460	5,2983	7,3741	28,046
4,10	3,5790	5,6520	25,548	5,3424	7,9062	28,178
4,20	3,5865	6,0103	25,635	5,3854	8,4426	28,307
4,30	3,5950	6,3694	25,720	5,4274	8,9834	28,434
4,40	3,6043	6,7295	25,803	5,4684	9,5280	28,559
4,50	3,6129	7,0903	25,883	5,5085	10,077	28,683
4,60	3,6226	7,4520	25,963	5,5476	10,630	28,804
4,70	3,6322	7,8148	26,041	5,5858	11,186	28,924
4,80	3,6419	8,1786	26,117	5,6233	11,747	29,042
4,90	3,6524	8,5432	26,193	5,6598	12,311	29,158
5,00	3,6622	8,9090	26,267	5,6955	12,879	29,273
5,10	3,6728	9,2758	26,340	5,7305	13,450	29,386



Taulukko 28 [16] (jatkoa)

CO		CO <sub>2</sub>				
T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>
MJ/kmol		MJ/kmol			MJ/kmol	
37,0	4,5570	147,97	34,690	7,6519	244,08	43,176
37,5	4,5594	150,25	34,752	7,6580	247,91	43,279
38,0	4,5618	152,53	34,812	7,6634	251,74	43,381
38,5	4,5642	154,81	34,872	7,6690	255,57	43,481
39,0	4,5666	157,09	34,931	7,6750	259,41	43,580
39,5	4,5690	159,38	34,989	7,6807	263,25	43,678
40,0	4,5714	161,66	35,047	7,6860	267,09	43,774
40,5	4,5738	163,95	35,103	7,6914	270,93	43,869
41,0	4,5763	166,24	35,159	7,6966	274,78	43,964
41,5	4,5787	168,52	35,214	7,7014	278,63	44,057

H <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> O				
T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>
MJ/kmol		MJ/kmol			MJ/kmol	
0,100	2,5000	-7,2277	6,8903	4,0063	-8,0258	16,291
0,200	2,5000	-6,9777	8,7109	4,0058	-7,6251	17,022
0,300	2,5005	-6,7277	9,6996	4,0057	-7,2246	17,640
0,400	2,5040	-6,4775	10,411	4,0058	-6,8240	18,174
0,500	2,5193	-6,2266	10,968	4,0060	-6,4234	18,646
0,600	2,5552	-5,9730	11,430	4,0062	-6,0229	19,067
0,700	2,6133	-5,7148	11,829	4,0070	-5,6222	19,449
0,800	2,6880	-5,4499	12,182	4,0075	-5,2215	19,798
0,900	2,7722	-5,1769	12,503	4,0079	-4,8208	20,119
1,00	2,8589	-4,8953	12,800	4,0086	-4,4200	20,416
1,10	2,9425	-4,6054	13,076	4,0095	-4,0192	20,692
1,20	3,0197	-4,3071	13,336	4,0107	-3,6182	20,951
1,30	3,0885	-4,0016	13,580	4,0122	-3,2172	21,194
1,40	3,1503	-3,6896	13,811	4,0138	-2,8161	21,423
1,50	3,2058	-3,3717	14,031	4,0142	-2,4148	21,640
1,60	3,2532	-3,0487	14,240	4,0167	-2,0133	21,846
1,70	3,2948	-2,7212	14,438	4,0198	-1,6114	22,042
1,80	3,3306	-2,3900	14,627	4,0237	-1,2093	22,229
1,90	3,3623	-2,0552	14,807			
2,00	3,3881	-1,7176	14,981			
2,10	3,4117	-1,3776	15,147			
2,20	3,4308	-1,0355	15,305			

Taulukko 28 [16] (jatkoa)

CO		CO <sub>2</sub>				
T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>
MJ/kmol		MJ/kmol			MJ/kmol	
13,5	4,2738	43,149	30,216	7,0951	68,873	35,702
14,0	4,2899	45,290	30,372	7,1262	72,429	35,961
14,5	4,3054	47,439	30,523	7,1550	76,000	36,212
15,0	4,3199	49,596	30,669	7,1818	79,583	36,455
15,5	4,3330	51,760	30,811	7,2074	83,180	36,691
16,0	4,3449	53,928	30,949	7,2313	86,790	36,920
16,5	4,3563	56,105	31,082	7,2528	90,413	37,143
17,0	4,3670	58,287	31,213	7,2731	94,043	37,360
17,5	4,3768	60,475	31,339	7,2925	97,684	37,571
18,0	4,3862	62,666	31,463	7,3103	101,34	37,777
18,5	4,3945	64,861	31,583	7,3270	105,00	37,977
19,0	4,4029	67,060	31,701	7,3431	108,66	38,173
19,5	4,4113	69,264	31,815	7,3583	112,34	38,364
20,0	4,4187	71,473	31,927	7,3723	116,02	38,550
20,5	4,4257	73,684	32,036	7,3857	119,71	38,733
21,0	4,4320	75,898	32,143	7,3985	123,41	38,911
21,5	4,4387	78,117	32,247	7,4111	127,11	39,085
22,0	4,4446	80,339	32,349	7,4230	130,82	39,255
22,5	4,4505	82,563	32,449	7,4341	134,53	39,422
23,0	4,4555	84,790	32,547	7,4450	138,25	39,586
23,5	4,4616	87,020	32,643	7,4556	141,97	39,746
24,0	4,4670	89,252	32,737	7,4658	145,71	39,904
24,5	4,4717	91,486	32,829	7,4756	149,44	40,057
25,0	4,4765	93,723	32,919	7,4851	153,18	40,208
25,5	4,4814	95,963	33,008	7,4942	156,93	40,356
26,0	4,4858	98,204	33,095	7,5029	160,68	40,502
26,5	4,4899	100,45	33,181	7,5113	164,43	40,645
27,0	4,4939	102,69	33,265	7,5193	168,19	40,786
27,5	4,4975	104,94	33,347	7,5270	171,95	40,924
28,0	4,5013	107,19	33,428	7,5348	175,71	41,060
28,5	4,5058	109,44	33,508	7,5424	179,48	41,193
29,0	4,5093	111,70	33,587	7,5496	183,26	41,324
29,5	4,5119	113,95	33,664	7,5568	187,03	41,453
30,0	4,5155	116,21	33,739	7,5640	190,81	41,580
30,5	4,5191	118,47	33,814	7,5712	194,60	41,705
31,0	4,5223	120,73	33,887	7,5782	198,38	41,828
31,5	4,5252	122,99	33,960	7,5848	202,18	41,949
32,0	4,5289	125,25	34,031	7,5914	205,97	42,069
32,5	4,5315	127,52	34,101	7,5980	209,77	42,187
33,0	4,5349	129,79	34,170	7,6046	213,57	42,303
33,5	4,5376	132,05	34,238	7,6110	217,37	42,418
34,0	4,5407	134,32	34,306	7,6170	221,18	42,530
34,5	4,5430	136,59	34,373	7,6229	224,99	42,642
35,0	4,5465	138,87	34,438	7,6290	228,80	42,752
35,5	4,5488	141,14	34,502	7,6350	232,62	42,860
36,0	4,5512	143,41	34,566	7,6408	236,44	42,966
36,5	4,5536	145,69	34,629	7,6461	240,26	43,072

Taulukko 28 [16] (jatkoa)

H <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> O				
T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>
MJ/kmol		MJ/kmol			MJ/kmol	
2,30	3,4462	0,6917	15,459	4,0283	0,8067	22,408
2,40	3,4596	0,3465	15,606	4,0336	0,4037	22,580
2,50	3,4695	0	15,747	4,0398	0	22,745
2,60	3,4788	0,3474	15,884	4,0468	0,4043	22,903
2,70	3,4858	0,6958	16,015	4,0546	0,8094	23,056
2,80	3,4925	1,0447	16,142	4,0631	1,2152	23,204
2,90	3,4976	1,3942	16,265	4,0723	1,6220	23,347
3,00	3,5012	1,7441	16,383	4,0823	2,0298	23,485
3,10	3,5049	2,0944	16,498	4,0930	2,4384	23,619
3,20	3,5081	2,4449	16,610	4,1042	2,8485	23,749
3,30	3,5098	2,7958	16,718	4,1161	3,2593	23,875
3,40	3,5117	3,1469	16,823	4,1284	3,6716	23,999
3,50	3,5131	3,4981	16,924	4,1412	4,0851	24,119
3,60	3,5143	3,8494	17,023	4,1544	4,4999	24,236
3,70	3,5155	4,2008	17,119	4,1681	4,9160	24,349
3,80	3,5161	4,5524	17,213	4,1821	5,3336	24,461
3,90	3,5169	4,9039	17,304	4,1963	5,7526	24,570
4,00	3,5181	5,2557	17,393	4,2109	6,1730	24,676
4,10	3,5191	5,6076	17,481			
4,20	3,5194	5,9594	17,565			
4,30	3,5207	6,3114	17,649			
4,40	3,5219	6,6635	17,729			
4,50	3,5221	7,0156	17,808			
4,60	3,5233	7,3680	17,886	4,2873	8,2972	25,176
4,70	3,5245	7,7204	17,961			
4,80	3,5251	8,0728	18,035			
4,90	3,5259	8,4253	18,108			
5,00	3,5271	8,7780	18,179			
5,10	3,5283	9,1307	18,250			
5,20	3,5300	9,4836	18,318	4,3678	10,461	25,632
5,30	3,5318	9,8366	18,385			
5,40	3,5329	10,190	18,451			
5,50	3,5352	10,543	18,515			
5,60	3,5366	10,907	18,580	4,4512	12,666	26,052
5,70	3,5387	11,251	18,642			
5,80	3,5404	11,605	18,704			
5,90	3,5429	11,959	18,764			
6,00	3,5453	12,313	18,823			
6,10	3,5477	12,668	18,882	4,5371	14,912	26,443
6,20	3,5501	13,023	18,940			
6,30	3,5525	13,378	18,996			
6,40	3,5559	13,733	19,053			
6,50	3,5585	14,089	19,108			
6,60	3,5619	14,445	19,162			
6,70	3,5643	14,800	19,216			
6,80	3,5674	15,157	19,269			
6,90	3,5710	15,514	19,321	4,6254	17,203	26,810

Taulukko 28 [16] (jatkoa)

H <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> O				
T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>
MJ/kmol		MJ/kmol			MJ/kmol	
7,00	3,5750	15,872	19,372	4,7155	19,538	27,156
7,50	3,5947	17,664	19,619	4,8069	21,919	27,484
8,00	3,6178	19,468	19,852	4,8991	24,345	27,797
8,50	3,6423	21,281	20,072	4,9909	26,818	28,097
9,00	3,6692	23,111	20,281	5,0820	29,362	28,385
9,50	3,6985	24,952	20,480	5,1717	31,900	28,662
10,0	3,7284	26,809	20,671	5,2595	34,507	28,930
10,5	3,7599	28,679	20,853	5,3447	37,158	29,199
11,0	3,7921	30,569	21,029	5,4272	39,851	29,439
11,5	3,8238	32,472	21,199	5,5068	42,585	29,682
12,0	3,8556	34,392	21,361	5,5833	45,358	29,918
12,5	3,8868	36,328	21,520	5,6567	48,168	30,147
13,0	3,9179	38,280	21,673	5,7269	51,014	30,371
13,5	3,9475	40,246	21,821	5,7938	53,894	30,588
14,0	3,9768	42,228	21,965	5,8577	56,807	30,800
14,5	4,0062	44,222	22,105	5,9185	59,751	31,007
15,0	4,0350	46,232	22,241	5,9764	62,726	31,208
15,5	4,0637	48,258	22,374	6,0314	65,727	31,405
16,0	4,0909	50,295	22,503	6,0837	68,756	31,597
16,5	4,1172	52,348	22,630	6,1336	71,811	31,785
17,0	4,1428	54,413	22,753	6,1810	74,889	31,969
17,5	4,1669	56,490	22,874	6,2259	77,991	32,149
18,0	4,1908	58,581	22,991	6,2688	81,115	32,325
18,5	4,2135	60,681	23,107	6,3096	84,260	32,497
19,0	4,2358	62,794	23,219	6,3484	87,424	32,666
19,5	4,2565	64,916	23,330	6,3853	90,608	32,831
20,0	4,2779	67,050	23,438	6,4206	93,809	32,994
20,5	4,2983	69,196	23,543	6,4542	97,028	33,153
21,0	4,3184	71,349	23,648	6,4863	100,26	33,308
21,5	4,3375	73,513	23,750	6,5169	103,51	33,461
22,0	4,3567	75,687	23,850	6,5461	106,78	33,612
22,5	4,3748	77,869	23,947	6,5740	110,06	33,759
23,0	4,3918	80,061	24,044	6,6008	113,35	33,904
23,5	4,4095	82,261	24,139	6,6264	116,66	34,046
24,0	4,4262	84,471	24,232	6,6510	119,98	34,186
24,5	4,4440	86,688	24,323	6,6745	123,31	34,323
25,0	4,4599	88,914	24,412	6,6970	126,65	34,458
25,5	4,4768	91,148	24,501	6,7187	130,01	34,591
26,0	4,4932	93,392	24,588	6,7396	133,37	34,722
26,5	4,5093	95,642	24,674	6,7595	136,75	34,850
27,0	4,5263	97,901	24,759	6,7788	140,13	34,977
27,5	4,5420	100,17	24,842	6,7973	143,53	35,102
28,0	4,5576	102,44	24,924	6,8151	146,93	35,224
28,5	4,5728	104,72	25,004	6,8323	150,34	35,345
29,0	4,5878	107,02	25,084	6,8489	153,76	35,464
29,5	4,6026	109,31	25,163	6,8649	157,19	35,581
30,0	4,6159	111,61	25,240	6,8803	160,63	35,696

Taulukko 28 [16] (jatkoa)

**H<sub>2</sub>O**

T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>
MJ/kmol		MJ/kmol			MJ/kmol	
30,5	4,6302	113,93	25,316	6,8953	164,07	35,810
31,0	4,6433	116,24	25,392	6,9098	167,52	35,923
31,5	4,6558	118,57	25,466	6,9237	170,98	36,033
32,0	4,6687	120,91	25,540	6,9373	174,44	36,142
32,5	4,6819	123,24	25,613	6,9504	177,92	36,250
33,0	4,6941	125,59	25,684	6,9631	181,39	36,356
33,5	4,7074	127,93	25,755	6,9753	184,88	36,461
34,0	4,7207	130,29	25,825	6,9873	188,37	36,565
34,5	4,7329	132,66	25,894	6,9989	191,87	36,667
35,0	4,7461	135,02	25,961	7,0101	195,37	36,767
35,5	4,7593	137,40	26,029	7,0210	198,88	36,867
36,0	4,7721	139,79	26,096	7,0316	202,39	36,965
36,5	4,7840	142,18	26,162	7,0419	205,91	37,062
37,0	4,7970	144,57	26,227	7,0520	209,43	37,158
37,5	4,8091	146,97	26,291	7,0617	212,96	37,253
38,0	4,8214	149,38	26,355	7,0712	216,49	37,346
38,5	4,8342	151,79	26,418	7,0805	220,03	37,439
39,0	4,8461	154,21	26,480	7,0895	223,57	37,530
39,5	4,8582	156,63	26,542	7,0983	227,12	37,621
40,0	4,8691	159,07	26,603	7,1069	230,67	37,710
40,5	4,8812	161,51	26,664	7,1152	234,23	37,798
41,0	4,8927	163,95	26,724	7,1234	237,79	37,886
41,5	4,9042	166,40	26,783	7,1314	241,35	37,972

mol %	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> palamiskaasu N <sub>2</sub>	mol %
ilma N <sub>2</sub>		72,991
luft O <sub>2</sub>	föbränningsgas A	0,869
Luft A	Verbrennungsgase CO <sub>2</sub>	13,083
air CO <sub>2</sub>	combustion gases H <sub>2</sub> O	13,055

Taulukko 28 [16] (jatkoa)

T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>
MJ/kmol		MJ/kmol			MJ/kmol	
1,1	3,4914	-4,8912	21,072	3,5676	-5,0748	21,175
1,2	3,4915	-4,5420	21,377	3,5730	-4,7177	21,486
1,3	3,4916	-4,1929	21,656	3,5795	-4,3601	21,772
1,4	3,4917	-3,8438	21,915	3,5869	-4,0018	22,038
1,5	3,4918	-3,4945	22,156	3,5951	-3,6426	22,285
1,6	3,4920	-3,1455	22,381	3,6040	-3,2828	22,518
1,7	3,4922	-2,7961	22,593	3,6132	-2,9219	22,736
1,8	3,4927	-2,4469	22,792	3,6228	-2,5601	22,943
1,9	3,4931	-2,0976	22,981	3,6325	-2,1973	23,140
2,0	3,4938	-1,7482	23,160	3,6424	-1,8335	23,326
2,1	3,4947	-1,3989	23,331	3,6523	-1,4689	23,504
2,2	3,4958	-1,0494	23,493	3,6623	-1,1031	23,674
2,3	3,4971	-0,69962	23,649	3,6722	-0,73631	23,837
2,4	3,4987	-0,34985	23,798	3,6822	-0,36862	23,994
2,5	3,5006	0,00000	23,941	3,6922	-0,00001	24,144
2,6	3,5029	0,35021	24,078	3,7022	0,36975	24,289
2,7	3,5055	0,70064	24,210	3,7123	0,74052	24,429
2,8	3,5085	1,0513	24,338	3,7224	1,1122	24,564
2,9	3,5118	1,4023	24,461	3,7326	1,4850	24,695
3,0	3,5156	1,7538	24,580	3,7430	1,8589	24,822
3,1	3,5196	2,1056	24,695	3,7534	2,2336	24,945
3,2	3,5242	2,4576	24,807	3,7640	2,6094	25,063
3,3	3,5292	2,8104	24,916	3,7748	2,9864	25,180
3,4	3,5344	3,1636	25,021	3,7856	3,3645	25,293
3,5	3,5402	3,5172	25,124	3,7967	3,7435	25,403
3,6	3,5463	3,8716	25,223	3,8079	4,1239	25,510
3,7	3,5528	4,2265	25,321	3,8194	4,5051	25,614
3,8	3,5595	4,5822	25,415	3,8309	4,8877	25,716
3,9	3,5668	4,9383	25,508	3,8427	5,2713	25,816
4,0	3,5741	5,2954	25,599	3,8545	5,6562	25,913
4,1	3,5820	5,6533	25,686			
4,2	3,5901	6,0119	25,773			
4,3	3,5984	6,3713	25,858			
4,4	3,6070	6,7316	25,941			
4,5	3,6158	7,0928	26,022			
4,6	3,6248	7,4548	26,101			
4,7	3,6340	7,8177	26,180			
4,8	3,6434	8,1815	26,256			
4,9	3,6529	8,5464	26,331			
5,0	3,6627	8,9121	26,405			
5,1	3,6724	9,2789	26,478			
5,2	3,6824	9,6466	26,549			
5,3	3,6923	10,015	26,620			
5,4	3,7022	10,385	26,688			
5,5	3,7124	10,756	26,756			
5,6	3,7224	11,127	26,824			
5,7	3,7326	11,500	26,890			
5,8	3,7426	11,874	26,955			

T	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub>	S <sub>ml</sub>
MJ/kmol		MJ/kmol			MJ/kmol	
0,5	3,4914	-6,9860	18,320	3,5577	-7,2108	18,369
0,6	3,4913	-6,6369	18,956	3,5577	-6,8551	19,018
0,7	3,4913	-6,2877	19,495	3,5580	-6,4993	19,566
0,8	3,4913	-5,9386	19,961	3,5589	-6,1435	20,041
0,9	3,4914	-5,5894	20,372	3,5607	-5,7875	20,460
1,0	3,4914	-5,2403	20,740	3,5635	-5,4312	20,835

Taulukko 28 [13] (jatkoa)

T MJ/kmol	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub> MJ/kmol	S <sub>m1</sub>	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub> MJ/kmol	S <sub>m1</sub>	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub> MJ/kmol	S <sub>m1</sub>
26,0	4,5248	98,228	33,227	5,1420	110,01	34,411	5,1420	110,01	34,411
26,5	4,5311	100,49	33,313	5,1489	112,58	34,509	5,1489	112,58	34,509
27,0	4,5372	102,76	33,398	5,1556	115,16	34,605	5,1556	115,16	34,605
27,5	4,5431	105,03	33,482	5,1621	117,74	34,701	5,1621	117,74	34,701
28,0	4,5489	107,30	33,563	5,1685	120,32	34,793	5,1685	120,32	34,793
28,5	4,5544	109,58	33,644	5,1745	122,91	34,885	5,1745	122,91	34,885
29,0	4,5598	111,85	33,723	5,1804	125,49	34,975	5,1804	125,49	34,975
29,5	4,5651	114,14	33,801	5,1861	128,09	35,064	5,1861	128,09	35,064
30,0	4,5702	116,42	33,878	5,1917	130,68	35,150	5,1917	130,68	35,150
30,5	4,5751	118,71	33,953	5,1970	133,28	35,236	5,1970	133,28	35,236
31,0	4,5800	121,00	34,028	5,2023	135,88	35,321	5,2023	135,88	35,321
31,5	4,5847	123,29	34,101	5,2074	138,48	35,404	5,2074	138,48	35,404
32,0	4,5892	125,58	34,174	5,2123	141,08	35,486	5,2123	141,08	35,486
32,5	4,5937	127,88	34,245	5,2172	143,70	35,567	5,2172	143,70	35,567
33,0	4,5980	130,18	34,315	5,2219	146,31	35,647	5,2219	146,31	35,647
33,5	4,6022	132,47	34,384	5,2264	148,91	35,726	5,2264	148,91	35,726
34,0	4,6063	134,77	34,452	5,2309	151,53	35,803	5,2309	151,53	35,803
34,5	4,6103	137,08	34,519	5,2353	154,15	35,879	5,2353	154,15	35,879
35,0	4,6142	139,39	34,586	5,2395	156,77	35,955	5,2395	156,77	35,955
35,5	4,6179	141,69	34,651	5,2437	159,38	36,029	5,2437	159,38	36,029
36,0	4,6216	144,01	34,716	5,2478	162,01	36,102	5,2478	162,01	36,102
36,5	4,6252	146,32	34,780	5,2518	164,64	36,175	5,2518	164,64	36,175
37,0	4,6287	148,63	34,843	5,2557	167,26	36,247	5,2557	167,26	36,247
37,5	4,6321	150,94	34,904	5,2596	169,89	36,317	5,2596	169,89	36,317
38,0	4,6355	153,26	34,966	5,2634	172,52	36,387	5,2634	172,52	36,387
38,5	4,6387	155,58	35,027	5,2671	175,16	36,455	5,2671	175,16	36,455
39,0	4,6418	157,90	35,087	5,2708	177,79	36,524	5,2708	177,79	36,524
39,5	4,6449	160,22	35,146	5,2745	180,42	36,591	5,2745	180,42	36,591
40,0	4,6480	162,55	35,204	5,2780	183,06	36,657	5,2780	183,06	36,657
40,5	4,6510	164,87	35,262	5,2816	185,70	36,722	5,2816	185,70	36,722
41,0	4,6538	167,19	35,319	5,2850	188,34	36,787	5,2850	188,34	36,787
41,5	4,6567	169,52	35,376	5,2884	190,98	36,852	5,2884	190,98	36,852

Argon C<sub>pm</sub> = 2,5, H<sub>m</sub> - H<sub>mb</sub> = 2,5 (T - 2,5 MJ/kmol)

$$S_{m1} = 2,5 \ln \frac{T}{T_0} + 16,35401$$

Taulukko 28 [16] (jatkoa)

T MJ/kmol	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub> MJ/kmol	S <sub>m1</sub>	C <sub>pm</sub>	H <sub>m</sub> -H <sub>mb</sub> MJ/kmol	S <sub>m1</sub>
5,9	3,7528	12,249	27,019	4,1135	13,620	27,525
6,0	3,7628	12,625	27,082			
6,1	3,7729	13,001	27,144			
6,2	3,7830	13,379	27,206			
6,3	3,7929	13,758	27,266			
6,4	3,8029	14,137	27,326			
6,5	3,8127	14,518	27,385	4,1787	15,693	27,856
6,6	3,8225	14,901	27,444			
6,7	3,8321	15,283	27,500			
6,8	3,8418	15,665	27,558			
6,9	3,8513	16,053	27,614			
7,0	3,8608	16,438	27,669	4,2417	16,596	28,168
7,5	3,9065	18,476	27,937	4,3021	19,967	28,463
8,0	3,9494	20,344	28,190	4,3595	22,100	28,742
8,5	3,9895	22,328	28,431	4,4137	24,294	29,008
9,0	4,0269	24,332	28,660	4,4647	26,513	29,262
9,5	4,0613	26,355	28,879	4,5124	28,758	29,505
10,0	4,0932	28,397	29,088	4,5571	31,025	29,737
10,5	4,1226	30,447	29,289	4,5988	33,314	29,961
11,0	4,1500	32,515	29,481	4,6377	35,624	30,176
11,5	4,1752	34,596	29,666	4,6738	37,951	30,382
12,0	4,1987	36,690	29,844	4,7076	40,297	30,582
12,5	4,2206	38,795	30,016	4,7391	42,659	30,775
13,0	4,2409	40,910	30,182	4,7684	45,036	30,962
13,5	4,2599	43,036	30,343	4,7959	47,427	31,142
14,0	4,2778	45,170	30,497	4,8216	49,832	31,317
14,5	4,2946	47,313	30,648	4,8455	52,248	31,487
15,0	4,3103	49,465	30,794	4,8679	54,677	31,651
15,5	4,3252	51,623	30,935	4,8890	57,116	31,811
16,0	4,3394	53,789	31,073	4,9088	59,565	31,966
16,5	4,3528	55,963	31,207	4,9273	62,025	32,118
17,0	4,3655	58,142	31,337	4,9448	64,493	32,265
17,5	4,3777	60,329	31,464	4,9613	66,970	32,409
18,0	4,3893	62,520	31,588	4,9768	69,454	32,549
18,5	4,4004	64,717	31,708	4,9914	71,946	32,685
19,0	4,4109	66,920	31,825	5,0052	74,445	32,819
19,5	4,4212	69,128	31,939	5,0184	76,951	32,948
20,0	4,4310	71,341	32,051	5,0308	79,463	33,076
20,5	4,4405	73,559	32,161	5,0426	81,982	33,200
21,0	4,4496	75,782	32,268	5,0538	84,506	33,322
21,5	4,4583	78,008	32,373	5,0645	87,035	33,441
22,0	4,4668	80,240	32,476	5,0748	89,570	33,558
22,5	4,4748	82,476	32,576	5,0844	92,110	33,672
23,0	4,4827	84,715	32,674	5,0937	94,654	33,783
23,5	4,4904	86,958	32,772	5,1027	97,203	33,893
24,0	4,4977	89,205	32,866	5,1112	99,757	34,001
24,5	4,5048	91,456	32,959	5,1193	102,31	34,106
25,0	4,5117	93,710	33,050	5,1272	104,88	34,210
25,5	4,5183	95,968	33,139	5,1347	107,44	34,311

Huom. C<sub>pm</sub> = C<sub>vm</sub> + 1

## Liite 14

Aineiden molekyyllipainoja ja kaasuvakioita.

<b>Substance</b>	<b>Formula</b>	<b>Molar mass, M kg/kmol</b>	<b>Gas constant, R kJ/(kg · K)</b>
Air	—	28.97	0.2870
Ammonia	NH <sub>3</sub>	17.03	0.4882
Argon	Ar	39.948	0.2081
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.115	0.1064
Bromine	Br <sub>2</sub>	159.808	0.0520
<i>n</i> -Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.124	0.1430
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	44.01	0.1889
Carbon monoxide	CO	28.011	0.2968
Carbon tetrachloride	CCl <sub>4</sub>	153.82	0.05405
Chlorine	Cl <sub>2</sub>	70.906	0.1173
Chloroform	CHCl <sub>3</sub>	119.38	0.06964
Dichlorodifluoromethane (R-12)	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	120.91	0.06876
Dichlorofluoromethane (R-21)	CHCl <sub>2</sub> F	102.92	0.08078
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	0.2765
Ethyl alcohol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46.07	0.1805
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.054	0.2964
Helium	He	4.003	2.0769
<i>n</i> -Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.179	0.09647
Hydrogen (normal)	H <sub>2</sub>	2.016	4.1240
Krypton	Kr	83.80	0.09921
Methane	CH <sub>4</sub>	16.043	0.5182
Methyl alcohol	CH <sub>3</sub> OH	32.042	0.2595
Methyl chloride	CH <sub>3</sub> Cl	50.488	0.1647
Neon	Ne	20.183	0.4119
Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.013	0.2968
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	44.013	0.1889
Oxygen	O <sub>2</sub>	31.999	0.2598
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	0.1885
Propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.081	0.1976
Sulfur dioxide	SO <sub>2</sub>	64.063	0.1298
Tetrafluoroethane (R-134a)	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	102.03	0.08149
Trichlorofluoromethane (R-11)	CCl <sub>3</sub> F	137.37	0.06052
Water	H <sub>2</sub> O	18.015	0.4615
Xenon	Xe	131.30	0.06332

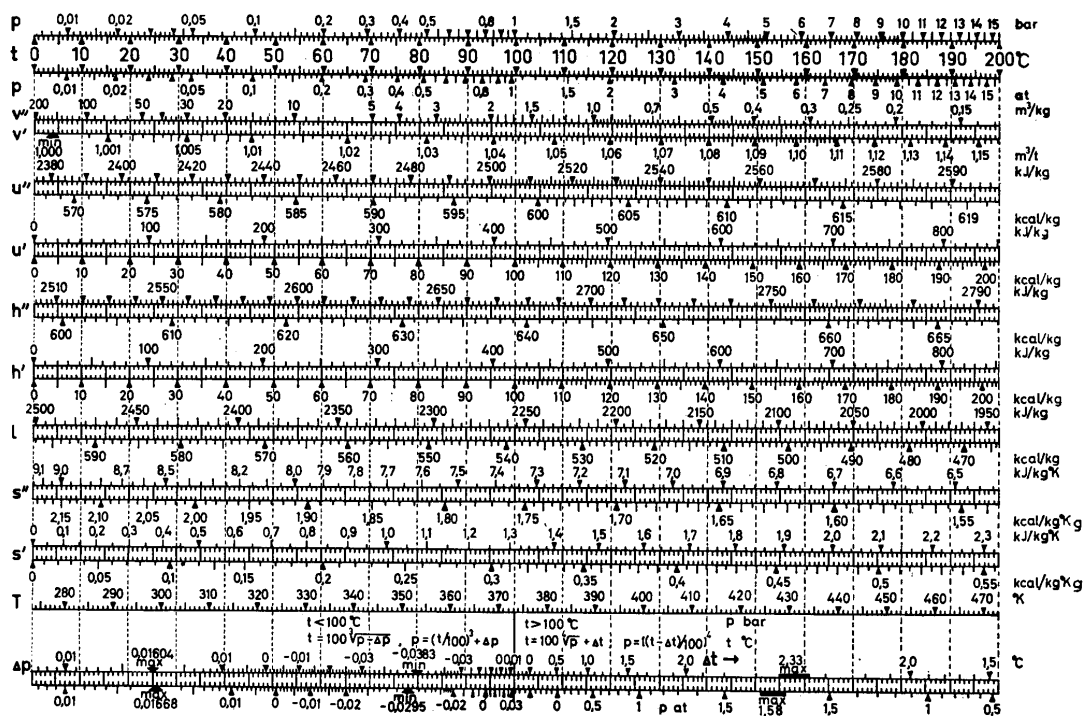
**Liite 15**

Kuivan ilman ja veden ominaisuudet.

Kuivan ilman termodynaamiset ominaisuudet normaalipaineessa $1,0133 \times 10^5$ [Pa]							
T	$\rho$	$c_p$	$\mu \times 10^7$	$\nu \times 10^6$	$\lambda \times 10^3$	$a \times 10^3$	Pr
[K]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kJ/kg K]	[Pa s]	[m <sup>2</sup> /s]	[W/m K]	[m <sup>2</sup> /s]	
100	3,5562	1,032	71,1	2,00	9,34	2,54	0,786
150	2,3364	1,012	103,4	4,426	13,8	5,84	0,758
200	1,7458	1,007	132,5	7,590	18,1	10,3	0,737
250	1,3947	1,006	159,6	11,44	22,3	15,9	0,720
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	22,5	0,707
350	0,9950	1,009	208,2	20,92	30,0	29,9	0,700
400	0,8711	1,014	230,1	26,41	33,8	38,3	0,690
450	0,7740	1,021	250,7	32,39	37,3	42,7	0,686
500	0,6964	1,030	270,1	38,79	40,7	56,7	0,684
550	0,6329	1,040	288,4	45,57	43,9	66,7	0,683
600	0,5804	1,051	305,8	52,69	46,9	76,9	0,685
650	0,5356	1,063	322,5	60,21	49,7	87,3	0,690
700	0,4975	1,075	338,8	68,10	52,4	98,0	0,695
750	0,4643	1,087	354,6	76,37	54,9	109	0,702
800	0,4354	1,099	369,8	84,93	57,3	120	0,709
850	0,4097	1,110	384,3	93,80	59,6	131	0,716
900	0,3868	1,121	398,1	102,9	62,0	143	0,720
950	0,3666	1,131	411,3	112,2	64,3	155	0,723
1000	0,3482	1,141	424,4	121,9	66,7	168	0,726
1100	0,3166	1,159	449,0	141,8	71,5	195	0,728
1200	0,2902	1,175	473,0	162,9	76,3	224	0,728
1300	0,2679	1,189	496,0	185,1	82	238	0,719
1400	0,2488	1,207	530	213	91	303	0,703
1500	0,2322	1,230	557	240	100	350	0,685
1600	0,2177	1,248	584	268	106	390	0,688
1700	0,2049	1,267	611	298	113	435	0,685
1800	0,1935	1,286	637	329	120	482	0,683
1900	0,1833	1,307	663	362	128	534	0,677
2000	0,1741	1,337	689	396	137	589	0,672
2100	0,1658	1,372	715	431	147	646	0,667
2200	0,1582	1,417	740	468	160	714	0,655
2300	0,1513	1,478	766	506	175	783	0,647
2400	0,1448	1,558	792	547	196	869	0,630
2500	0,1389	1,665	818	589	222	960	0,613

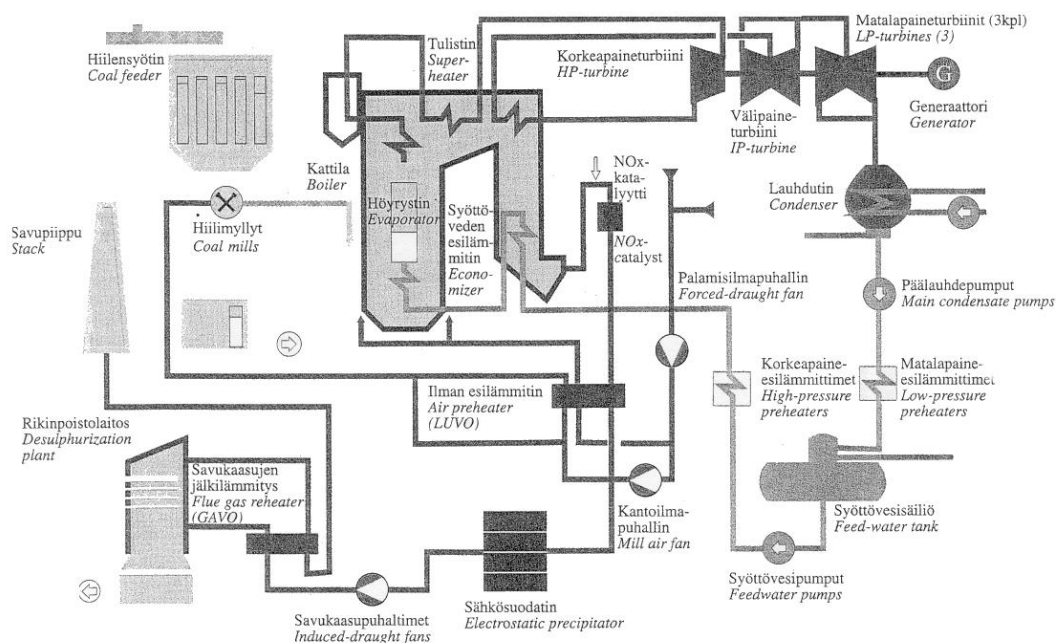
Kylläisen veden ominaisuudet.

T, °C	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$\mu$ , Pa·s	$\nu$ , m <sup>2</sup> /s	$c_p$ , kJ/(kg·K)	$k$ , W/(m·K)	Pr		
.01	999.8	17.91	-04	17.91	-07	4.217	0.562	13.44
10	999.8	13.08	-04	13.08	-07	4.193	0.582	9.42
20	998.2	10.03	-04	10.05	-07	4.182	0.600	6.99
30	995.6	79.77	-05	80.01	-08	4.179	0.615	5.42
40	992.2	65.31	-05	65.80	-08	4.179	0.629	4.34
50	988.0	54.71	-05	55.37	-08	4.181	0.640	3.57
60	983.2	46.68	-05	47.48	-08	4.185	0.651	3.00
70	977.7	40.44	-05	41.36	-08	4.190	0.659	2.57
80	971.8	35.49	-05	36.52	-08	4.197	0.667	2.23
90	965.3	31.50	-05	32.63	-08	4.205	0.673	1.97
100	958.3	28.22	-05	29.45	-08	4.216	0.677	1.76
140	926.1	19.61	-05	21.17	-08	4.285	0.685	1.23
180	886.9	14.94	-05	16.85	-08	4.408	0.674	0.98
220	840.3	12.10	-05	14.40	-08	4.613	0.648	0.86
260	784.0	10.15	-05	12.95	-08	4.983	0.606	0.83



## Liite 16 Suomalaisia voimalaitoksia

### MERI-PORI POWER PLANT



#### Teknisiä tietoja:

**Kokonaissuunnittelu ja toteutus**  
IVO Power Engineering Oy

**Arkkitehtisuunnittelu**  
Kaupunkisuunnittelu Oy

**Päärakennusten yhteinen tilavuus**  
610 300 m<sup>3</sup>

**Sähköteho** 565 MW

**Vuotuinen sähköntuotanto** 3,6 TWh

**Hyötysuhde** 43,5 %

**Pääpolttoaine**

Kivihiili

- kulutus 180 t/h
- tehollinen lämpöarvo (saapumistila) 23-30 MJ/kg
- kosteus (saapumistila) 5-14 %
- rikkipitoisuus (kuiva) 0,3-1,7 %

**Käynnistys- ja varapolttoaineena raskas polttoöljy**

**Jäähdytysvesi**

- meriveden tarve 14,5 m<sup>3</sup>/s
- mitoituslämpötila 5 °C
- lämpötilan nousu n. 10 °C

#### Technical specifications:

**Overall design and implementation**  
IVO Power Engineering Ltd

**Architectural design**  
Kaupunkisuunnittelu Oy

**Main building total volume**  
610 300 m<sup>3</sup>

**Electric output** 565 MW

**Annual power generation** 3.6 TWh

**Efficiency** 43.5%

**Main fuel**

Coal

- consumption 180 t/h
  - net calorific value (at arrival) 23-30 MJ/kg
  - moisture content (at arrival) 5-14%
  - sulphur content (dry) 0.3-1.7%
- Start-up and reserve fuel is heavy fuel oil.**

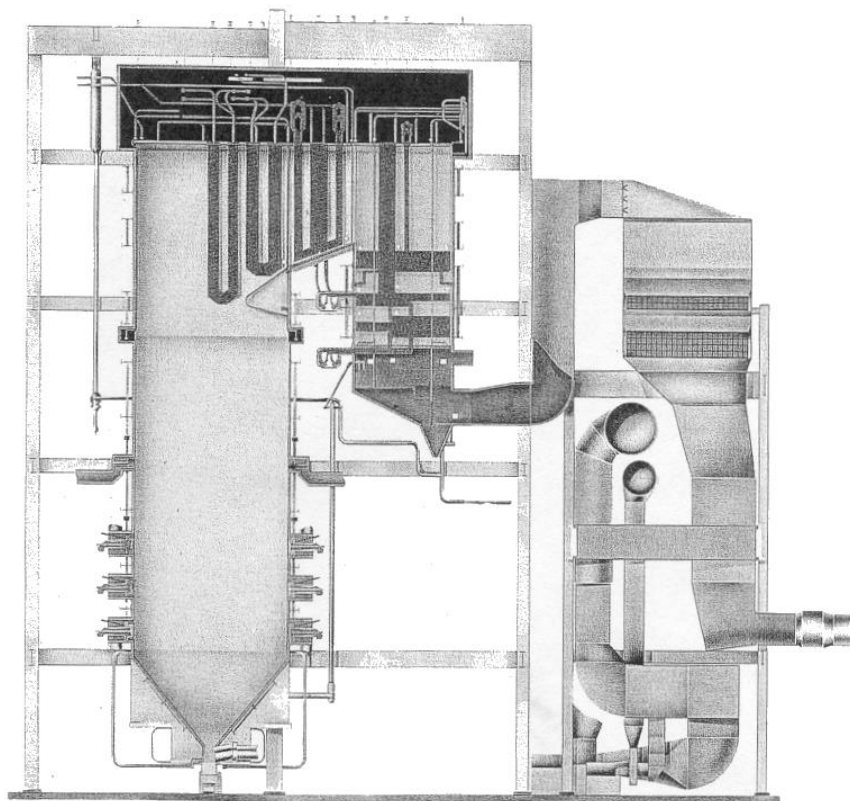
**Cooling water**

- sea water demand 14.5 m<sup>3</sup>/s
- design temperature 5 °C
- temperature rise about 10 °C

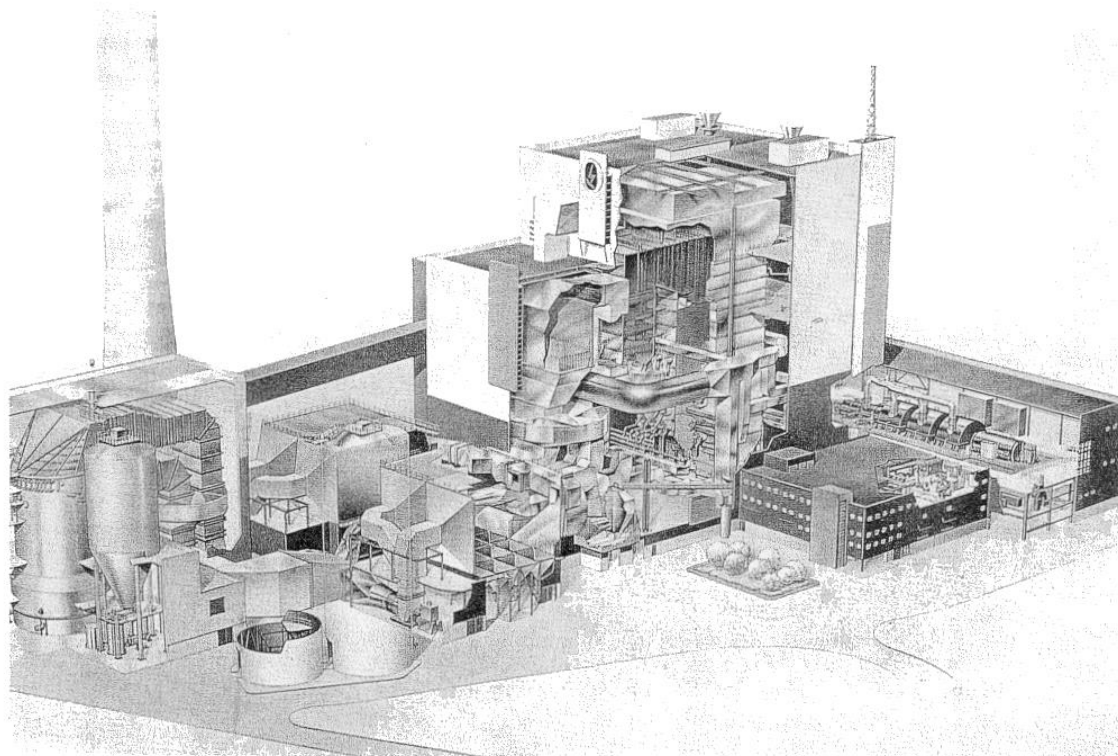


**Kattilalaitos**  
**Boiler plant**

* Toimittaja	Tampella Power
<i>Supplier</i>	
* Kattilan korkeus	60 m
<i>Boiler height</i>	
* Kattilan teräsmäärä	4000 t
<i>Boiler steel</i>	
* Polttoaineteho	1300 MW
<i>Fuel effect</i>	
* Kivihiilen kulutus	50 kg/s
<i>Coal consumption</i>	
* Tuorehöyry	
<i>Live steam</i>	
- määrä	440 kg/s
<i>flow rate</i>	
- paine	240 bar
<i>pressure</i>	
- lämpötila	540 °C
<i>temperature</i>	
* Kuuma välitulistushöyry	
<i>Hot reheat steam</i>	
- määrä	397 kg/s
<i>flow rate</i>	
- paine	46 bar
<i>pressure</i>	
- lämpötila	560 °C
<i>temperature</i>	
* Kylmä välitulistushöyry	
<i>Cold reheat rate</i>	
- määrä	397 kg/s
<i>flow rate</i>	
- paine	48 bar
<i>pressure</i>	
- lämpötila	299 °C
<i>temperature</i>	



**Kattilarakennuksella on tilavuutta kaikkiaan 275 000 kuutiometriä.**  
**Volume of boiler plant 275,000 cubic metres.**



**Kattila**

Ylikriittinen Benson -tyyppinen läpivirtauskattila liukuvalla paineella. Tyypin oksidien päästöt vähennetään matalatyyppioksidipolttimilla (30 kpl) ja katalyyttisellä typenpoistolaitoksella.

Toimittaja: Tampella Power Oy (lisenssillä Babcock Energy:itä)

- polttoaineteho 1 300 MW
- tuorehöyryn määrä 440 kg/s
- paine 240 bar
- lämpötila 540 °C
- kuuman välitulistushöyryn määrä 397 kg/s
- paine 46 bar
- lämpötila 560 °C
- syöttöveden lämpötila 265 °C
- savukaasun loppulämpötila 120 °C

**Turbüini**

Viisipesäinen välitulistushöyryturbiini

Toimittaja: ABB Stal Ab

**Generaattori**

Vetyjäähdytteinen, staattorin käämit vesijäähdytteisiä

- nimellisteho 654 MVA
- jännite 21 kV
- tehokerroin  $\cos \phi$  0,9
- taajuus 50 Hz
- pyörimisnopeus 3 000 r/min

**Lauhdutin**

Valmistaja: ABB Lang

- paine 0,02 bar
- jäähdytyspinta-ala 26 000 m<sup>2</sup>
- jäähdytysputkien määrä 15 600 kpl
- pituus 22,6 m
- materiaali titaani

**Syöttövesipumppu**

Pumppaa syöttövesisäiliöstä kattilaan syötettävän veden noin 270 barin paineeseen. Kaksivaiheinen

Valmistaja: KSB

- syöttöveden määrä 435 kg/s
- syöttöveden paine pumpun jälkeen 270 bar
- syöttöveden lämpötila 180 °C

Turbüinikäyttöinen, akseliteho 17 MW ja pyörimisnopeus 4 350 r/min

Valmistaja: ABB Turbinen

**Käynnistysyöttövesipumppu**

Pumppaa syöttöveden kattilaan käynnistystilanteessa, kun höyryturbiinikäyttöistä syöttövesipumppua ei voida vielä käyttää.

Kaksivaiheinen

Valmistaja: KSB

- syöttöveden määrä 240 kg/s
- syöttöveden paine pumpun jälkeen 210 bar
- syöttöveden lämpötila 180 °C

Käyttömootorin teho 7 000 kW

Valmistaja: ABB Drives

**Savukaasupuhallin (2 kpl)**

Imee kattilasta savukaasut puhdistettavaksi ja edelleen savupiippuun.

Valmistaja: Storck Howden

- pyörimisnopeus 990 r/min
- savukaasun virtausmäärä 230 Nm<sup>3</sup>/s
- savukaasun lämpötila 120 °C

Käyttömootorin teho 4 700 kW

Valmistaja: ABB Drives

**Savukaasunpuhdistuslaitos**

Toimittaja: L & C Steinmüller GmbH ja Outokumpu Ecoenergy Oy

Sähkösuodatin

- puhdistusaste 99,5 %

**Rikinpoistolaitos**

Puhdistaa rikkidioksidin savukaasusta kalkkilietteen avulla.

- savukaasumäärä 460 Nm<sup>3</sup>/s
- puhdistusaste noin 90 %
- kalkkikiven kulutus 40 000 t/a
- tuottaa kipsiä 60 000 t/a

**Automaatiojärjestelmä**

Pääautomaatiojärjestelmä Teleperm MEA

Toimittaja: Siemens Oy

Prosessitietokone, PMS

Toimittaja: ABB Strömberg

**Boiler**

Overcritical, Benson-type, once-through boiler on sliding pressure.

Nitric oxide emissions are reduced with low nitric oxide (low-Nox) burners (30) and a catalytic denitrification plant.

Supplier: Tampella Power (Licensed by Babcock Energy)

- fuel effect 1,300 MW
- live steam flow 440 kg/s
- pressure 240 bar
- temperature 540 °C
- hot reheated steam flow 397 kg/s
- pressure 46 bar
- temperature 560 °C
- feedwater temperature 265 °C
- flue gas exit temperature 120 °C

**Turbine**

Five-cylinder reheating steam turbine

Supplier: ABB Stal Ab

**Generator**

Generator is hydrogen-cooled, stator windings are water-cooled.

- rated power 654 MVA
- voltage 21 kV
- power factor  $\cos \phi$  0.9
- frequency 50 Hz
- rotative velocity 3,000 rpm

**Condenser**

Manufacturer: ABB Lang

- pressure 0.02 bar
- cooling surface 26 000 m<sup>2</sup>
- number of cooling pipes 15,600
- length 22.6 m
- material titanium

**Feedwater pump**

Pumps water from the feedwater tank into the boiler at a pressure up to about 270 bar. Double-stage pump.

Manufacturer: KSB

- feedwater flow 435 kg/s
- feedwater pressure after pump 270 bar
- feedwater temperature 180 °C

Turbine-driven, shaft output 17 MW and rotative velocity 4,350 rpm

Drive manufacturer: ABB Turbinen

**Start-up feedwater pump**

Pumps feedwater into the boiler during start-up, when the steam turbine-driven feed water pump cannot be used yet

Double-phase pump

Manufacturer: KSB

- feedwater flow 240 kg/s
- feedwater pressure 210 bar
- feedwater temperature 180 °C

Drive motor output 7,000 kW

Manufacturer: ABB Drives

**Induced-draught fan (2)**

Absorbs flue gases from the boiler for cleaning and passing into the stack

Manufacturer: Storck Howden

- rotative velocity 990 rpm
- flue gas flow rate 230 Nm<sup>3</sup>/s
- flue gas temperature 120 °C

Drive motor output 4,700 kW

Manufacturer: ABB Drives

**Flue gas cleaning plant**

Supplier: L & C Steinmüller GmbH and Outokumpu Ecoenergy Oy

Electrostatic precipitator

- efficiency 99.5%

**Desulphurization plant**

Cleans flue gases of sulphur dioxide using limestone slurry.

- flue gas volume flow 460 Nm<sup>3</sup>/s
- cleaning ratio about 90%
- limestone consumption 40,000 t/a
- produces gypsum 60,000 t/a

**Automation system**

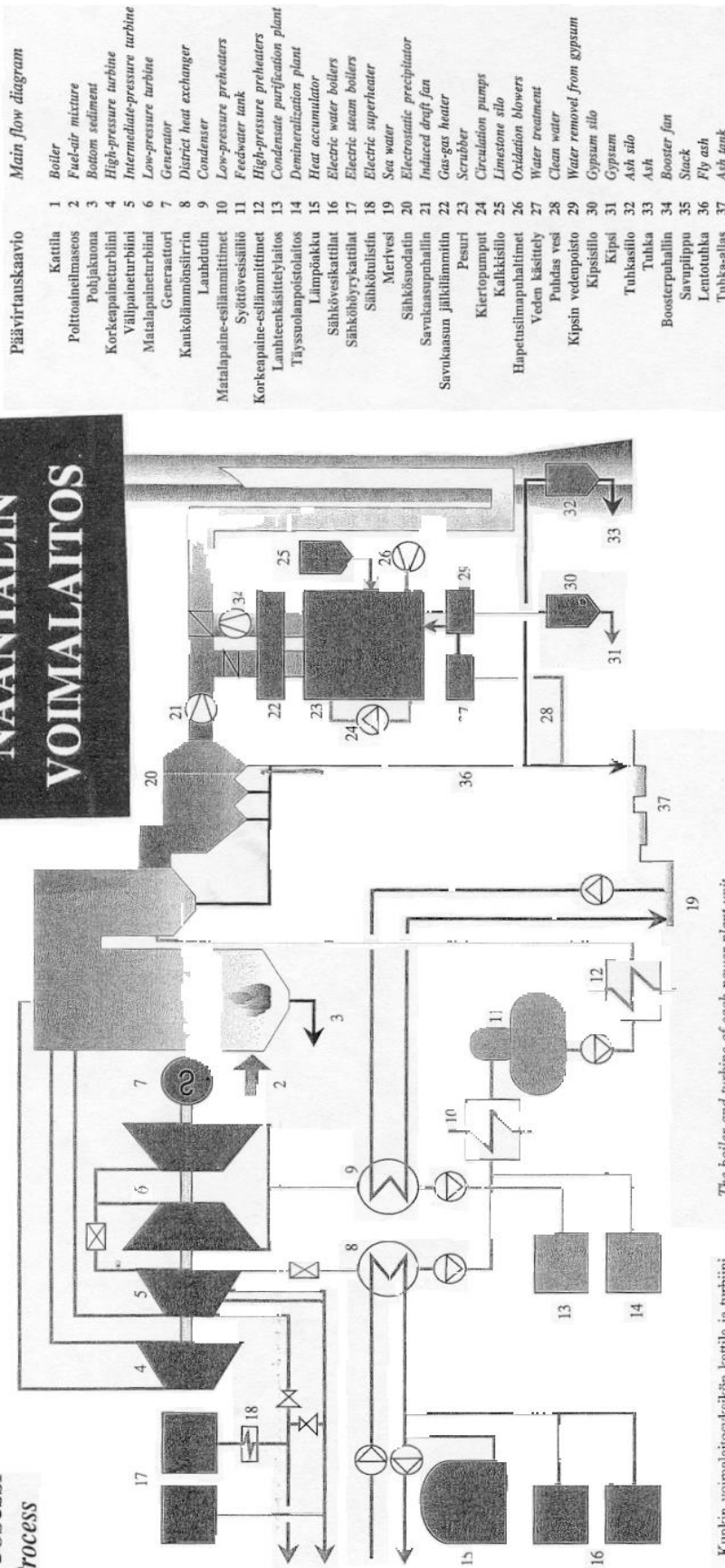
Main automation system Teleperm MEA

Supplier: Siemens Oy

Process computer, PMS

Computer supplier: ABB Strömberg

**Prosessi**  
*Process*



Kunkin voimalaitosyksikön kattila ja turbiini apulaitteineen muodostavat suljetun kiertoprosessin.

The boiler and turbine of each power plant unit together with the auxiliary equipment form a closed-cycle process.

**Kattila**  
Kattila on läpivirtauskattila ja sen korkeus on 46 metriä. Kaasuvirtauksiin määritetty tulipesän tilavuus on 2000 kuutiometriä ja poikkileikkaus 100 neliometriä.  
Pääpolttoaine on kivihiili. Käynnistyksissä ja varapolttoaineena käytetään raskasta polttoöljyä. Lisäksi poltetaan Nesteen jalostamolta siirrettyä jalostamokaasua, jonka osuus on noin 5 prosenttia.  
Kivihiiliä jauhetaan alle 0,1 millimetrin raakokoon hiihlymällyissä, jotta kullakin kattilalla on kolme. Kunkin hiihlymällyn teho on noin 20 tonnia tunnissa. Kattilan läyteen kuormaamaan tarvitaan hiiltä noin 45 tonnia tunnissa eli tuhat tonnia vuorokaudessa.  
Kivihiilen ja ilman seos puhalletaan kattilaan noin 90 asteisena tulipesän nurkissa olevista

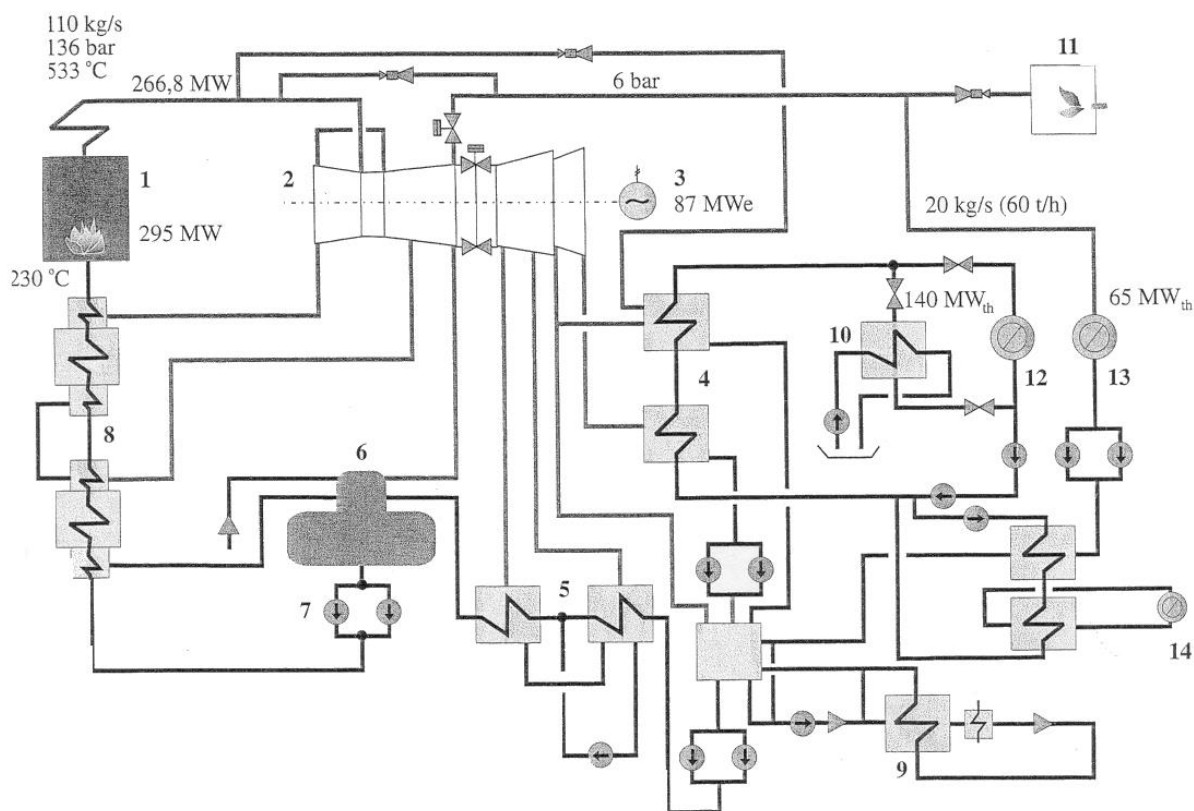
**Boiler**  
The boiler is 46-metre flowthrough boiler. The furnace, mazoned to be gas tight, has a volume of 2000 m<sup>3</sup> and a cross section of 100 m<sup>2</sup>.  
The main fuel is coal; heavy fuel oil is used for the start-up and as reserve fuel. Additionally, the proportion of this fuel is some 5%.  
Coal mills pulverize the coal to a grain size of less than 0.1 mm; the output of a mill is 20 t/h, and each boiler has three coal mills. At the maximum boiler load, the consumption of coal is some 45 t/h, i.e. about 1000 t in 24 hours.  
A mixture of pulverized coal and air, at a temperature of some 90°C, is blown into the boiler, through the burners in the corners of the furnace, causing a whirl that intensifies heat distribution.

polttimista, jolloin tulipesän muodostuu lämmön jakautumista tehostava pyörre.  
Palaessaan yli 1300 asteen lämpötilassa polttoaine höyryyttää syöttöveden, joka pumpataan kattilalämpimien putkistoon noin 240 barm paineena ja 280 asteisena.  
Kattilalämpimissä on vesiputkistoa yhteensä 108 kilometriä ja lämmönsiirtopintaa 4,4 hehtaaria. Kattilasta saadaan 180 barm paineista ja 535 asteista höyryä 117 kilogrammaa sekunnissa. Naamali 3 -yksikön maksimiteho on nostettu 128 kilogrammaan sekunnissa.  
Kattilan savukaasut johdetaan sähkösuodattimeen, jossa mistä poistetaan lentotuhkaa 99,5-prosenttisesti. Naamali 2 ja 3 -yksikköitten savukaasut siirretään rikinpoistolaitokseen ja sieltä 130 metriä korkeaan savupiippuun.

The fuel is burnt at a temperature exceeding 1300°C; this evaporates the feedwater, pumped into the boiler wall piping system at a pressure of some 240 bars and temperature of 280°C.  
The boiler walls have a total of 108 km of water pipes and 4.4 hectares of heat transfer surface.  
The boiler produces 117 kg of steam per second; the pressure of this steam is 180 bars, the temperature 535°C. The maximum output of unit three has been raised to 128 kg/s.  
Flue gases of the boiler are led into the electrostatic precipitator, which collects 99.5% of the fly ash. Flue gases of units two and three are fed into the desulphurization plant and further into the 130-metre stack.

18

Prosessikaavio  
Process diagram



Leijukattila	1	Fluidized bed boiler
Turbiini	2	Turbine
Generaattori	3	Generator
Kaukolämmönvaihtimet	4	District heat exchangers
Matalapaine-esilämmittimet	5	LP preheaters
Syöttövesisäiliö	6	Feed water tank
Syöttövesipumput	7	Feed water pumps
Korkeapaine-esilämmittimet	8	HP preheaters
Lauhteenpuhdistuslaitos	9	Condensate purification plant
Apujäähdytin	10	Auxiliary cooler
Höyrykattila	11	Steam boiler
Kaukolämmön käyttäjät	12	District heat consumers
Höyryn käyttäjä	13	Steam consumer
Viherlandian kaukolämmönvaihdin	14	Viherlandia district heat exchanger

**Teknisiä tietoja:**

**Technical specifications:**

\* Sähköteho, maksimi 87 MW  
Electrical output, max.

\* Kaukolämpöteho, maksimi 140 MW  
District heating output, max.

\* Höyryteho, maksimi 65 MW  
Process steam output, max.

\* Polttoaine

Fuel

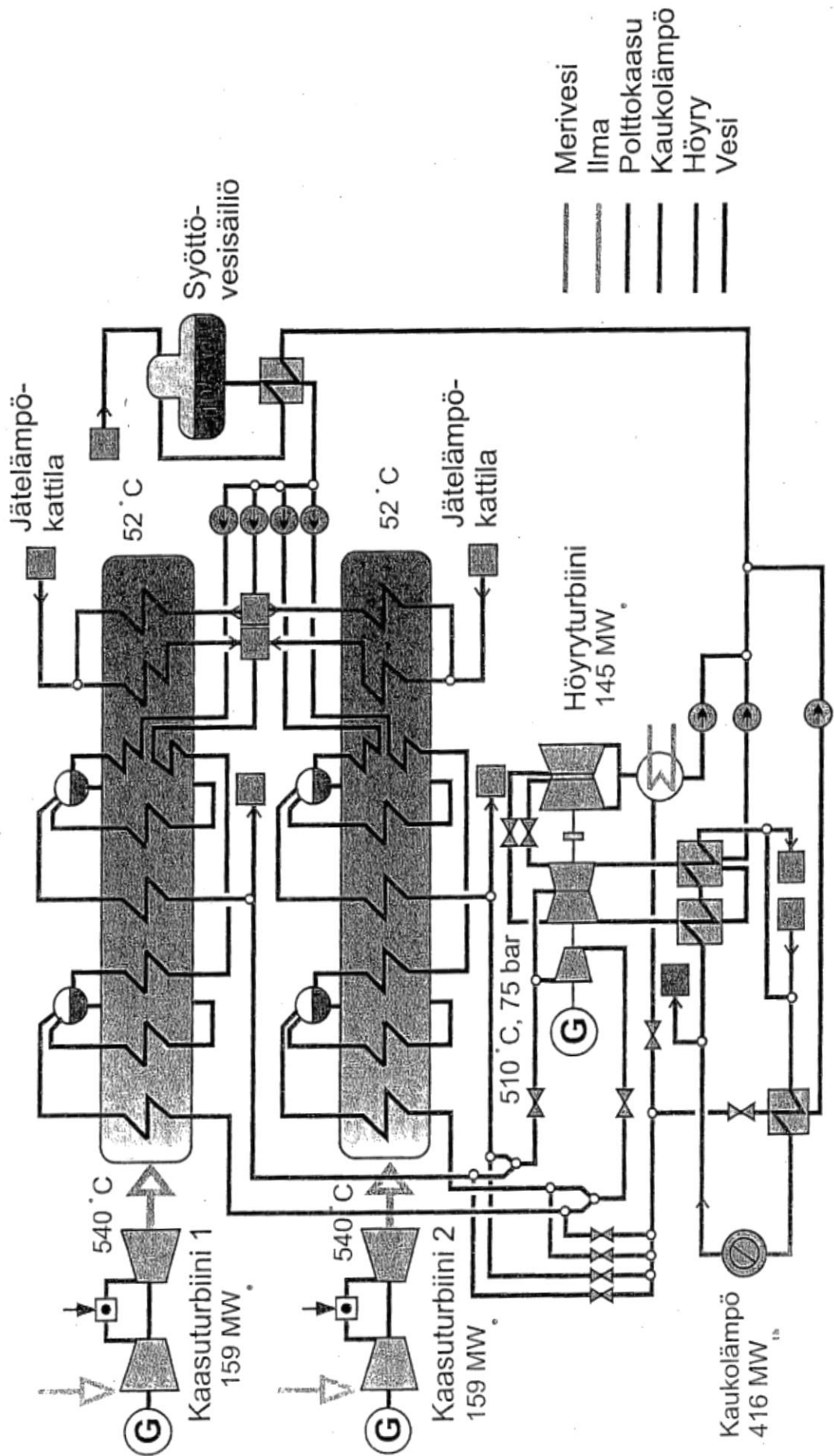
- jyrshinturve
- milled peat
- hake, kuori ja sahanpuru
- chips, bark and sawing waste
- hiili ja öljy
- coal and oil

\* Hyötysuhde, noin 85 %  
Efficiency approx.

**RAUHALAHDEN  
VOIMALAITOS**

# Helsinki Energia - Vuosaari B

## 463 MW:n maakaasukombivoimalaitos





## Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3



### Yleistä

Reaktorin lämpöteho	4 300 MW <sub>th</sub>
Sähköteho, brutto	1 720 MWe
Sähköteho, netto	1 600 MWe
Hyötysuhde	n. 37 %
Pääkiertovirtaus	23 135 kg/s
Reaktorin paine	155 bar <sub>osa</sub>
Jäähdytteen keskilämpötila reaktoripaineastiassa	312 °C
Jäähdytteen lämpötila kuumahaarassa	328 °C
Jäähdytteen lämpötila kylmähaarassa	296 °C
Vuotuinen sähköntuotanto	n. 13 TWh
Merivesivirtaus	57 m <sup>3</sup> /s
Käyttökä	n. 60 v.
Rakennustilavuus	n. 1 000 000 m <sup>3</sup>
Suojarakennuksen tilavuus	80 000 m <sup>3</sup>
Suojarakennuksen suunnittelupaine	5,3 bar

### Reaktorisydän

Polttoainennippujen määrä	241 kpl
Reaktorisydämen aktiivikorkeus	4,2 m
Reaktorisydämen halkaisija	3,77 m
Uraanin määrä reaktorissa	n. 128 tU
Polttoaineen rikastusaste, alkulataus	1,9–3,3 % U-235
Polttoaineen rikastusaste, vaihtolataukset	1,9–4,9 % U-235
Polttoaineen kulutus vuodessa	n. 32 tU
Vuotuinen polttoainekulutus vuodessa	n. 60 nippua

### Polttoaine

Polttoaine	uraanidioksidi UO <sub>2</sub>
Nipputyyppi	17x17 HTP
Polttoainesauvoja nipussa	265 kpl
Ohjausputkien määrä nipussa	24 kpl
Nipun välitukien määrä	10 kpl
Polttoainenipun pituus	4,8 m
Polttoainenipun paino	735 kg
Polttoainenipun sivupituus	213,5 mm
Suojakuorimateriaali	M5™
UO <sub>2</sub> -tablettien tiheys	10,45 g/cm <sup>3</sup>
Polttoaineen poistopalama	45 MWd/kgU

### Säätöelementit

Säätöelementtien lukumäärä	89 kpl
Kokonaispituus	4 717,5 mm
Absorbaattoriosan pituus	Yläosa: 1 340 mm Alaosa: 2 900 mm
Absorbaattoriaine	Yläosa: boorikarbidi Alaosa: hopea, indium, kadmium

### Reaktoripaineastia

Sisähalkaisija	4,9 m
Sisäkorkeus	12,3 m
Seinämän paksuus	250 mm
Pohjaseinämän paksuus	145 mm
Ruostumattoman pinnoitteen paksuus	7,5 mm
Suunnittelupaine	176 bar
Suunnittelulämpötila	351 °C
Paino kannen kanssa	526 t

**Turbiinilaitos**

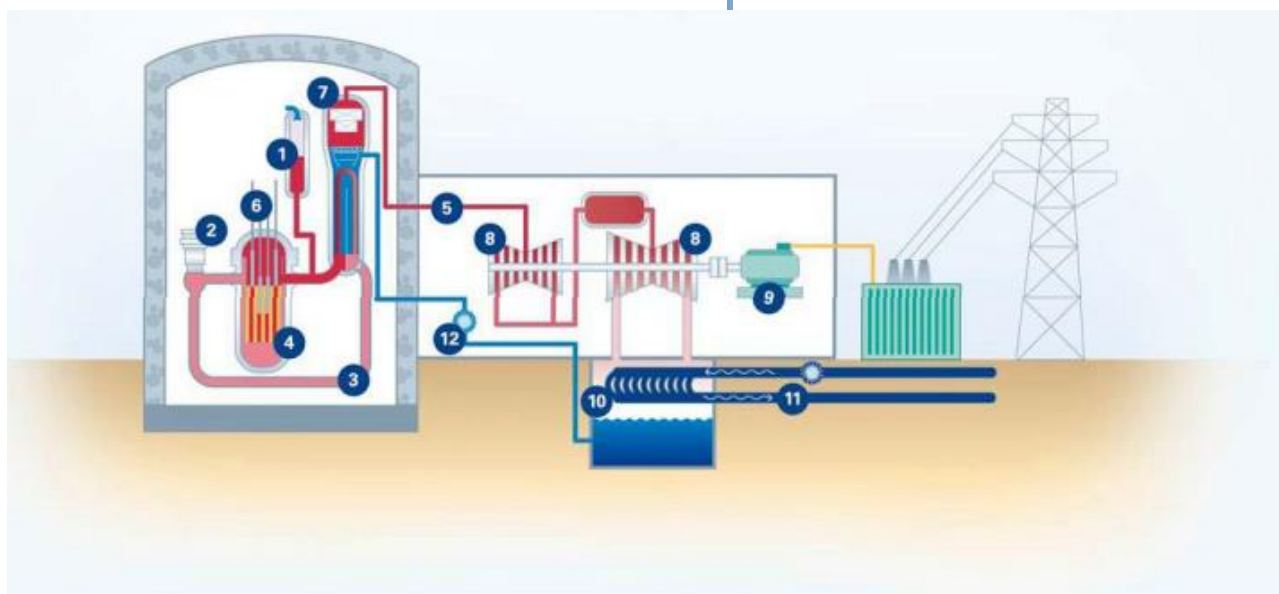
Turbiinigeneraattoriyksikkö	1 kpl
Nimellisteho	n. 1 720 MW
Höyryn paine turbiinilla	75,5 bar
Höyryn lämpötilä	290 °C
Höyryn virtaus	2 443 kg/s
Kierrosluku	1 500 1/min
Korkeapaineturbiini	1 kpl
Matalapaineturbiini	3 kpl
Korkeapaineturbiinin sulku- ja säätöventtiilit	4/4 kpl
Matalapaineturbiinin sulku- ja säätöventtiilit	6/6 kpl
Viimeinen siipivyöhyke	
- poistoala	30 m <sup>2</sup>
- siiven pituus	1 830 mm
- kärjen halkaisija	6 720 mm
Turbiinigeneraattorin akselin pituus	68 m
<b>Lauhdutin</b>	
Jäähdytyspinta-ala	110 000 m <sup>2</sup>
Jäähdyttävä aine	merivesi
Jäähdytysveden virtausmäärä	53 m <sup>3</sup> /s
Tyhjä täydellä teholla	24,7 mbar
Lämpötilan nousu	12 °C
<b>Syöttövesi</b>	
Esilämmitysasteita	7 kpl
Syöttöveden loppulämpötilä	230 °C

**Generaattori**

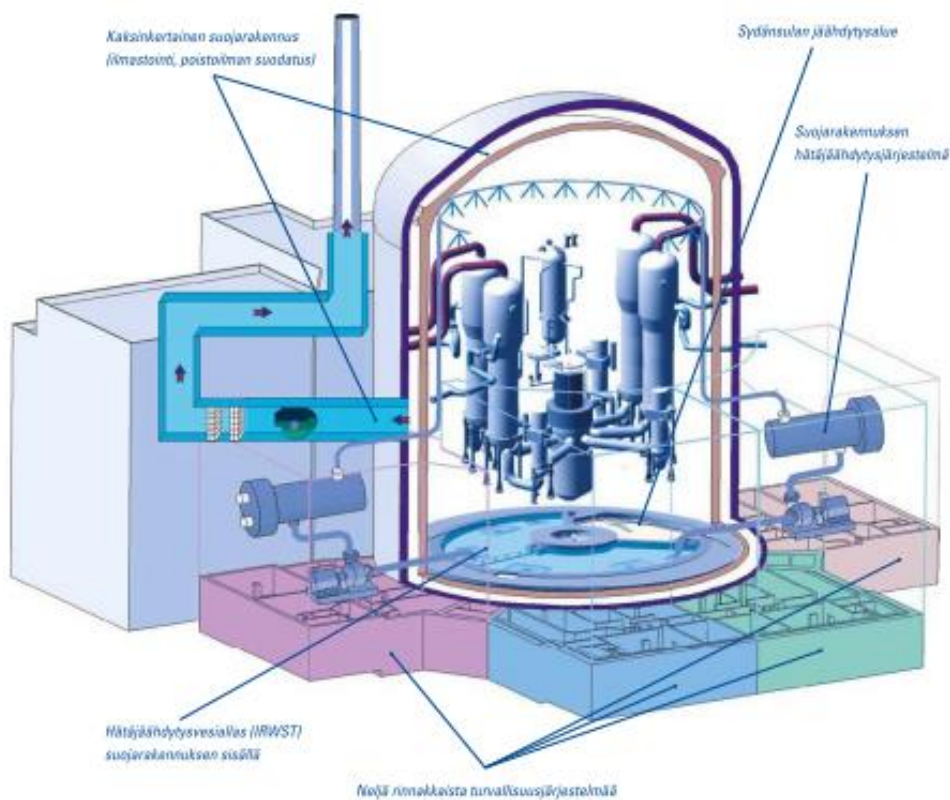
Nimellisteho	1 992 MVA
Tehokerroin, nimellinen	0,9
Nimellisjännite	27 kV ± 5 %
Taajuus	50 Hertz
Kierrosnopeus	1 500 1/min
Jäähdytys, staattorikäämit	vesi
Jäähdytys, roottori	vety
Magnetointivirta	9 471 A
Jäähdytysveden lämpötilä	45 °C
Vetyjäähdytteen lämpötilä	40 °C

**Sähkönsyöttö**

<b>Päämuuntaja</b>	3 x 1 vaihe
Nimellisteho	3 x 701 MVA
Nimellisjännite	410/27 kV
<b>Omakäyttömuuntajat</b>	2 kpl
Nimellisteho	90/45/45 MVA
Nimellisjännite	400/10,5 kV
<b>Varasjyttömuuntaja</b>	1 kpl
Nimellisteho	100/50/50 MVA
Nimellisjännite	110/10,5 kV
<b>Hätädiezelgeneraattorit</b>	4 x EDG ja 2 x SBO
Nimellistehot	4 x 7,8 MVA ja 2 x 3,0 MVA
<b>Turbiinilaitoksen diesel</b>	1 kpl
Nimellisteho	1,6 MVA

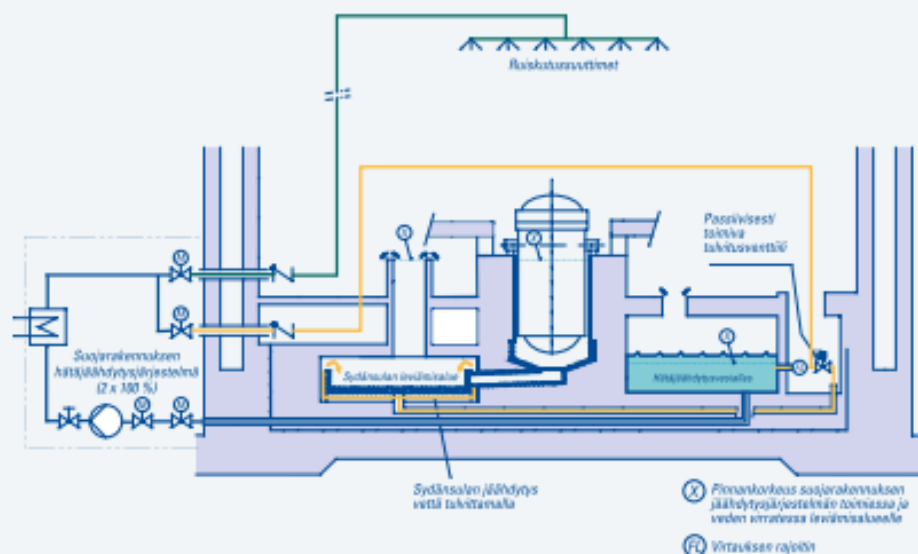


### Esimerkkejä Olkiluoto 3:n keskeisistä turvallisuusominaisuuksista



### Sydänsulan jäähdytysjärjestelmä

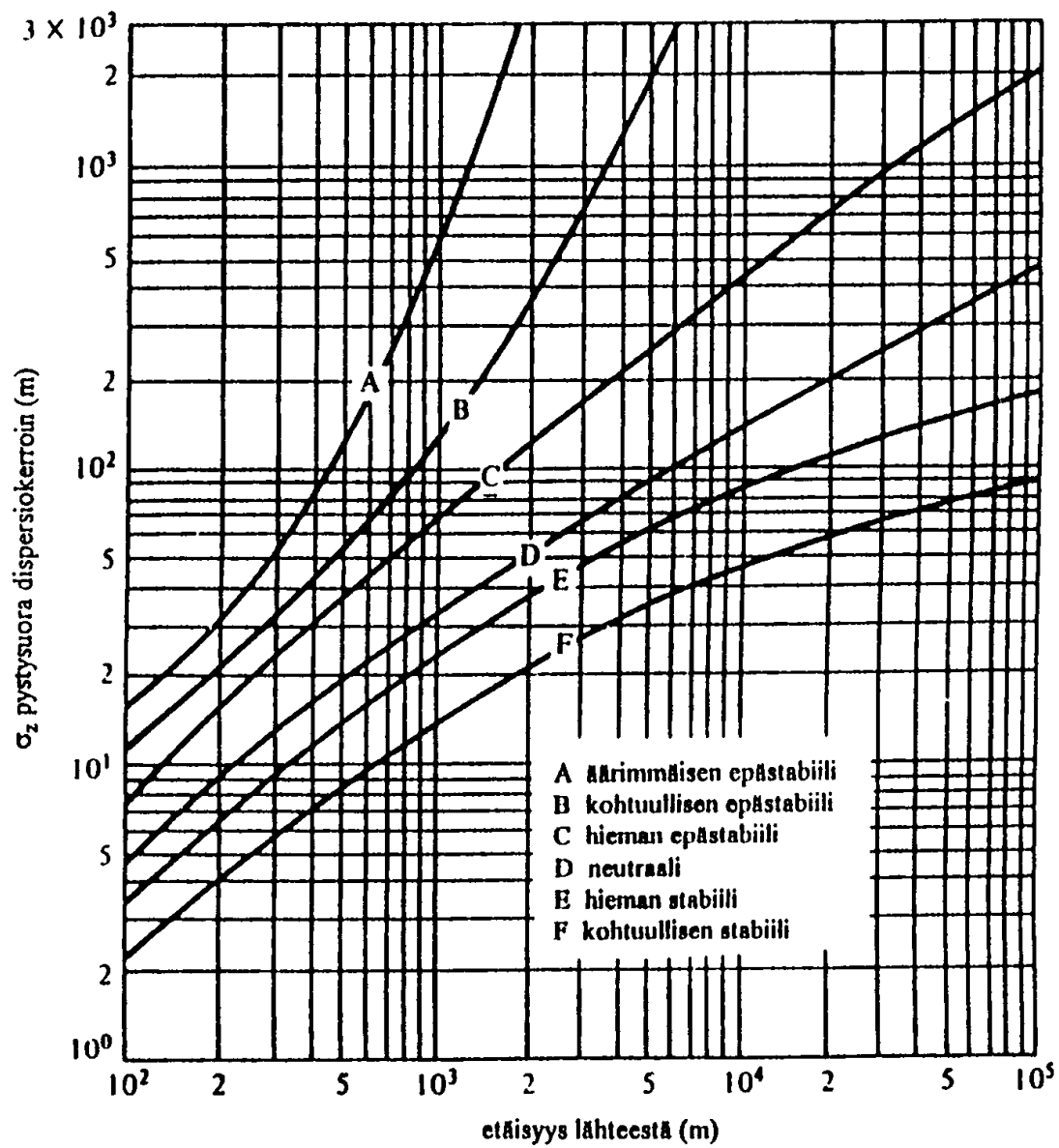
OL3:ssa erittäin epätodennäköisessä vakavassa onnettomuusolanteessa sydänsula johdetaan sydänsulan levämsäkalveelle, jossa se jäähdytetään jäähmeään tilaan.





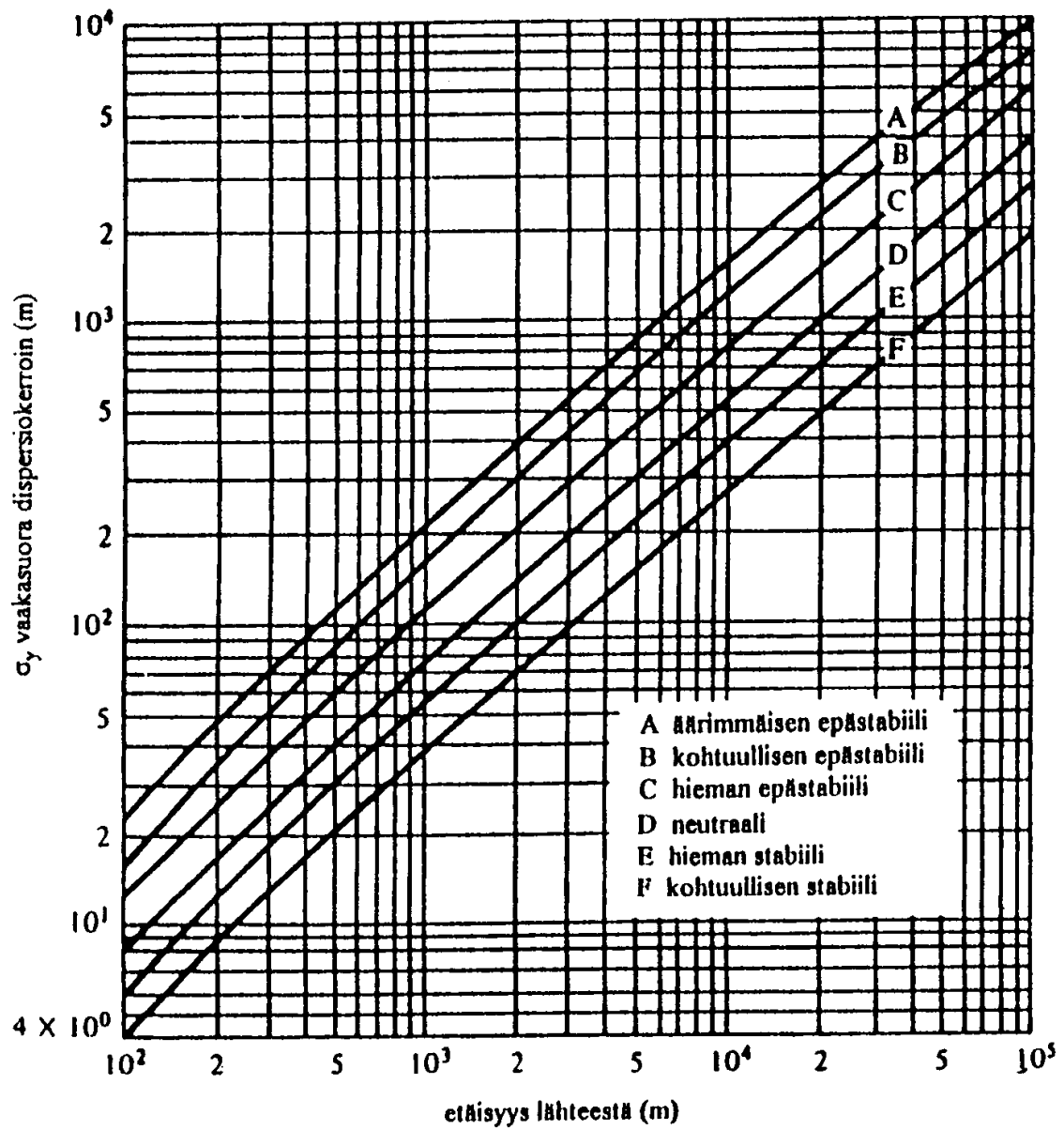
## Liite 17

Pystysuora dispersiokerroin  $\sigma_z$  etäisyyden funktiona (etäisyys lähteestä tuulen suunnassa).



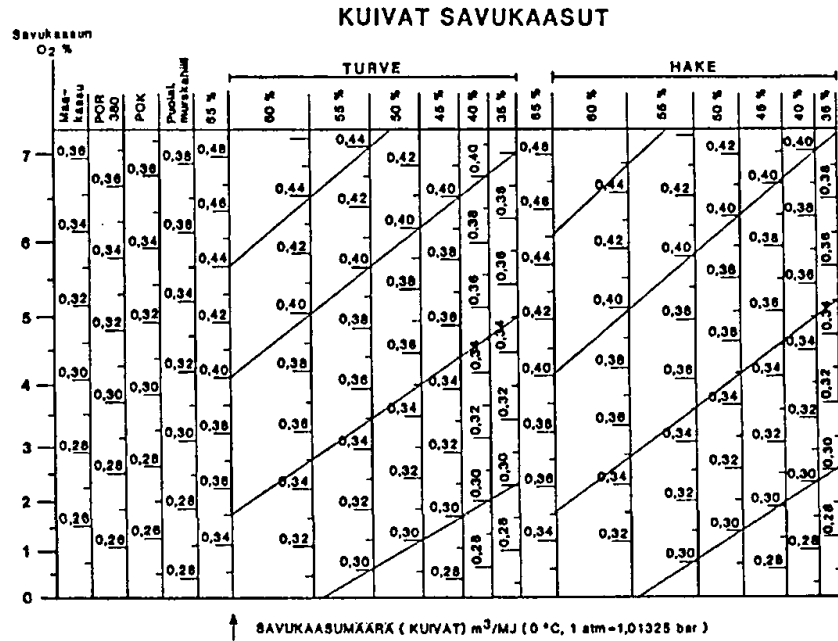
## Liite 18

Vaaka-suora dispersiokerroin  $\sigma_y$  etäisyyden funktiona (etäisyys lähteestä tuulen suunnassa).



**Liite 19**

Polttoaineiden (likimääräiset) savukaasumäärät



Kuva 2.1.10 Polttoaineiden savukaasumäärät (kuivat)

