

Sisällys

Esipuhe	3
Tekijät	4
Lukijalle	5
Sisällys	6
Johdanto	8

1 Kaukolämpövoimalaitokset 10

Kaukolämpöjärjestelmä	10
Ympäristövaikutukset	11
Kaukolämmön tuotanto	12
Huippu- ja varalämpökeskukset	14
Sähkökattilat	15
Suuret lämpöpumput	16
Kaukolämpöjärjestelmän säädöt	18
Putkistoratkaisut	20
Rakennusten lämmönjakokeskusten kytkennät	22
Pienen kaukolämpövoimalaitoksen peruskytkentä ja komponentit	25
Vesihöyrypiirin kytkentä ja toiminta-arvot	25
Kaukolämmönvaihdin	27
Lauhdepumppu	28
Syöttövesisäiliö eli syvesäiliö	28
Syöttövesipumppu	29
Kattila	30
Höyryturbiini	31
Voimalaitoksen omakäyttöhöyryjärjestelmä	33
Apukattilalaitos	34
Voimalaitoksen jäähdytysjärjestelmä	36
Sähköntuotannon hyötysuhteen parantaminen	37
Kaksivaiheinen kaukolämpöveden lämmitys	38
Syöttöveden esilämmitys	38
Välitulistus	44
Sähkön ja kaukolämmön eriaikainen tuotanto kaukolämpövoimalaitoksessa	47
Kaukolämpöveden apujäähdytin	47
Varaaja eli kaukolämpöakku	48
Erillinen lauhdeturbiini	49

2 Teollisuuden vastapainevoimalaitokset 52

Teollisuuden energiankäyttö Suomessa	52
Ympäristövaikutukset	52
Teollisuuden voimalaitoksen erityispiirteet	54
Energiantuotanto sulfaattiselutehtaalla	56
Voimalaitos osana sellun valmistusprosessia	56
Soodakattilan rakenne ja toimintaperiaate	63

Sulfaattiselutehtaan energiatase	69
Mekaanisen massan valmistusmenetelmät	70
Mekaanista massaa valmistavan tehtaan energiavirrat	73
Höyrylämmitysjärjestelmä	74
Höyry lämmitysaineena	74
Matalapainehöyry- ja lauhdeputkistot	75
Höyry- ja lauhdeputkien mitoitus	80

3 Konventionaaliset lauhdutusvoimalaitokset 84

Konventionaalisen lauhdutusvoimalaitoksen ominaispiirteet	85
Ympäristövaikutukset	85
Meri-Porin voimalaitos	87
Perusprosessin komponentit	88
Läpivirtauskattilat ja liukuvan paineen ajotapa	88
Kivihiilen polttotekniikat	90
Lauhduksimet	97

4 Ydinvoimalaitokset 102

Ydinreaktion periaate	103
Ydinpolttoaineen valmistus ja kierto	105
Reaktorien päätyypit	107
Painevesireaktori	107
Kiehumusvesireaktori	108
CANDU-reaktori	109
Kaasujäähdytteinen reaktori	110
Grafiittihidasteinen kevytvesireaktori	111
Reaktorisukupolvet ja kehittyneet reaktorit	111
Pieni modulaarinen ydinreaktori	112
Painevesilaitos (PWR)	113
Primääripiiri	113
Sekundääripiiri ja pähöyryjärjestelmä	118
Olkiluoto 3	121
Kiehumusvesilaitos (BWR)	126
Rakenne	126
BWR-apujärjestelmät	127
Ydinvoimalaitoksen säätö	130
Ydinjätehuollon toteuttaminen	131
Voimalaitosjätteet	131
Käytetyn polttoaineen käsittely	132
Säteily	133
Radioaktiivisuus	133
Säteilyn vaikutukset ihmiseen	133
Ympäristövaikutukset	135

5 Höyryturbiinit 136

Turbiinin toimintatapa	141
Häviötön virtaus	141
Todellinen virtaus	142
Laval-suutin	142
Häviötön tasapaineturbiini	144
Häviötön ylipaineturbiini	146
Turbiinin häviöt	148
Sisäiset häviöt	148
Takaisinvoitto	149
Ulkoiset häviöt	150
Turbiinis suunnittelu ja -laskenta	150
Turbiinin osat	152
Turbiinin säätö	159
Turbiinin käyttö	162
Lämpötekniset mittaukset	165

6 Voimalaitoksen automaatio- ja sähköjärjestelmät 166

Yleistä automaatiojärjestelmistä	166
DCS-järjestelmä	168
Räjähdyshaaralliset tilat	172
Ohjelmoitavat logiikat	172
Turva-automaatiojärjestelmät	172
Turva-automaation määräaikaistoestukset	173
Turva-automaation rakenne	173
Optimoitijärjestelmät	175
Koneiden kunnonvalvonta	175
Muut järjestelmät	176
Voimalaitoksen sähköjärjestelmät	177
Generaattorit	177
Muuntajat	181
Kytkenkettä	182
Suomen sähkönsiirtojärjestelmä	182
Sähkömoottorit	189
Omakäyttösähköjärjestelmä	192
Vara- ja apuvoimantuotanto	193

7 Höyryvoimalaitoksen tehonsäädöt ja ajotavat 196

Tuorehöyryn paineen säädön peruskytkennät	196
Kiinteän paineen säätö	197
Etupainesäätö	197
Liukuvan paineen säätö	198

Säätötoteutukset voimalaitoksissa	198
Höyryturbiinin ja sähköntuotannon säädöt	199
Vastapainehöyryn tuotannon säädöt	200
Kaukolämmön tuotannon säädöt	201
Höyryn paineensäädöt ja tasausjärjestelmät usean höyryntuottajan kesken	202
Höyry prosessiteollisuuden sivutuotteena	202

8 Höyrykattilan käyttö 204

Kattilan käytön perussäännöt	204
Perusasioita kattilan automaatiosta	204
Kattilalaitoksen ylösajo ja käytönvalvonta	206
Esivalmistelut	206
Esivalmistelun toimenpiteet	206
Kattilan täyttö	207
Kattilan ylöslämmitys	208
Puhaltimien käynnistys	211
Kattilan tuuletus	212
Palamisilmapuhaltimien lukitukset	212
Petimateriaalin syöttäminen	214
Käynnistyspolttimen sytyttäminen	214
Kiinteän polttoaineen syötön aloitus	214
Normaalikäyttö	216
Päästöt kiinteällä polttoaineella	217
Kattilan nuohous	217
Käytönaikaiset silmämääräiset tarkistukset	218
Kattilan alasajo	218

9 Turbiinilaitoksen käyttö 220

Höyryturbiinin käyttöön liittyviä rajoituksia	220
Turbiinin käynnistysen esivalmistelut	221
Turbiinin ylösajo	222
Turbiinin lämmitys	222
Höyryturbiinin kylmäkäynnistys	223
Lukitukset	225
Generaattorin tahdistus	225
Käytönaikainen valvonta	226
Turbiinin alasajo	227

Liitteet	228
Hakemisto	248
Lähteet	251
Kuvaluettelo	252

Sisällys

Lukijalle.....	3
Sisällys.....	4
Johdanto.....	6

10 Polttoaineiden ominaisuudet ja käsittely 8

Polttoaineet.....	8
Puupolttoaineet.....	10
Jäteliemet.....	10
Yhdyskuntajäte.....	11
Polttoturve.....	11
Hiilipolttoaineet.....	14
Polttoöljyt.....	14
Kaasupolttoaineet.....	15
Polttoaineiden ominaisuudet.....	17
Polttoaineen koostumus.....	17
Polttoaineen kosteus.....	18
Haihtuvat aineet ja syttymislämpötilat.....	19
Tuhka ja sen ominaisuudet.....	20
Lämpöarvo.....	21
Polttoaineiden käsittely.....	24
Puu- ja turvepolttoaineiden käsittely.....	34
Voimalaitoksen polttoöljyjärjestelmä.....	26
Voimalaitoksen maakaasuputkisto.....	27
Jätteenpolttolaitoksen polttoaineiden käsittely.....	29

11 Palamisen, hyötysuhteen ja häviöiden laskenta 30

Palamisen laskenta.....	30
Palamisreaktiot.....	30
Palamisilmantarpeen laskenta.....	31
Syntyvien savukaasujen laskenta.....	33
Ilmakerroin.....	39
Palamisessa syntyvät haitalliset päästöt.....	40
Kattilan hyötysuhde ja häviöt.....	45
Hyötysuhteen määrittäminen suoralla menetelmällä.....	46
Hyötysuhteen määrittäminen epäsuoralla menetelmällä.....	49
Savukaasujen ja tuhkan häviöt.....	50
Palamatta jääneen polttoaineen häviöt.....	52
Säteilyhäviöt.....	55

12 Kattiloiden rakenteet ja toimintaperiaatteet 58

Kattiloiden vesihöyrypiirit.....	58
Luonnonkiertokattilat.....	58
Pakkokiertokattilat.....	63
Läpivirtauskattilat.....	64
Polttolaitteet ja tulipesärakenteet.....	68
Käynnistys- ja kuormapolttimet.....	68
Low-NO _x -polttimet.....	70
Arinapoltto.....	72
Leijukerrospoltto.....	77
Kattilan lämmönsiirtimet.....	89
Höyrysiirtimet.....	91
Tulisiirtimet.....	92
Veden esilämmittimet.....	96
Ilman esilämmittimet.....	98
Mitoitusperiaatteet.....	102
Lämmönsiirintyytit.....	105
Lämmönläpäisykertoimen määrittäminen.....	105
Lämpöpintojen puhdistus.....	106
Puhallusnuohoimet.....	107
Ääninuohoimet.....	109
Ilma-savukaasujärjestelmä.....	110
Primääri-ilma.....	110
Sekundääri-ilma.....	111
Kiertokaasujärjestelmä.....	111
Savukaasujärjestelmä.....	111

13 Savukaasujen puhdistus 112

Päästöjä koskevat viranomaismääräykset.....	112
Pölynerotusmenetelmät.....	114
Sähkösuodattimet.....	114
Dynaamiset erottimet.....	116
Kangassuodattimet.....	116
Savukaasupesurit.....	118
Pölynerotusmenetelmien erotusasteet.....	120
Rikinpoistomenetelmät.....	120
Märkämenetelmä.....	120
Puolikuivamenetelmä.....	121
Kuivamenetelmä.....	122
Typen oksidien poistomenetelmät.....	123
Katalyyttinen menetelmä.....	123
Katalyytiton menetelmä.....	125

14 Pumput ja puhaltimet 126

Pumput.....	127
Toimintaperiaatteet.....	127
Syrjäytyspumput.....	128
Dynaamiset pumput.....	129
Tehontarpeen laskenta.....	131
Pumpun valinta.....	134
Pumpun säätö.....	134
Pumppujen käyttö rinnan ja sarjassa.....	138
Imukyky ja kavitaatio.....	139
Keskipakopumpun rakenne.....	142
Pumpun käyttö ja ennaltaehkäisevä huolto.....	148
Puhaltimet.....	149
Keskipakopuhaltimet.....	149
Aksiaalipuhaltimet.....	150
Puhaltimen valinta.....	151
Puhaltimen säätö.....	151

15 Vedenkäsittely 154

Veden epäpuhtaudet.....	154
Veden laatuvaatimukset.....	155
Vesihöyrypiirin näytteenottopisteet.....	158
Kovuudenpoisto.....	158
Täyssuolanpoisto.....	159
Käänteisosmoosi (RO) ja sähköinen ioninvaihto (EDI).....	162
Terminen kaasunpoisto ja MDU.....	163
Kemikaalien lisäykset.....	164
Kemiallinen hapenpoisto hydratsiinilla.....	164
Kovuudenpoisto trinitriumfosfaatilla.....	165
Alkalointiaineet.....	166
Lauhteenpuhdistus.....	166

16 Kattilan käyttöönotto ja säilöntä 168

Höyryvoimalaitoksen käyttöönotto.....	168
Kattilan käyttöönottovaiheet.....	168
Kattilan säilöntä.....	170
Seisokkikorroosion yleisimmät mekanismit.....	170
Säilöntämenetelmät.....	171
Kuivasäilöntä.....	171
Märkäsäilöntä.....	173

Kuumapullotus.....	173
Savukaasupuolen säilöntä.....	174
Kattilan säilöntäesimerkki: Hovinsaaren leijukerroskattila.....	174

17 Kattilan NDT-tarkastukset 176

Kattilan määräaikaistarkastukset.....	176
Yleisimmät NDT-menetelmät.....	178
Visuaalinen tarkastus.....	178
Magneettijauhutarkastus.....	179
Tunkeumanestetarkastus.....	181
Pyörrevirtatarkastus.....	183
Jäljennetarkastus.....	185
Ultraäänitarkastus.....	186
Radiografinen tarkastus.....	187

18 Kunnossapidon menetelmät 188

Kunnossapitolajit.....	189
Kriittisyyskarttoitus.....	191
Kunnossapidon tietojärjestelmät.....	191
Käyttäjäkunnossapito.....	192
Kunnossapidon toteutuksen seuranta tunnuslukujen avulla.....	193
Kunnossapidon tehokkuuden seuranta ja kehittäminen.....	194
Työmäärät tiloittain.....	194
Ennakoivan ja korjaavan kunnossapidon suhde.....	195
Suunnittelun ja suunnittele mattoman työn suhde.....	195
Kunnossapitokustannukset.....	196
Top-listat vikaantuneimmille laitteille.....	197
Aikaan perustuvat mittarit.....	197

Kirjassa käytetyt piirrosmerkit.....	198
Kirjassa käytetyt lyhenteet.....	200
Höyrytaulukko.....	205
Vesihöyryn h,s-piirrokses.....	208
Hakemisto.....	211
Lähteet.....	214
Kuvaluettelo.....	215

Sisällys

Lukijalle.....	3
Sisällys.....	4
Johdanto.....	6

19 Moottorivoimalaitokset 8

Ympäristövaikutukset.....	10
Nestemäiset polttoaineet.....	10
Kevyt dieselpolttoöljy.....	11
Raskas polttoöljy.....	11
Setaaniluku ja setaani-indeksi.....	11
Kaasumaiset polttoaineet.....	12
Maakaasu.....	12
Biokaasut.....	12
Vety.....	13
Dieselmoottorit.....	13
Ahdetut moottorit.....	15
Ahtamattomat moottorit.....	15
Polttoainejärjestelmät.....	19
Kaasumoottorit.....	18
Ottomoottori.....	18
Kaasudieselmoottori.....	19
Kaksoispolttoainemoottori.....	21
Kaasunsyöttöjärjestelmät.....	23
Lean burn -tekniikat.....	24
Perinteinen moottorivoimalaitos.....	26
Kokonaisenergiailaitoskytkennät.....	27
Sähkö ja kaukolämpö.....	27
Sähkö ja höyry.....	28
Sähkö ja jäähdytys.....	29
Moottori ja höyryturbiini.....	30
Käyttö ja huolto.....	31
Moottorin käyttö.....	31
Moottorin huolto.....	32
Savukaasujen puhdistus.....	33
NO _x -päästöjen vähentäminen.....	34

20 Kaasuturbiinivoimalaitokset 36

Ympäristövaikutukset.....	37
Kaasuturbiinin toimintatapa.....	37
Avoin kaasuturbiiniprosessi.....	38
Suljettu kaasuturbiiniprosessi.....	38
Moniakselinen kaasuturbiini.....	40
Kaasuturbiinin pakokaasun lämmön käyttötapoja... 40	
Lämmöntalteenottokattila.....	40
Kombiprosessi.....	42
Kaasuturbiinin rakenne.....	47
Yksiakselinen kaasuturbiini.....	47
Runko.....	47

Kompressorit.....	47
Turbiini.....	49
Polttokammio.....	51
Poltin.....	53
Säädettävä laimennusilmajärjestelmä.....	54
Teho ja hyötysuhde.....	54
Polttoaineet.....	55
Kaasuturbiinin apujärjestelmät.....	55
Käynnistysjärjestelmä.....	55
Pyörityskone.....	55
Voiteluöljyjärjestelmä.....	55
Jäähdytys.....	55
Polttoilmajärjestelmät.....	56
Kompressorin pesujärjestelmä.....	56
Vaihteisto.....	57
CO ₂ -sammutin.....	58
Säätö- ja suojausjärjestelmät.....	58
ORC-turbiinit.....	60
Ylikriittinen hiilidioksidi.....	62
ORC-kiertoainepiirin rakenne.....	63
ORC-laitokset.....	65
Paineistetut voimalaitosprosessit.....	66
Kaasutuskombivoimalaitos.....	66
Paineistettu poltto.....	69
Polttokenno ja kaasuturbiini.....	71

21 Vesivoimalaitokset 72

Ympäristövaikutukset.....	73
Vesivoima Suomessa.....	73
Vesivoimalaitoksen teho.....	76
Vesiturbiinit.....	78
Pelton-turbiinit.....	79
Francis-turbiinit.....	79
Kaplan-turbiinit.....	81
Putkiturbiinit.....	82
Turbiinien rakenneosat.....	84
Radiaalilaakerit.....	84
Aksiaalilaakerit.....	84
Aksiaaliivisteet.....	84
Johtopyörät.....	85
Varolaitteet.....	85
Servomoottorit.....	85
Imuputket.....	85
Turbiinien säätö-, valvonta- ja varolaitteet.....	85
Säätäjät.....	85
Pumput.....	85
Valvonta- ja varolaitteet.....	86
Venttiilit.....	86

Luukut.....	86
Tuloputken sulkuluukut.....	86
Imuputken sulkuluukut.....	87
Tulva- ja säännöstelyluukut.....	87
Nostokoneistot.....	87
Muut sulkulaitteet.....	87
Välpät.....	87

22 Tuulivoimalaitokset 88

Ympäristövaikutukset.....	89
Tuulienergian tuotanto Suomessa.....	90
Tuulienergia Euroopassa ja muualla maailmassa... 93	
Tuuliturbiinit.....	94
Vaaka-akselinen laitos.....	95
Pystyakseliset laitteet.....	97
Tuulivoimajärjestelmät.....	98
Tuulivoimajärjestelmien perusteita.....	99
Tehokerroin.....	100
Tuulipuiston rakentaminen.....	102
Tuulivoimaprojektin vaiheet.....	102
Tuulivoiman hankekehitys.....	105
Tuulivoimalan kustannukset.....	106
Tuulivoimahankkeen kustannukset.....	106
Tuulivoiman hinnanmuodostus.....	106

23 Aurinkovoimalaitokset 108

Aurinkolämpövoimalaitokset.....	109
Aurinkosähkövoimalaitokset.....	109
PV-voimalan rakenne.....	111
Sähköntuotanto.....	114
Rajoitteet.....	116
Käyttö ja huolto.....	116

24 Energian varastointi 118

Lämmön varastointi.....	119
Porakaivolämpöakku (BTES).....	120
Kaukolämpöjärjestelmiin liitetyt vesivaraajat (CTES ja TTES).....	120
Höyryakku (SSES).....	122
Hiekka-akku (SBES).....	125
Sähkön varastointi.....	126
Sähkökemiallinen akku (BESS).....	126
Pumppuvoimalaitos (PHES/PSH).....	127
Paineilmaenergiavarasto (CAES).....	128
Nesteytetyn ilman energiavarasto (LAES).....	130
Termokemiallinen energiavarasto (TCES).....	133

25 Synteettisten hiilineutraalien polttoaineiden tuotanto 136

Synteettisten polttoaineiden tulevaisuudennäkymät.....	137
Vedyn valmistus.....	140
Höyryreformointi.....	140
Elektrolyysi.....	142
Vedyn värikoodit.....	144
Vedyn varastointi.....	144
Varastointi kaasuna.....	144
Varastointi nesteinä.....	145
Varastointi kemiallisena yhdisteenä.....	145
Varastointi metallihydrideihin.....	146
Polttokennot.....	147
Hiilidioksidin talteenotto.....	149
Absorptiomenetelmät.....	149
Kalvotekniikka.....	151
Happipolttot.....	152
Kalsiumkierto.....	153
Hiilidioksidin varastointi.....	154
Varastointi valtameriin.....	154
Varastointi maaperään.....	154
Synteettisen metaanin tuotanto.....	155
Katalyyttinen metanointi.....	155
Biologinen metanointi.....	158
Esimerkki savukaasujen hiilidioksidin talteenotosta.....	160

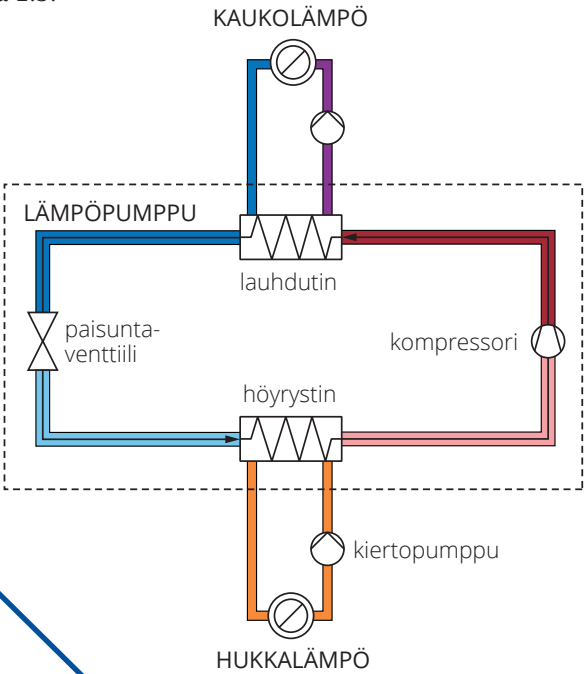
26 Energiantuotannon talous 162

Sähkönkulutuksen ja -tuotannon kehitys Suomessa.....	162
Suomen energiapolitiikka.....	164
Voimalaitoksella tuotetun energian kustannukset... 167	
Muuttuvat kustannukset.....	167
Kiinteät kustannukset.....	172
Sähköntuotannon kokonaiskustannukset ja hinnanmuodostus erillistuotannossa.....	173
Energiantuotannon optimointi sekä kysynnän ja tarjonnan tasapainotus.....	167

Kirjassa käytetyt piirrosmerkit.....	176
Kirjassa käytetyt lyhenteet.....	178
Hakemisto.....	180
Lähteet.....	182
Kuvaluettelo.....	184

Suuret lämpöpumput

Suuret kaukolämpöä tuottavat ja erilaisia matalalämpötilaisia hukkalämpöjä hyödyntävät **lämpöpumput** ovat yleistyneet Suomessa. Niillä halutaan edistää hiilineutraalia lämmöntuotantoa ja korvata fossiilisia polttoaineita polttamalla tuotettua kaukolämpöä. Lämpöpumpun pääosat ovat höyrystin, kompressor, lauhtutin ja paisuntaventtiili. **Höyrystimellä** höyrystetään kylmäaine matalassa paineessa jäähdytettävästä kohteesta saatavalla lämmöllä. **Kompressor** puristaa kylmäainehöyryn korkeaan paineeseen, jolloin se lauhtuu **lauhduttimessa** korkeassa lämpötilassa ja voi luovuttaa lauhtumislämmön lämmitettävään kohteeseen, esimerkiksi kaukolämpöveteen. Lauhtunut kylmäaine johdetaan paineenalennusventtiiliin eli **paisuntaventtiiliin** kautta höyrystimeen, minkä jälkeen kierto voi alkaa uudestaan. Lämpöpumpun periaate esitetään kuvassa 1.5.



lämpöpumpun periaate

Lämpöpumpun hyötysuhdetta kuvataan **lämpökertoimella COP** (coefficient of performance). Sil- lä tarkoitetaan lauhduttimella tuotetun lämpöte- hon suhdetta kompressorin käyttöön tarvittavaan sähkötehoon.

Lämpökerroin voidaan laskea höyrystymis- ja lauhtumislämpötilojen mukaan kaavalla

$$COP = \eta_c \cdot \frac{T_L}{T_L - T_H}$$

T_L = lauhtumislämpötila (kelvineissä)
 T_H = höyrystymislämpötila (kelvineissä)

$$COP_c = \frac{T_L}{T_L - T_H}$$

Carnot-lämpökerroin eli teoreettisesti paras lämpökerroin, joka voidaan laskea lämpöpumppuprosessin lauhtumis- ja höyrystymislämpötilojen avulla

η_c = todellisen prosessin hyötysuhde verrattuna teoreettisesti parhaan lämpö- kertoimen antavaan Carnot-prosessiin.

Esimerkiksi seuraavilla lähtötiedoilla

$$\eta_c = 0,6$$
$$T_L = 90\text{ }^{\circ}\text{C} + 273 = 363\text{ K}$$
$$T_H = 0\text{ }^{\circ}\text{C} + 273 = 273\text{ K}$$

saadaan lämpöpumpun lämpökertoimeksi

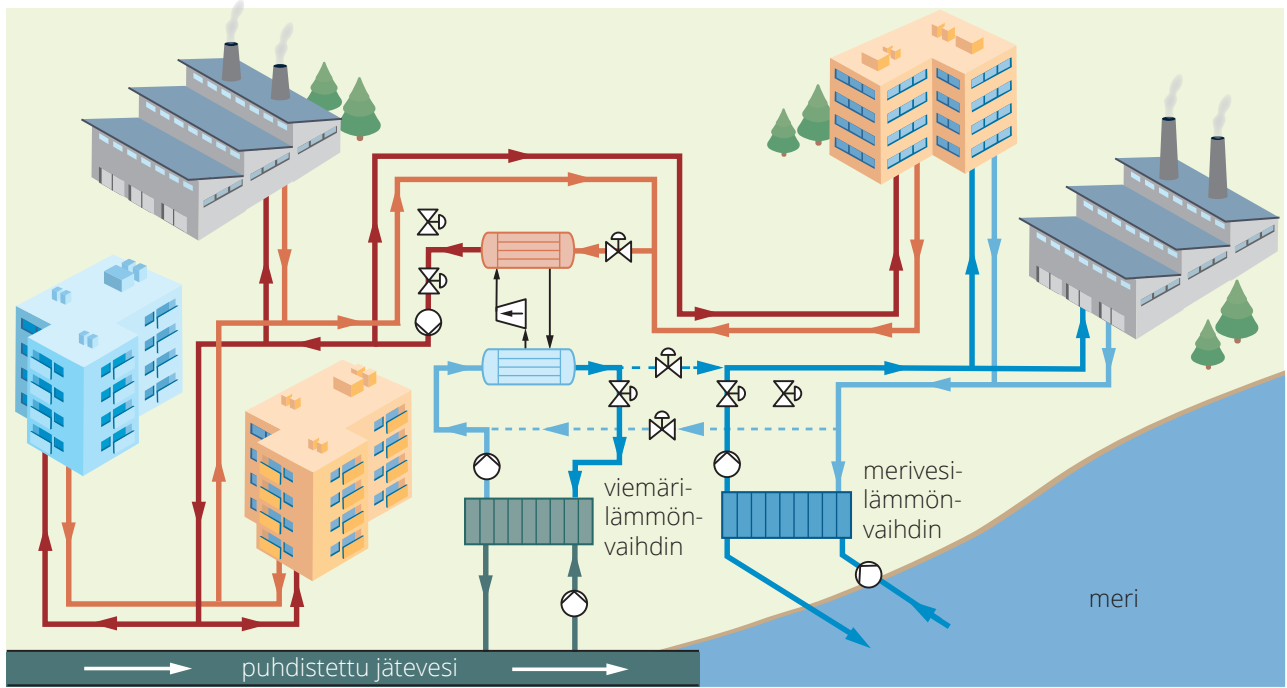
$$COP = 0,6 \cdot \frac{363}{90} = 2,5$$

Laitos tuottaa siis käyttämäänsä sähköön verrattu- na 2,5-kertaisen määrän kaukolämpöä.

Taulukko 1.1

Suomen suurimpia kaukolämpöä tuottavia lämpöpumppuja

Kaupunki	Yhtiö	Lämpöteho (jäähdytysteho)	Lämmönlähde	Lämpöpumppu- toimittaja
Akaa	Elenia Lämpö	0,6 MW (0,5 MW), koko LTO 1,7 MW	savukaasut	Johnson Control
Espoo	Fortum	2 x 20 MW (2 x 7,5 MW)	jätevesi	Friotherm
Helsinki	Helen	5 x 18 MW (5 x 12 MW)	jätevesi, kaukojäähdytysvesi	Friotherm
Riihimäki	Ekokem / HLV	2 x 4,5 MW (2 x 2 MW)	savukaasut, kaukolämmön paluuvesi	Carrier
Mäntsälä	Nivos Energia	yhteensä noin 3 MW	datakeskus	Calefa
Turku	TSE	2 x 20 MW (2 x 14 MW)	jätevesi	Friotherm



Kuva 1.6 Periaatekuva Helenin kaukolämpölämpöpumppujärjestelmästä



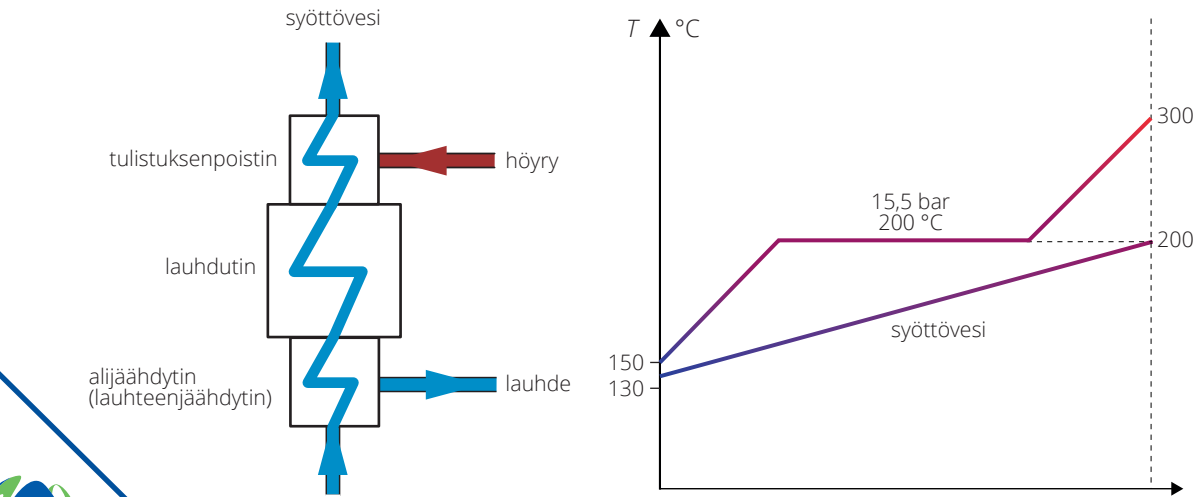
Syöttövesisäiliöllä on monta tehtävää voimalaitos-prosessissa: ensinnäkin se toimii kattilaan syötettävän veden varastona. Vesimäärä riittää tyypillisesti 10–30 minuutin kestoiseen veden kulutukseen täydellä teholla. Säiliön vedenpinnan mukaan säiliöön syötetään lisävetä lisävesisäiliöstä.

Syöttövesisäiliö liittyy myös vedenkäsittelyyn. Syöttövesisäiliön päällä olevassa kaasunpoistokuvussa syöttövedestä poistetaan veteen liuenneet, kattilassa korroosiota aiheuttavat kaasut. Tämä tapahtuu lämmittämällä syöttövesi kylläiseen lämpötilaan, jolloin kaasujen liukoisuus veteen pienenee. Samalla syöttövesisäiliö on sekoituslämmönsiirrin, jossa lämmityshöyry on suoraan kosketuksissa lämmitettävän veden kanssa.

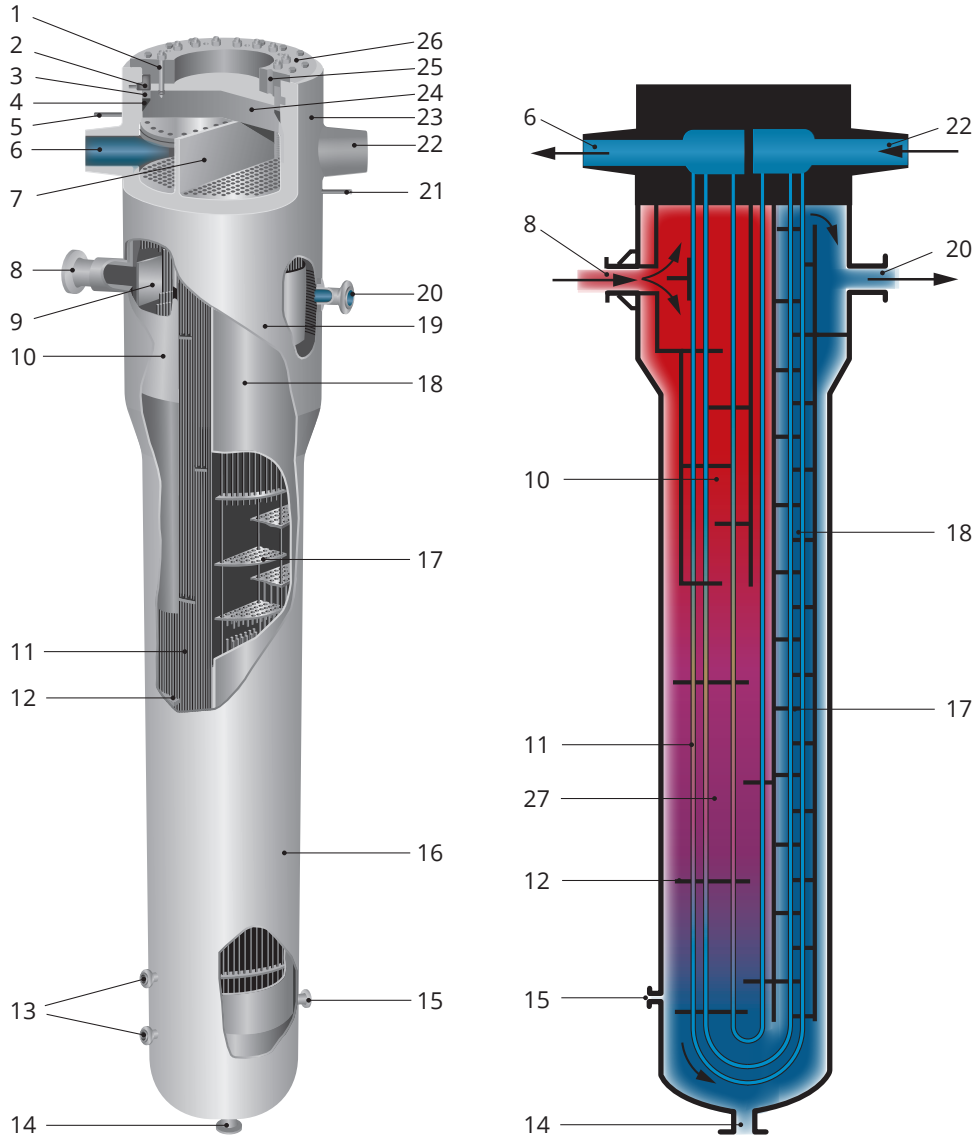
Korkeapaine-esilämmittimessä vesi virtaa putkissa, joita lämmitetään väliottohöyryllä ulkopuolelta (kuva 1.24). Esilämmitin koostuu kolmesta erityyppisestä lämmönsiirtimestä, jotka ovat 1) väliottohöyryn tulistuksenpoistin, 2) väliottohöyryn lauhdutin ja 3) lauhteenjäähdytin.

Yleensä väliottohöyry tulee korkeapaine-esilämmittimelle voimakkaasti tulistuneena. Ensimmäisessä vaiheessa tulistuksenpoistossa väliottohöyry jäähdytetään kylläiseksi höyryksi. Tulistuksenpoistossa höyrylle pyritään saamaan aikaan hyvään lämmönsiirtoon riittävä nopeus. Lauhdutinosassa höyry lauhtuu putkien pintaan ja valuu lämmönsiirtimen pohjalle. Alijäähdytinosaan vesi nousee höyrynpaineen vaikutuksesta ja poistuu yläosassa olevan yhteen kautta.

Kuvan 1.24 lämpötiladiagrammista nähdään, että korkeapaine-esilämmittimen asteisuus (lämmityshöyryn lauhtumislämpötilan ja syöttöveden loppulämpötilan välinen lämpötilaero) on hyvin lähellä nollaa. Syöttövesi siis lämpenee esilämmittimessä suurin piirtein samaan lämpötilaan kuin missä väliottohöyry lauhtuu. Kun tiedetään, mihin lämpötilaan syöttövesi halutaan lämmittää tai mihin lämpötilaan se lämpenee, tiedetään myös, mikä on lämmitykseen tarvittavan tai käytetyn väliottohöyryn paine. Höyrytaulukon (s. 234) mukaan paine, jossa vesi lauhtuu 200 °C:ssa on 15,5 baaria. Jos siis haluttu syöttöveden loppulämpötila on 200 °C, tarvittavan välioton paine on 15,5 baaria.



Kuva 1.24 Korkeapaine-esilämmittimen toiminnalliset osat ja lämpötiladiagrammi



- | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1. pinnapultti | 10. tulistuksenpoistin | 19. yläosan ulkokuori |
| 2. lukkorengas | 11. vesiputket | 20. lauhde ulos |
| 3. välirengas | 12. tukilevy | 21. ilmaus (lauhteenjäähdytin) |
| 4. tiiviste | 13. pinnankorkeuden mittausyhde | 22. syöttövesi sisään |
| 5. ilmaus (vesitila) | 14. tyhjennys | 23. vedenjakotila |
| 6. syöttövesi ulos | 15. ilmaus (lauhdutinosassa) | 24. kansi |
| 7. väliseinä (vesitila) | 16. ulkokuori | 25. kierteistetty reikä |
| 8. höyry sisään | 17. virtauksen ohjainlevy | 26. kiristyslevy |
| 9. suojailevy pisaroiden varalle | 18. lauhteenjäähdytin | 27. lauhdutin |

Kuva 1.25 Pystymallinen korkeapaine-esilämmitin

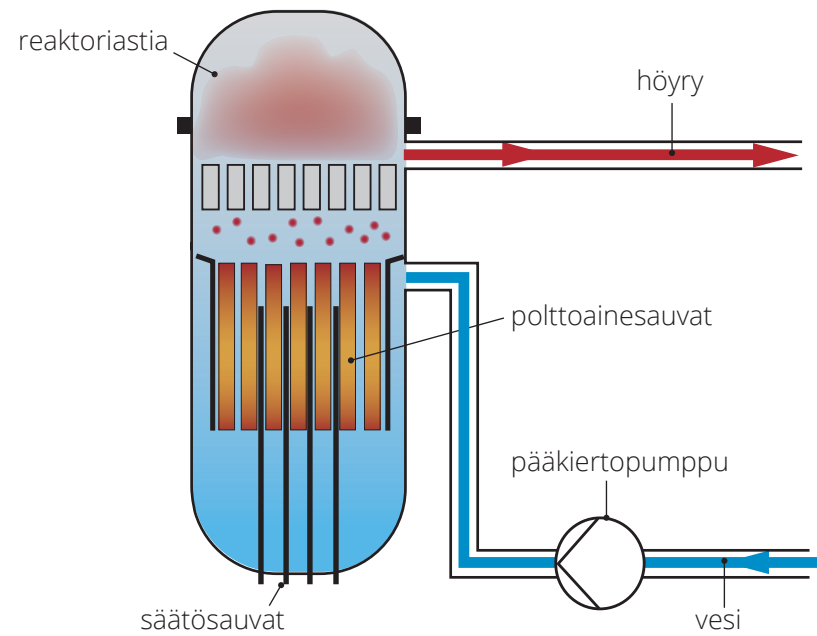


OPETUSHALLITUS
UTBILDNINGSTYRELSEN

Kiehutusvesireaktori

Kiehutusvesireaktorissa eli BWR-reaktorissa (boiling water reactor) turbiineihin menevä höyry syntyy suoraan paineastiassa eikä erillisissä höyrystimissä, kuten edellä esitellyssä painevesireaktorissa. Kiehutusvesireaktori toimii eräänlaisena kierrätyskattilana, jonka höyrynerottimet ja höyrynkuiwait sijaitsevat reaktoripaineastian sisällä. Veden virtaus reaktorisydämen läpi saadaan aikaan pääkiertopumpuilla, jotka sijaitsevat joko paineastian sisä- tai ulkopuolella.

Sydänmateriaali on periaatteessa samanlaista kuin painevesireaktorissa. Reaktorin säädössä käytetään sekä säätösauvoja että primääripiirin pumpujen virtausta. Kiehutusvesireaktorin sydän ei ole yhtä pienikokoinen kuin painevesireaktorin sydän, vaan se tarvitsee väljemmän rakenteensa ja höyryn kuivatuslaitteidensa takia suhteessa suuremman paineastian. Koska käyttöpaine on kuitenkin pienempi, paineastiassa voi olla ohuempia seinät. Primääripiirien repeämästä aiheutuvien seurauksien hallitsemiseksi on otettu käyttöön erikoistyyppinen paineenalennussuojarakennus, joka on yhdistetty hätälauhduttimena toimivaan vesialtaaseen.

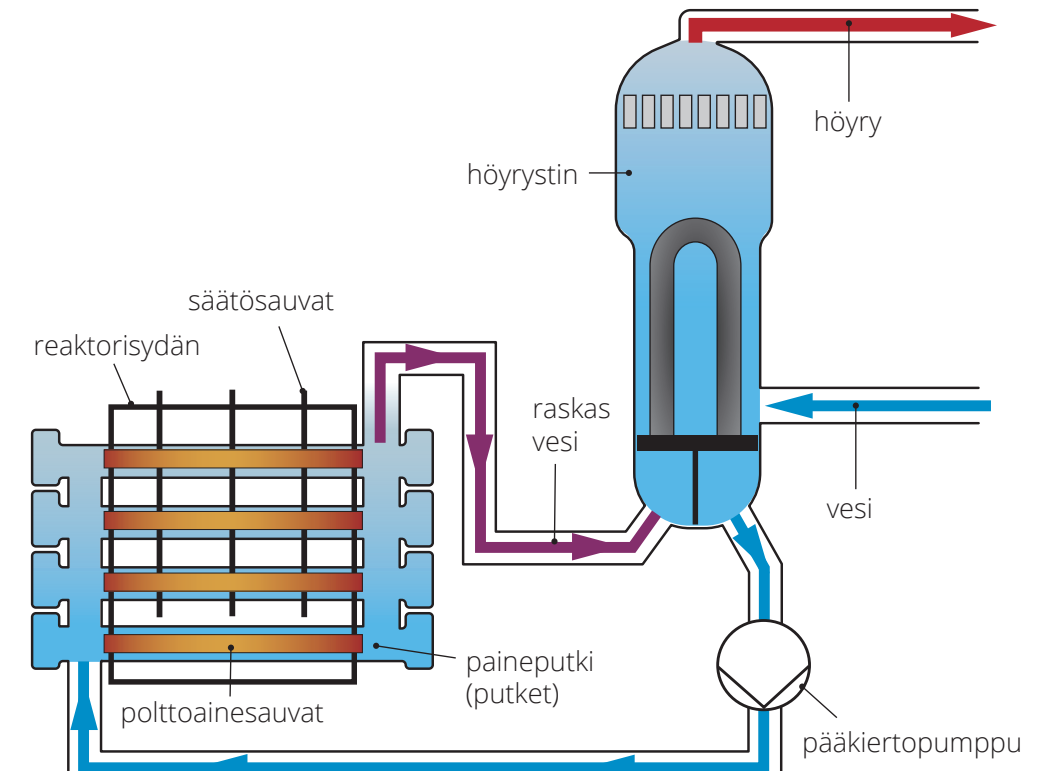


Kuva 4.5 Kiehutusvesireaktorin periaate

CANDU-reaktori

CANDU-reaktori (Canadian deuterium uranium reactor) on nykyisin paine- ja kiehutusvesireaktorin ohella yleisin kaupallisella pohjalla toimiva ydinreaktori. Se on ainut laajassa käytössä oleva kaupallinen raskasvesireaktori. Polttoaineena käytetään luonnonuraa, joka uraanioksidin muodossa on suljettuna zirkoniumseoksesta tehtyyn kuoreen. Suhteellisen lyhyet polttoaineputket koostuvat 28 polttoainesauvasta, ja ne ladataan vaakasuorassa oleviin zirkoniumputkiin, jotka kulkevat suuren raskasvesihidasteella täytetyn putkisäiliön

läpi. Raskasta vettä käytetään myös jäähdytteenä korkean paineen alaisena. Kun polttoaine on sydämessä paineputkissa, ei suurta teräspaineastiaa tarvita. Kauko-ohjatuilla koneilla suoritetaan sydämen lataus käytön aikana. Säätösauvat sijaitsevat hidastimessa ja lävistävät putkisäiliön yläosan. Putkisäiliön alla oleva raskasvesihidasteinen pikatyhjennyskäiliö toimii pikasammutuksen lisämenetelmänä. Reaktorissa on betoninen suojarakennus, ja tavallisuudesta poikkeavana turvallisuuspiirteenä on tyhjäkännus, johon imetään reaktorirakennukseen vapautunut höyry.



Kuva 4.6 CANDU-reaktorin periaate



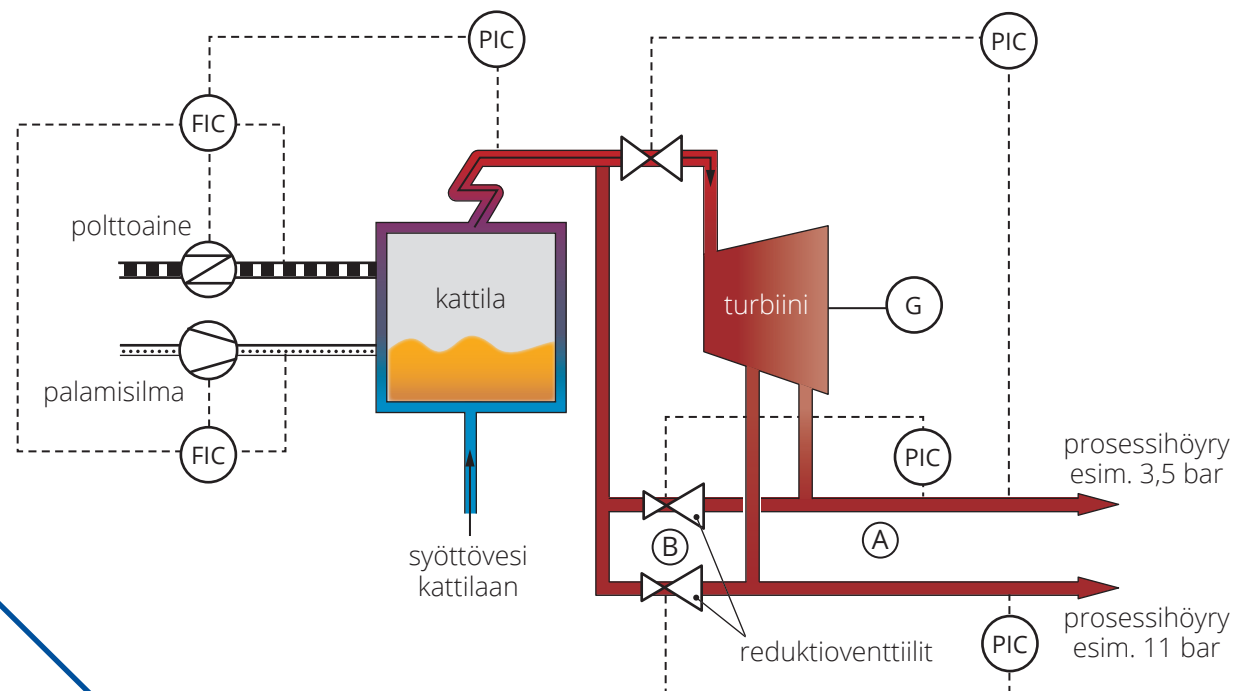
OPETUSHALLITUS
UTBILDNINGSTYRELSEN

Vastapainehöyryn tuotannon säädöt

Vastapainehöyryä tuottavan CHP-laitoksen pääasiallinen tuote on vastapainehöyry tehdasprosessin tarpeisiin, esimerkiksi paperikoneen kuivatushöyryksi. Yleensä kattilan tehoa säädetään tuorehöyryn paineen perusteella, kiinteän paineen säädöllä. Prosessihöyryn paineen muutoksia hallitaan ensisijaisesti vastapainehöyryn säädöllä, höyryturbiinin säätöventtiilin avulla. Paineen vaihtelu vaikuttaa

turbiinin sähkötehoon. Usein sähkötehoa ei säädetä lainkaan, tai se tapahtuu kattilan tehonsäädön kautta.

Normaalisti (esimerkiksi 3,5 baarin paineessa) prosessihöyry (A) saadaan turbiinin vastapainehöyrystä tai väliotosta (kuva 7.5). Mikäli vastapainehöyryn paine putoaa liikaa tai turbiini ei ole käytössä, tuotetaan höyryä suoraan tuorehöyrylinjasta reduktioventtiilin (B) avulla.



Kuva 7.5 Prosessihöyryä ja sähköä tuottavan laitoksen höyrynpaineen säädöt

Kaukolämmön tuotannon säädöt

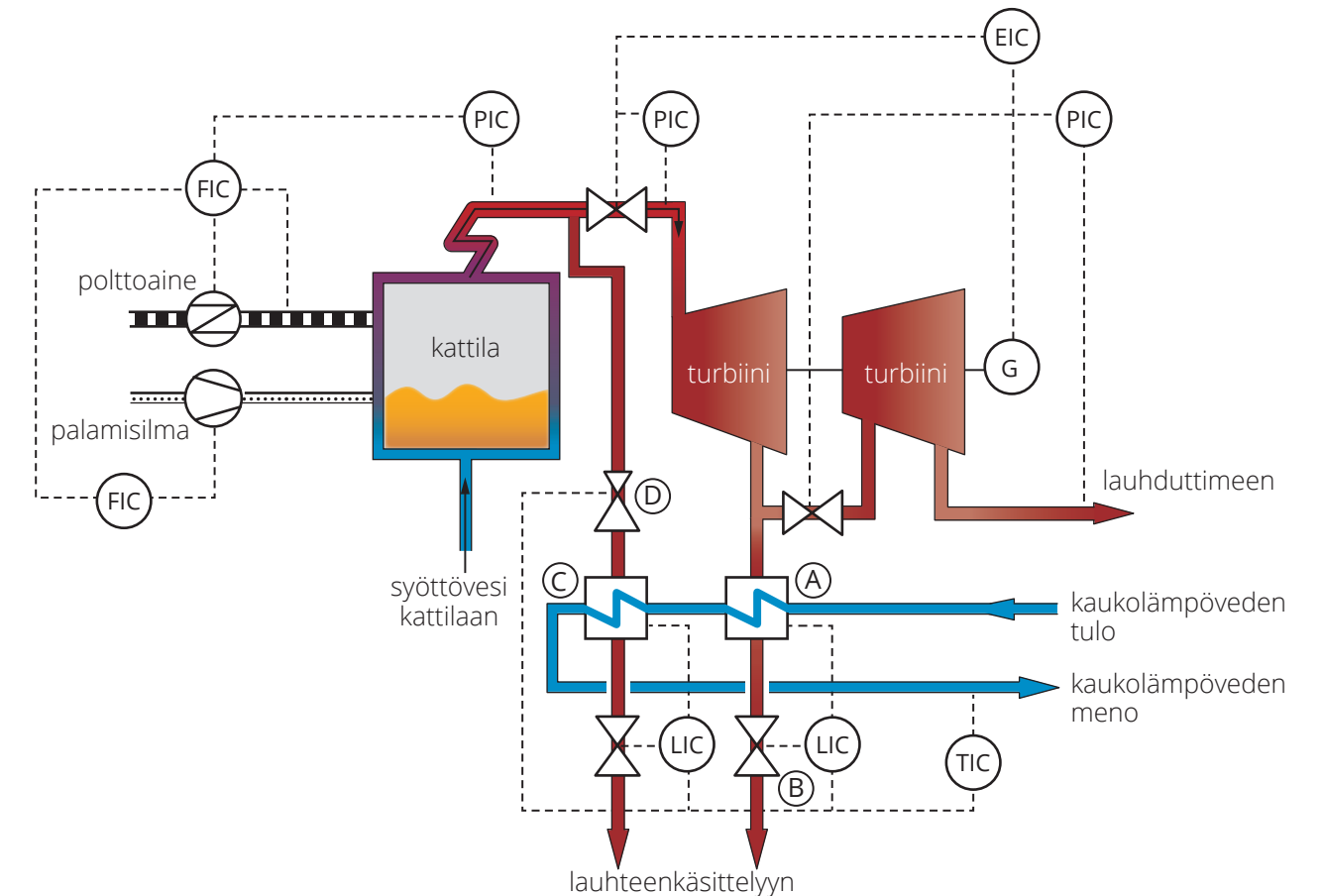
Kaukolämpöä tuottaessa pyritään pitämään laitokselta lähtevän kaukolämpöveden lämpötila vakiona ja halutun suuruisena. Kaukolämmönvaihtimissa (A) höyry lauhtuu vedeksi (kuva 7.6). Lämpötilaa säädetään yleensä kaukolämmönvaihtimien pinnankorkeuden perusteella. Pinnankorkeuden nosto pienentää lämmönsiirtimen pinta-alaa ja lämmönsiirron tehoa. Pinnankorkeutta säädetään säätöventtiilin (B), lauhdepumppujen tai molempien avulla.

Vaihtimen pinnankorkeus vaikuttaa myös turbiinin paineeseen ja sitä kautta sähkötehoon.

Matalapaineturbiinin säätöventtiilillä säädetään sähkötehoa ja/tai lauhduttimen painetta. Kiinteän paineen säädöllä oleva höyrykattila tai kaasuturbiini pyrkii pitämään höyrylinjan paineen vakiona.

Höyrykattilan tai kaasuturbiinin tehoa voidaan myös ohjata kaukolämpömenoveden mukaan. Kaukolämmönvaihtimeen (C) tuodaan höyryä turbiinin väliotosta. Usein käytännössä kaukolämmönvaihtimia on useita, ja kaukolämmön tuottamiseen käytetään myös turbiinin jälkeistä vastapainehöyryä.

Mikäli kaukolämmön kulutus on suurta tai turbiini on poissa käytöstä, ohjataan tuorehöyryä reduktioventtiilin (D) avulla kaukolämmönvaihtimeen (C).



Kuva 7.6 Kaukolämmön tehonsäätö



OPETUSHALLITUS
UTBILDNINGSTYRELSEN

Polttoaineiden käsittely

Puu- ja turvepolttoaineiden käsittely

Yleensä puuta (esimerkiksi metsätähdehaketta) polttoaineena käyttävän voimalaitoksen **polttoaineenkäsittelyjärjestelmä** on suunniteltu alun perin jyrshinturpeen käsittelyyn, mutta se soveltuu hyvin myös hakkeen käsittelyyn. Järjestelmä koostuu

- vastaanottoasemasta
- kuljettimista
- välivarastosiiloista
- kattilalaitoksen polttoainesiloista
- polttoaineen syöttölaitteista.

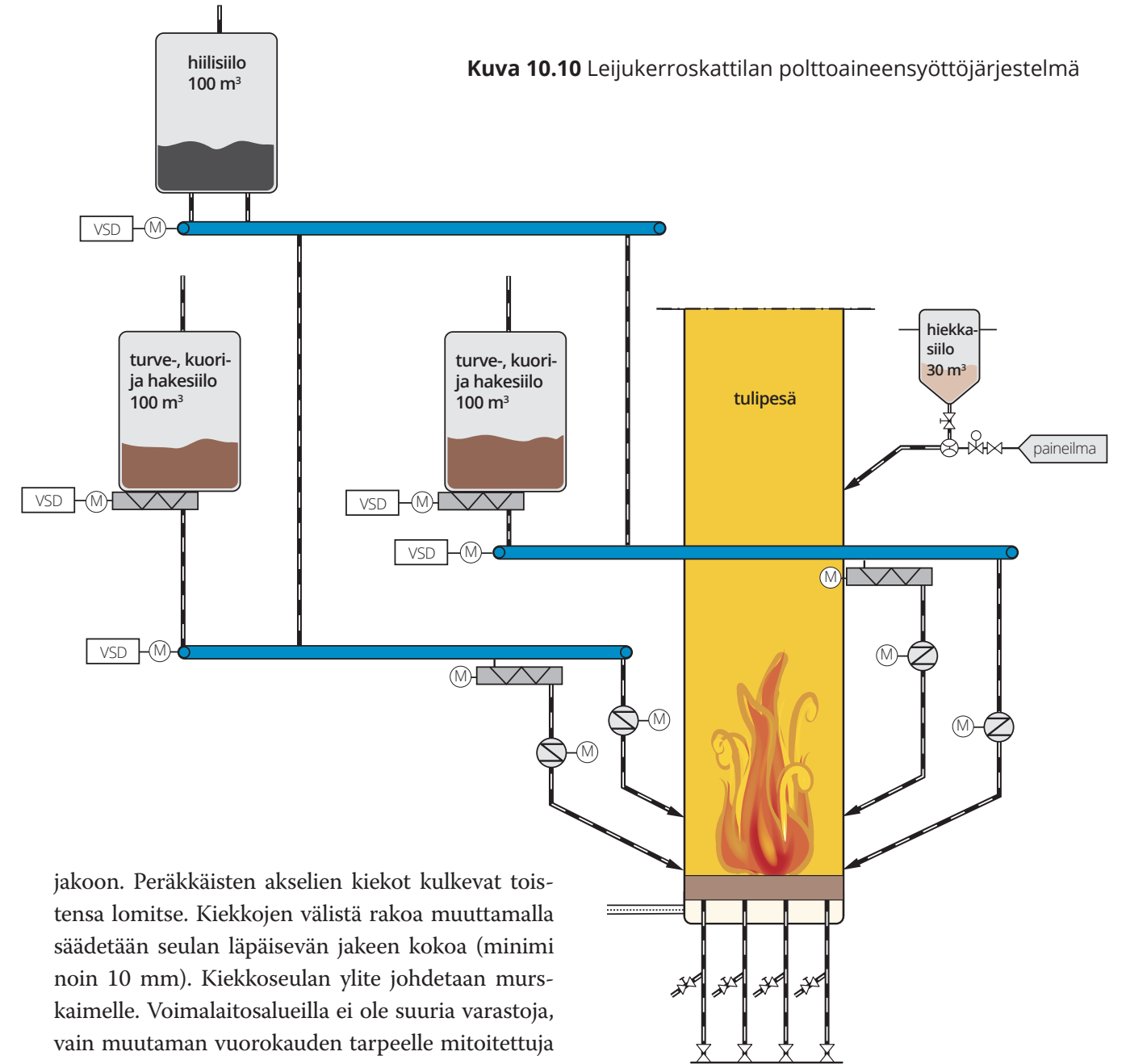
Nykyään yleisesti käytetyissä leijukerroskattiloissa voidaan polttaa kostea polttoainetta, joten kuivaimia ei tarvita.

Polttoaine kuljetetaan voimalaitoksille yleensä täysperävaunullisilla autoilla, jonkin verran myös rautateitse. Polttoaine puretaan suoraan

särmiön muotoiseen betoniseen maakuoppaan eli vastaanottotaskuun. Taskut voidaan varustaa harvalla (esimerkiksi 250 x 400 mm) ritilällä, joka estää kantojen ja jäätyneiden lohcareiden pääsyn kuljettimelle. Kiinteän ritilän paikalla voi olla myös tiheäilmäinen täryritilä, josta ylite eli isokokoinen seulan läpäisemätön polttoaine johdetaan suoraan murskaimeen. Yleensä vastaanottoasemat ovat katettuja, jotta purkuaikana syntyvä pöly ei leviäisi ympäristöön. Vastaanottotaskun pohjalta polttoaine puretaan hihnakuljettimelle esimerkiksi

- kiinteällä tai liikkuvalla ruuvikuljettimella
- hydraulisilla kolatyypisillä tankopurkaimilla, jotka liikkuvat edestakaisin eri tahtiin
- ketjukolapurkaimilla.

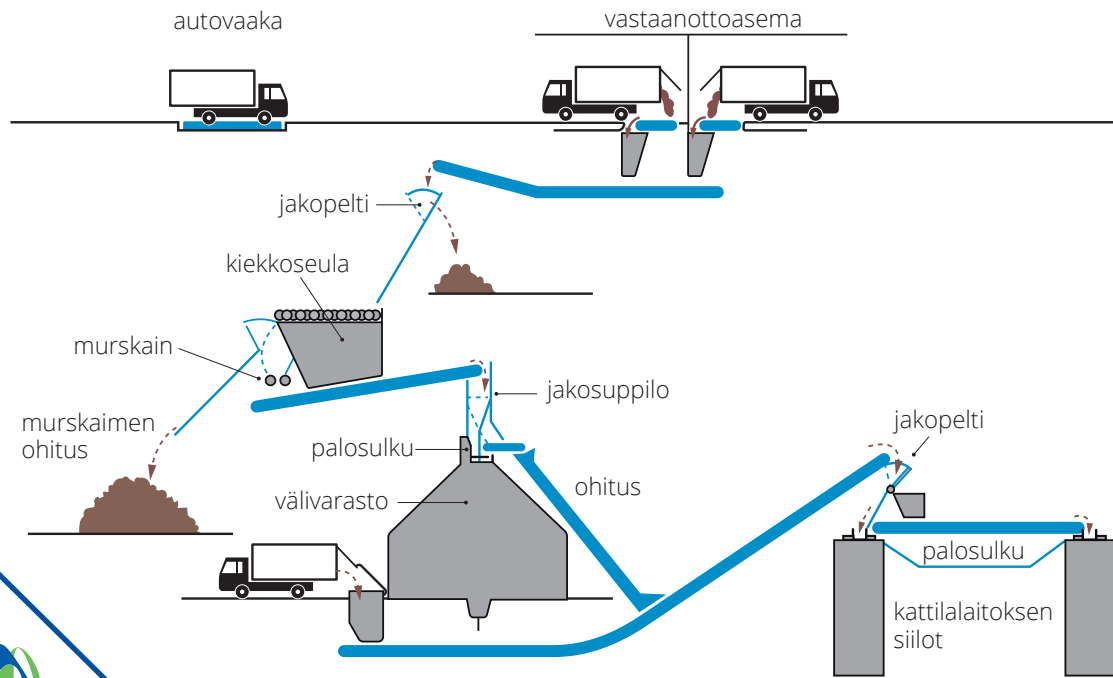
Hihnakuljettimet kuljettavat polttoaineen magneettierottimen kautta kiekkoseulalle, jossa peräkkäisille akselille on asetettu kiekkoja haluttuun



Kuva 10.10 Leijukerroskattilan polttoaineensyöttöjärjestelmä

jakoon. Peräkkäisten akselien kiekot kulkevat toistensa lomitse. Kiekkojen välistä rakoa muuttamalla säädetään seulan läpäisevän jakeen kokoa (minimi noin 10 mm). Kiekkoseulan ylite johdetaan murskaimelle. Voimalaitosalueilla ei ole suuria varastoja, vain muutaman vuorokauden tarpeelle mitoitettuja noin 2 500–5 000 kuutiometrin kokoisia välivarastoja. Polttoainehuolto perustuu siihen, että laitoksille tuodaan polttoainetta lähes jatkuvasti muualla sijaitsevilta varastoalueilta. Kattilahuoneessa sijaitsevista siiloista syötetään polttoainetta siilojen alla olevien ruuvisyöttimien avulla kattilaan johtaviin pudotusputkiin, jotka on varustettu sulkusyöttimillä. Isois-

sa kattilalaitoksissa tarvitaan useita pudotusputkia, jotta varmistetaan polttoaineen jakaantuminen tasaisesti leijukerrokseen. Sulkusyöttimet estävät kuumien tulipesän savukaasujen pääsyn polttoaineen syöttösiiloihin. Kattilan polttotehoa voidaan säätää ruuvien pyörimisnopeutta muuttamalla.



suun voimalaitoksen polttoaineenkäsittelylinja vastaanotosta kattilalaitoksen siiloihin



OPETUSHALLITUS
UTBILDNINGSTYRELSEN

12 Kattiloiden rakenteet ja toimintaperiaatteet

Markku Huhtinen

Kattiloiden vesihöyrypiirit

Höyrykattilat jaetaan vesihöyrypiirin rakenteen mukaan suurvesitila- ja vesiputkikattiloihin. **Suurvesitilakattilassa** savukaasut kulkevat ensin tulitorvessa ja sen jälkeen seuraavissa tuliputkissa, ja vesi höyrystyy tuliputkien ulkopuolella. Tällaisia kattiloita käytetään lähinnä teollisuudessa matalapaineisen prosessihöyryn tuotantoon. **Vesiputkikattilassa** vesi höyrystyy putkissa. Voimalaitoskattilat ovat vesiputkikattiloita, sillä niiden rakenne sopii suurvesitilakattiloita paremmin korkeammille paineille.

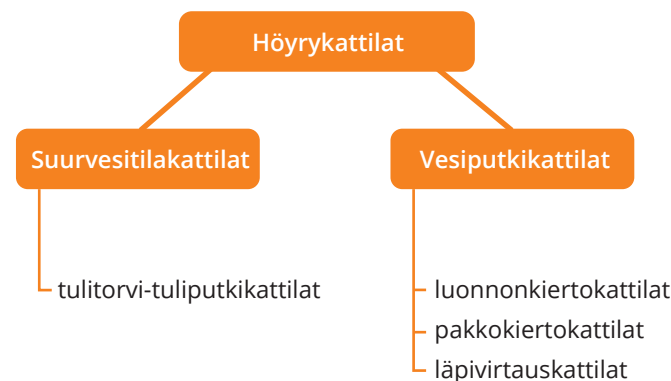
Voimalaitosprosessien vesiputkikattilat voidaan vedenkierron mukaan jakaa luonnonkierto-, pakkokierto- ja läpivirtauskattiloihin. Luonnonkiertokattilassa vesi ja höyry liikkuvat tulipesää

ympäröivässä putkistossa veden ja höyryn välisen tiheyseron vaikutuksesta. Pakko- ja läpivirtauskattiloissa vesi ja höyry kiertävät pumpun muodostaman paineen vaikutuksesta.

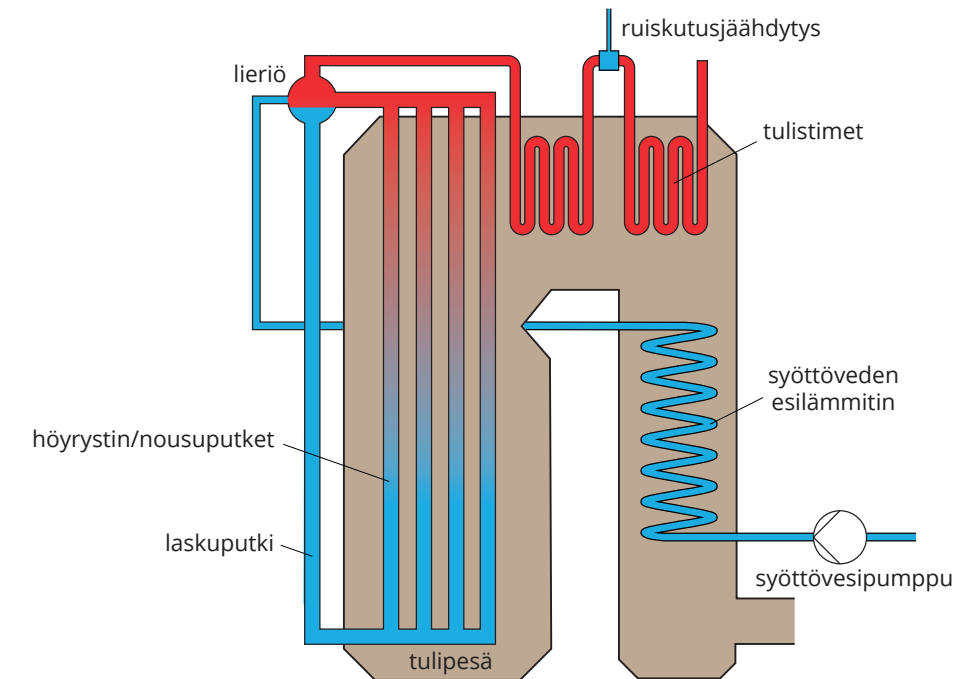
Luonnonkiertokattilat

Luonnonkiertokattilan periaatteellinen kytkentäkaavio esitetään kuvassa 12.2. Vesihöyrypiirin keskeiset komponentit ovat veden esilämmitin, lieriö, höyrystin ja tulistin.

Syöttövesi tuodaan kattilaan syöttövesisäiliöstä syöttövesipumpun avulla. Ensin vesi johdetaan savukaasulämmitteeseen syöttöveden esilämmittimeen ja



Kuva 12.1 Höyrykattiloiden vesihöyrypiiriratkaisut



Kuva 12.2 Luonnonkiertokattilan vesihöyrypiiri

lämmitetään lähelle kylläistä lämpötilaa. Esilämmittimen avulla savukaasujen lämpötilaa saadaan laskettua ja kattilan hyötysuhdetta voidaan näin parantaa.

Esilämmittimestä lämmennyt syöttövesi johdetaan lieriöön ja sieltä laskuputkia pitkin tulipesää ympäröivien höyrystinputkien alapäähän. Putkissa osa vedestä höyrystyy. Höyrystinputkista kylläisen veden ja vesihöyryn seos palaa takaisin lieriöön, jossa muodostunut höyry ja vesi erotetaan toisistaan. Höyry nousee lieriön yläosaan ja virtaa sieltä tulistimeen. Höyrystymättä jäänyt vesi sekoittuu lieriöön syötettävään uuteen syöttövedeen ja virtaa laskuputkia pitkin höyrystinputkiin.

Luonnonkiertokattilassa veden ja vesihöyryn kierto lieriön ja höyrystimen välillä perustuu veden ja höyryn tiheyseroon. Lieriöstä lähtevä vedenlaskuputki ja tulipesää ympäröivä höyrystinputkisto

muodostavat yhtenäisen putkiston. Höyrystinputkistossa osa vedestä höyrystyy tulipesässä vapautuvan lämmön vaikutuksesta. Tällöin muodostuvan veden ja vesihöyryn seoksen tiheys on pienempi kuin laskuputkessa olevan kylläisen veden, eli tiheyseroihin perustuen höyrystinputkessa oleva veden ja höyryn seos kevyempänä nousee ylöspäin ja virtaa takaisin lieriöön, josta laskuputkea pitkin tilalle virtaa tiheämpää kylläistä vettä.

Kattilan höyrystimen laskuputkessa olevan veden sekä höyrystinputkissa olevan veden ja vesihöyryn seoksen välisellä tiheyserolla aikaansaatavalla paine-erolla on voitettava painehäviö, joka aiheutuu veden ja vesihöyryn kierrosta. Painehäviö koostuu putkiston kitkavastuksista ja virtausnopeuden muutoksen vaatimasta dynaamisen paineen lisäyksestä.



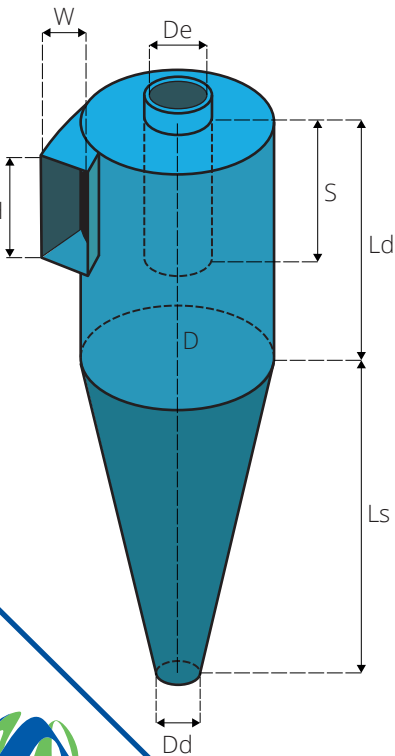
OPETUSHALLITUS
UTBILDNINGSTYRELSEN

Dynaamiset erottimet

Dynaamisten erottimien toiminta perustuu massa-vaikutukseen. Rakenteeltaan näitä erotintyyppejä on useita erilaisia. Niitä ovat muun muassa sykloni, laskeutumiskammio, keskipakoerotin ja pölyristikko.

Yleisin dynaaminen erotin on **sykloni**. Pölypitoinen kaasu johdetaan sykloniin tangentialisesti tai aksiaalisesti. Johtosiipien avulla saadaan kaasulle spiraalin muotoinen liikerata kohti syklonin pohjaa, jolloin pölyhiukkaset sinkoutuvat massavaikutuksen johdosta syklonin seinää vasten ja valuvat pohjalla olevaan poistoaukkoon. Puhdistunut ilma imetään pois syklonin keskeltä.

Syklonin erotusasteeseen vaikuttavat hiukkas-koko, kaasun nopeus, viskositeetti sekä syklonin geometria. Savukaasuvirran sisääntulonopeus riippuu sisääntuloaukon koosta. Yleensä sisääntulonopeus on 15–20 m/s, tai jonkin verran hitaampi, jos pöly on kuluttavaa. Suuri savukaasuvirta kannattaa jakaa useaan pieneen sykloniin rakentamalla monta rinnakkaissyklonia eli **multisykloni**. Tällöin syklonin halkaisija pienenee, F_n eli keskipakovoima kasvaa ($F_n = mv^2/r$) ja erotusaste paranee. Syklonin mittasuhteet esitetään kuvassa 13.2.



		Syklonityyppi		
		Korkea erotusaste	Tavallinen	Suurläpivirtaus
syklonin halkaisija	D/D	1,0	1,0	1,0
kaasun sisäänvirtausaukon korkeus	H/D	0,44	0,5	0,8
kaasun sisäänvirtausaukon leveys	W/D	0,21	0,25	0,35
kaasun ulosvirtausputken halkaisija	De/D	0,4	0,5	0,75
syklonin sisällä olevan kaasun ulosvirtausputken pituus	S/D	0,5	0,6	0,85
syklonin sylinteriosan pituus	Ld/D	1,4	1,75	1,7
syklonin kartio-osan pituus	Ls/D	2,5	2,0	2,0
pölynpoistoputken halkaisija	Dd/D	0,4	0,4	0,4

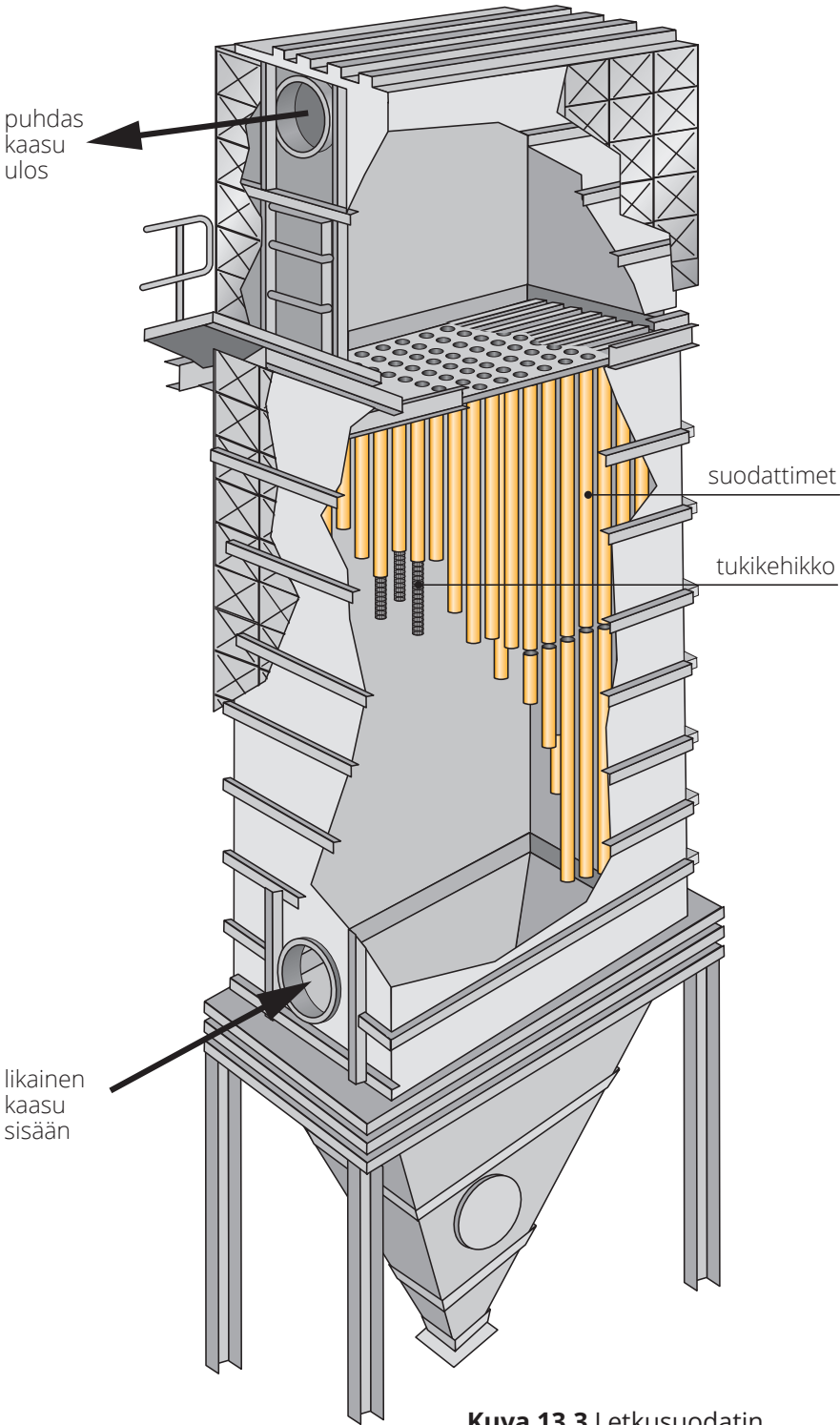
(Swift, 1969)

Kangassuodattimet

Kangassuodattimessa pölypitoiset savukaasut puhdistetaan johtamalla ne kankaan läpi. Suodatinkankaat ovat luonnonkuitua, mineraalikuitua tai synteettistä kuitua. Nykyään kangaslaadut ovat kehittyneet niin paljon, että niillä pystytään suodattamaan jopa 200–250 °C:n lämpöisiä kaasuja, mikä vähentää kaasujen jäähdytystarvetta.

Yleisin kangassuodatin on **letkusuodatin** (kuva 13.3). Se on toisesta päästään avoin kangaspussi. Pölypitoisen savukaasu johdetaan kankaan läpi, ja pöly erottuu savukaasuista kerrostuen letkun pinnalle. Kankaalle kerrostunut pöly parantaa osaltaan suodattimen erotusastetta. Letkusuodattimien erotusaste on hyvä ja painehäviö on suodatinkankaasta ja kuormituksesta riippuen 500–1 500 Pa. Suodatinkankaalle kertynyt pöly poistetaan joko mekaanisesti ravistamalla, paineilmasysäyksellä tai ultraäänien avulla. Lisäksi kankaan voi puhdistaa huuhtelemalla sen puhtaalla ilmalla, joka virtaa päinvastaiseen suuntaan kuin puhdistettava kaasu.

Ilmansuojelulainsäädännön tiukentumisen myötä letkusuodattimia on alettu käyttää muun muassa puolikuivassa rikinpoistomenetelmässä suodattamaan rikinpoistolaitteistosta lähteviä savukaasuja. Käytännön tulokset ovat osoittaneet, että letkusuodatin soveltuu tähän erinomaisesti. Rikinpoiston jälkeen savukaasut sisältävät jonkin verran reagoimatonta kalkkia. Se kertyy letkun pinnalle ja muodostaa aktiivisen kerroksen, jossa tapahtuu savukaasujen sisältämän rikkidioksidin jälkiabsorptio.



Kuva 13.3 Letkusuodatin

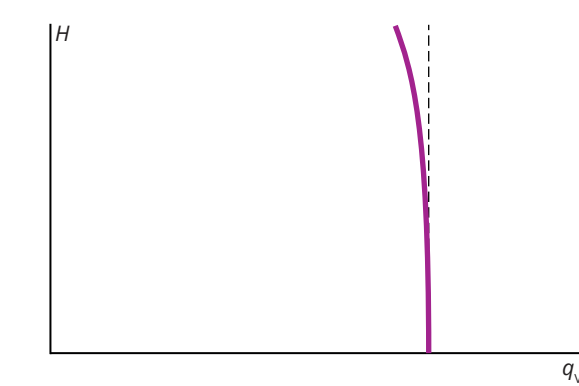
Syrjäytyspumput

Syrjäytyspumput toimivat siten, että syrjäytyselin syrjäyttää pesässä olevan nesteen paineenalaisen poistoputkeen. Tilavuusvirta (q_v) säilyy lähes vakiona nostokorkeudesta (H) eli paineesta riippumatta.

Syrjäytyspumppuja ovat

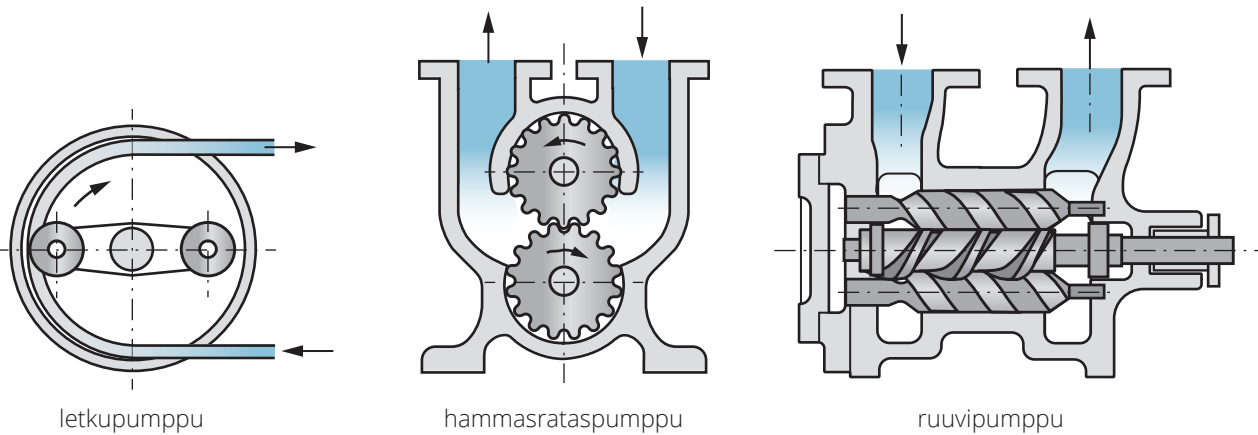
- mäntäpumput
- kalvopumput
- siipipumput
- letkupumput
- ruuvipumput
- hammasrataspumput.

Koska syrjäytyspumput tuottama tilavuusvirta on lähes riippumaton vastapaineesta, soveltuvat pumput hyvin kohteisiin, joissa nestevirran määrä halutaan pitää vakiona vastapaineesta riippumatta.



Kuva 14.4 Syrjäytyspumput q_vH -kuvaaja

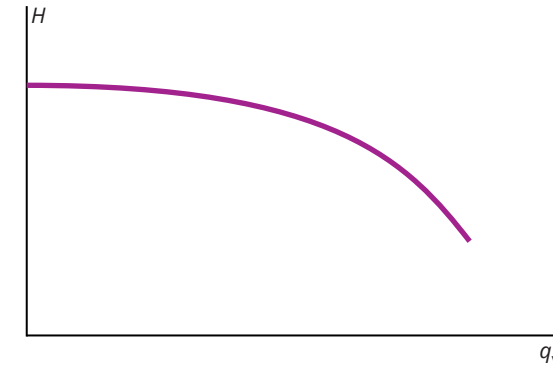
Pumput on hyvä varustaa painepuolelta imupuolelle nestettä päästävällä ylivirtausventtiilillä, koska pumppujen akselien tiivisteet saattavat rikkoutua, jos pumput käyvät suljettua venttiiliä vasten.



Kuva 14.3 Syrjäytyspumppuja

Dynaamiset pumput

Dynaamiset pumput toimivat siten, että mekaaninen energia tai liike-energia muutetaan liike- ja paine-energiaksi. Pumpun nostokorkeus (H) alenee tilavuusvirran (q_v) kasvaessa.

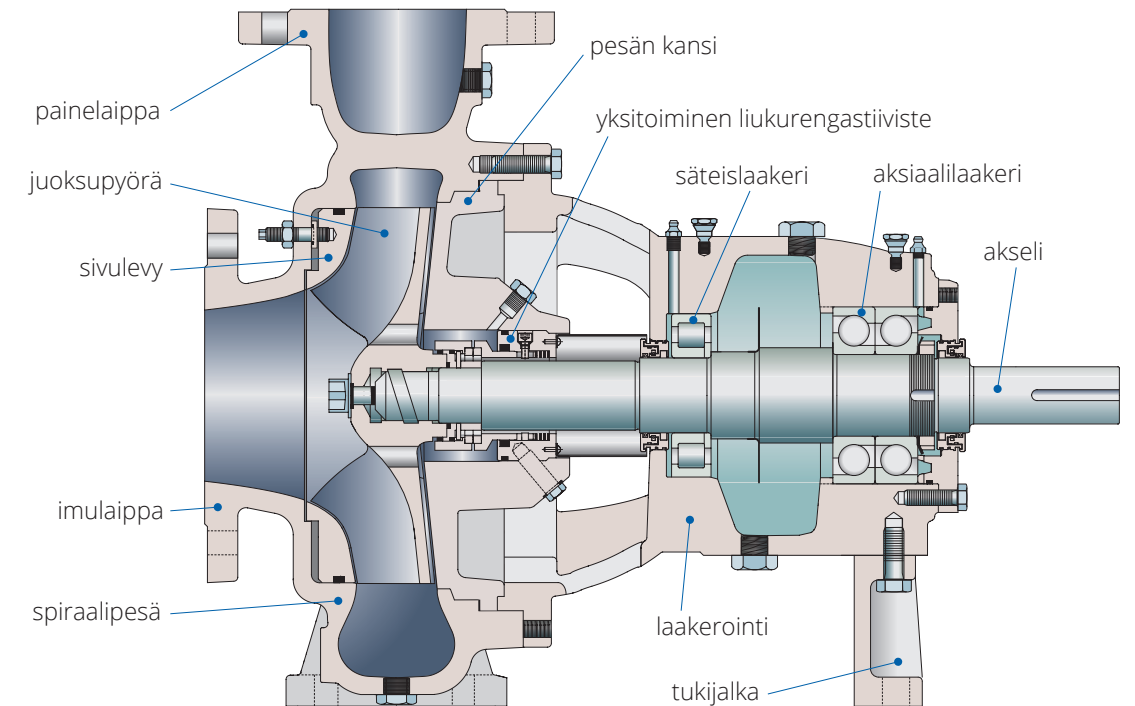


Kuva 14.5 Dynaamisen pumpun q_vH -kuvaaja

Keskipakopumput

Valtaosa nesteiden siirrosta tapahtuu **keskipakopumpuilla**. Ne sopivat toiminta-alueensa (tilavuusvirta, nostokorkeus) ansiosta mitä moninaisimpiin käyttökohteisiin.

Akseli välittää tehon kytkimestä juoksupyörään eli siipipyörään. Pumpun toimiessa pyörä antaa nestelle kehän tangentin suuntaisen nopeuskomponentin, ja neste saa keskipakovoiman vaikutuksesta pyörässä tietyn paineenlisän. Sen ansiosta neste voi tunkeutua paineputkeen voittaen korkeuseron, virtausvastukset ja vastassa olevan paineen. Kun neste poistuu juoksupyörän kehältä, pyörän keskusta virtaa uutta nestettä imujohdon alkupäässä vallitsevan paineen, esimerkiksi ilmakehän paineen, vaikutuksesta. Näin syntyy jatkuva virtaus pumpun läpi.



Kuva 14.6 Keskipakopumpun rakenne (Sulzer)



OPETUSHALLITUS
UTBILDNINGSTYRELSEN

Vesivoimalaitoksen teho

Vesivoimalaitoksen teho (P) watteina voidaan laskea kaavalla

$$P = q_v H \rho g \eta$$

q_v = putouksessa virtaavan veden määrä, m³/s
 H = kokonaisputouskorkeus metreinä
 ρ = veden tiheys, kg/m³ (noin 1 000 kg/m³)
 g = painovoiman kiihtyvyys, m/s² (noin 9,81 m/s²)
 η = turbiinin hyötysuhde

Kokonaisputouskorkeus lasketaan kaavalla

$$H = H_1 + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g}$$

H_1 = ylä- ja alaveden pintojen korkeusero metreinä
 v_1 = turbiiniin virtaavan veden nopeus, m/s
 v_2 = turbiinista poistuvan veden virtausnopeus, m/s

Laskuesimerkki

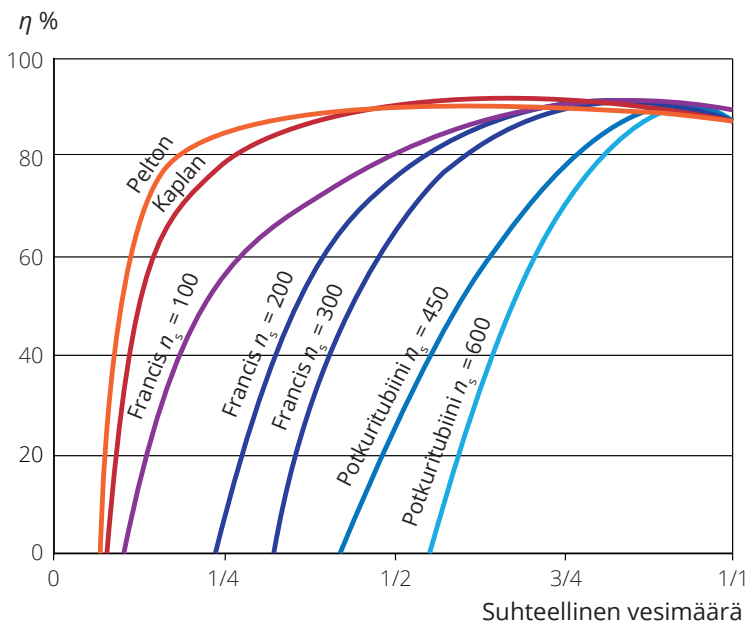
Lasketaan vesivoimalaitoksen teho seuraavilla arvoilla:

$q_v = 100 \text{ m}^3/\text{s}$
 $H = 20 \text{ m}$
 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
 $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
 $\eta = 90 \%$

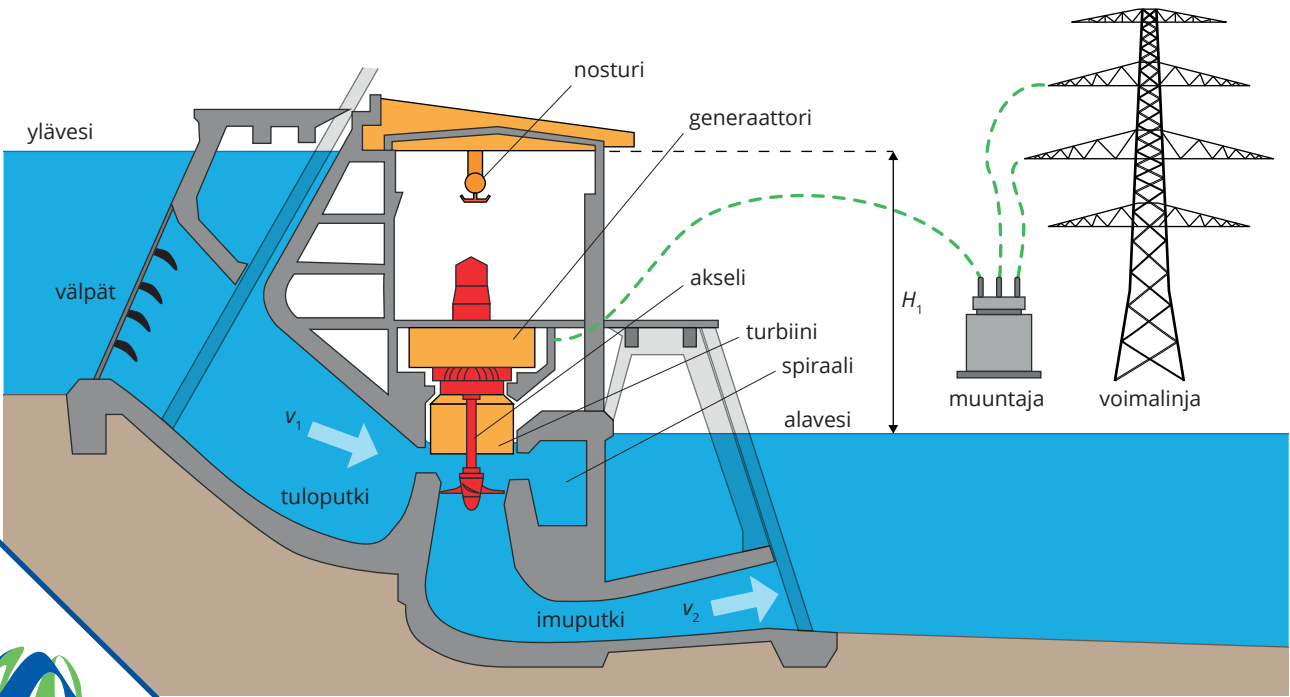
$$P = 100 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 20 \text{ m} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,9$$

$$= 17\,658\,000 \text{ W.}$$

Laitoksen teho on siis noin 17,7 MW.



Kuva 21.5 Vesiturbiinien hyötysuhde turbiinin mitoitusvirtaaman osittaisilla määrillä



vesivoimalaitoksen periaate

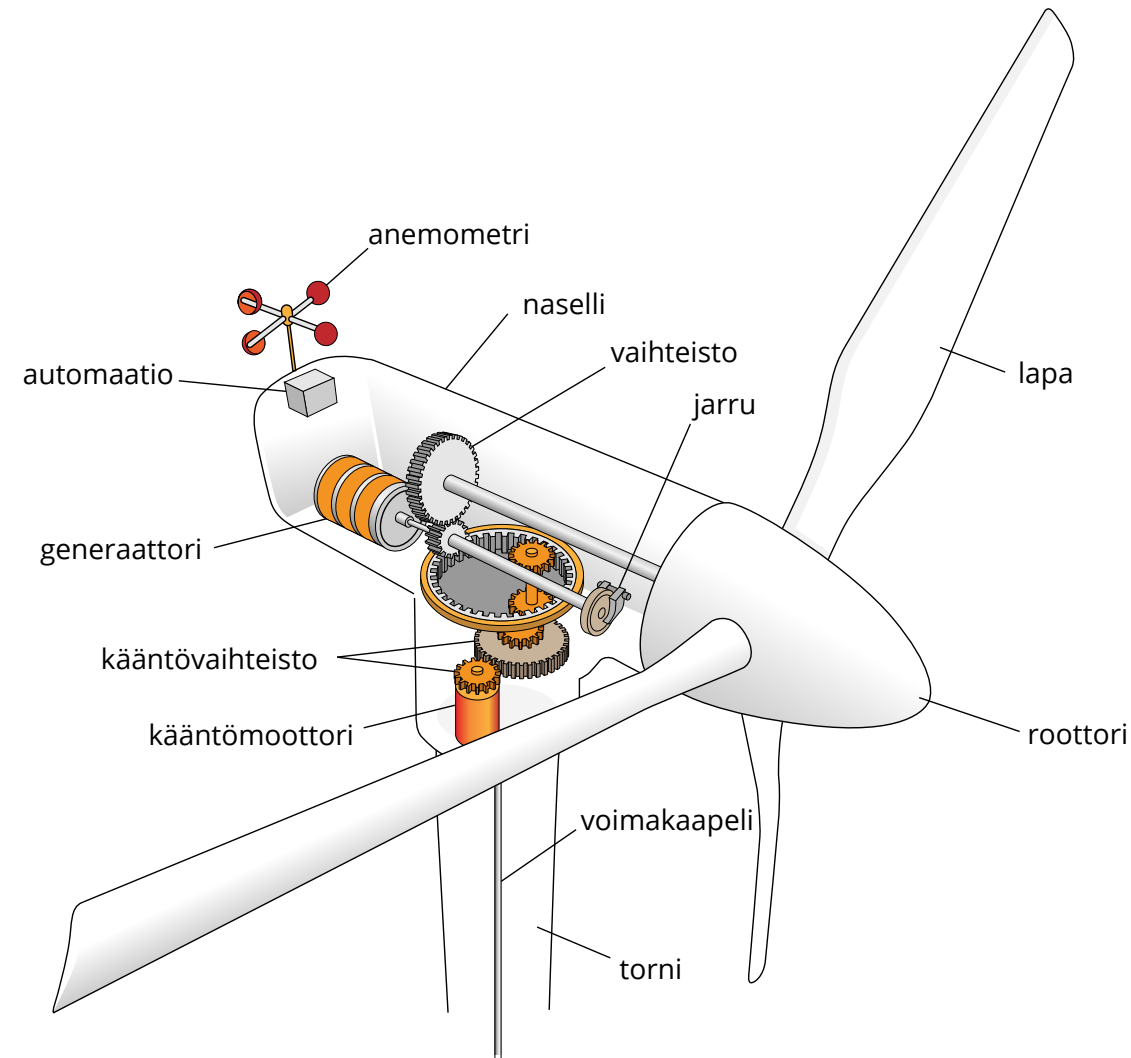


Ossauskosken vesivoimalaitos

Tuuliturbiinit

Tuulivoimalat voidaan jakaa vaaka- ja pystyakselisiin laitoksiin. Selkeästi yleisimpiä laitosmalleja ovat kolmilapaiset, vaaka-akseliset tuulivoimalat. Käytössä on myös pystyakselisiä laitoksia, joita ovat

Savonius-, Darrieus-, Windside- ja kuppiroottori. Nykyään ainoastaan vaaka-akselisilla laitoksilla on käytännön merkitystä laajemmassa tuulivoimatuotannossa.



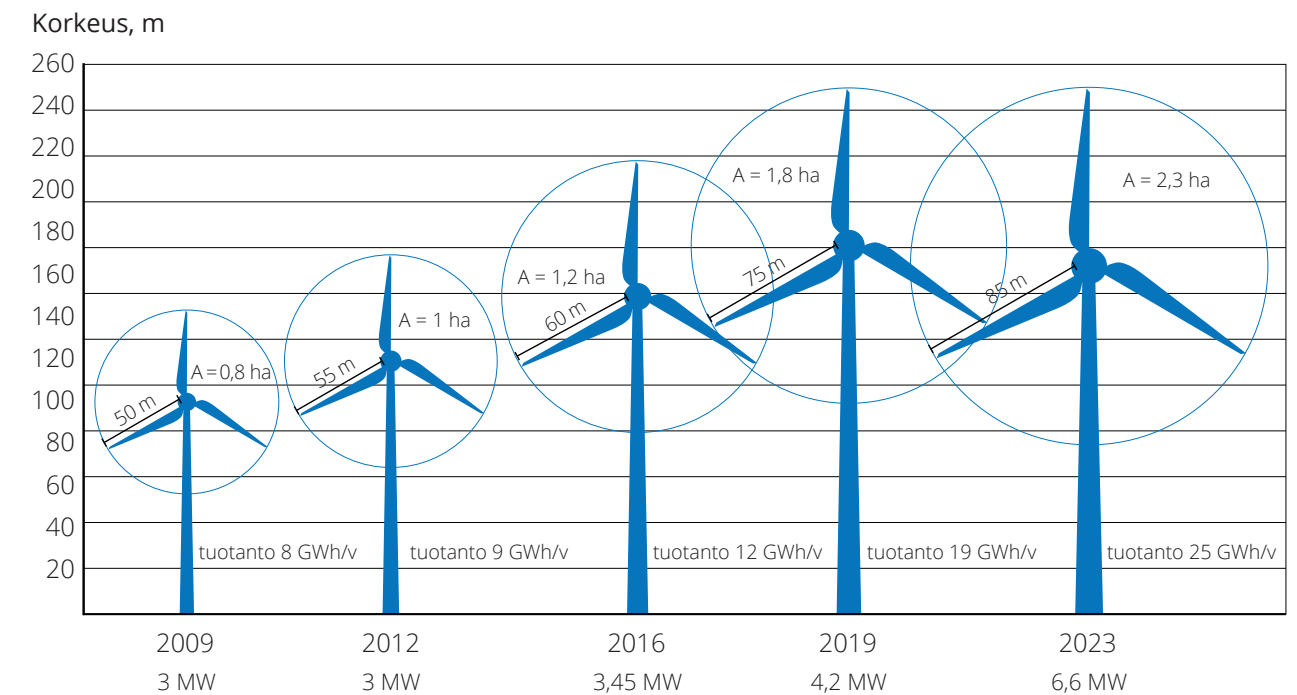
Kuva 22.3 Vaihteellisen vaaka-akselisen tuulivoimalan osat

Vaaka-akselinen laitos

Vaaka-akselisen tuulivoimalan osat esitetään kuvassa 22.3. Lavat sijaitsevat korkealla kiinnitettynä konehuoneeseen eli **naselliin**. Tällaisen laitoksen merkittävin etu on, että se peittää pyöriessään omaan pinta-alaansa nähden huomattavan suuren alan ja pystyy tuottamaan omaan painoonsa nähden huomattavan paljon tehoa. Laitoksen vaihteisto ja generaattori sijaitsevat ylhäällä, mikä vaikeuttaa huoltotöitä. Laitoksessa tarvitaan kääntöjärjestelmä, jolla huolehditaan siitä, että roottori on jat-

kuvasti suunnattuna tuulta vasten. Kolmilapaiset laitokset ovat syrjäyttäneet yksi- ja kaksilapaiset laitokset tasapainoisemman pyörimisen vuoksi.

Tällä hetkellä rakennettavat vaaka-akseliset maatuulivoimalat ovat nimellisteholtaan noin 7 MW. Tornit ovat tyypillisesti noin 158–172 metriä korkeita ja lavat noin 85–90 metriä pitkiä. Nykyaikaisten maatuulivoimaloiden torni- ja lapakorkeuksilla tuulennopeus on huomattavasti suurempi ja tasaisempi kuin maanpinnalla.



Kuva 22.4 Tuulivoimarakoon kasvu vuosina 2009–2023 [8]

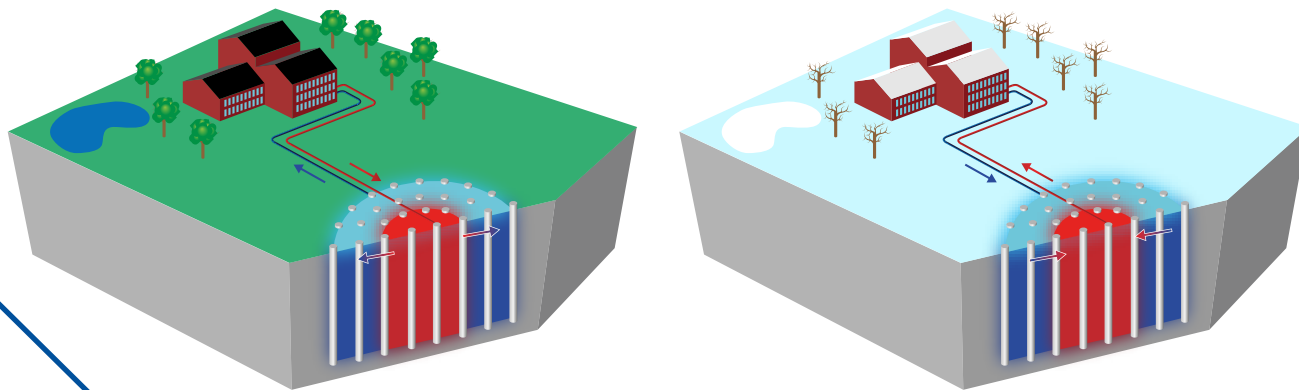


OPETUSHALLITUS
UTBILDNINGSTYRELSEN

Porakaivolämpöakku (BTES)

Porakaivolämpöakkuja (BTES, borehole thermal energy storage) käytetään yleensä rakennusten lämmitysjärjestelmiin liitettynä kausivarastoina. Suomessa tällaisia varastoja arvioidaan olevan noin 50–100. Lämpöä voidaan varastoida maaperään ja ottaa sieltä käyttöön maaperään porattuihin reikiin asennettujen U-putkilämmönsiirtimien välityksellä.

BTES-järjestelmän periaate esitetään kuvassa 24.3. Tällainen järjestelmä on käytössä esimerkiksi Finn Spring Oy:llä, jossa se on kytketty tuotannon ja tilojen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmään. Ylimääräistä lämpöä varastoidaan kesäaikana sekä tuotannosta että aurinkolämpökeräimistä varaajaan, josta lämpöä otetaan käyttöön lämmityskaudella toimistotilojen ja uimahallin lämmitykseen. Järjestelmässä on 63 maahan porattua reikää (syvyys noin 50 m), joissa kierrätetään vettä U-putkilämmönsiirtimissä. Lämpöakun varastointikapasiteetti on maan lämpökapasiteetilla $0,6 \text{ kWh/m}^3\text{°C}$ noin 500 MWh (40 °C:n lämpötilaerolla).

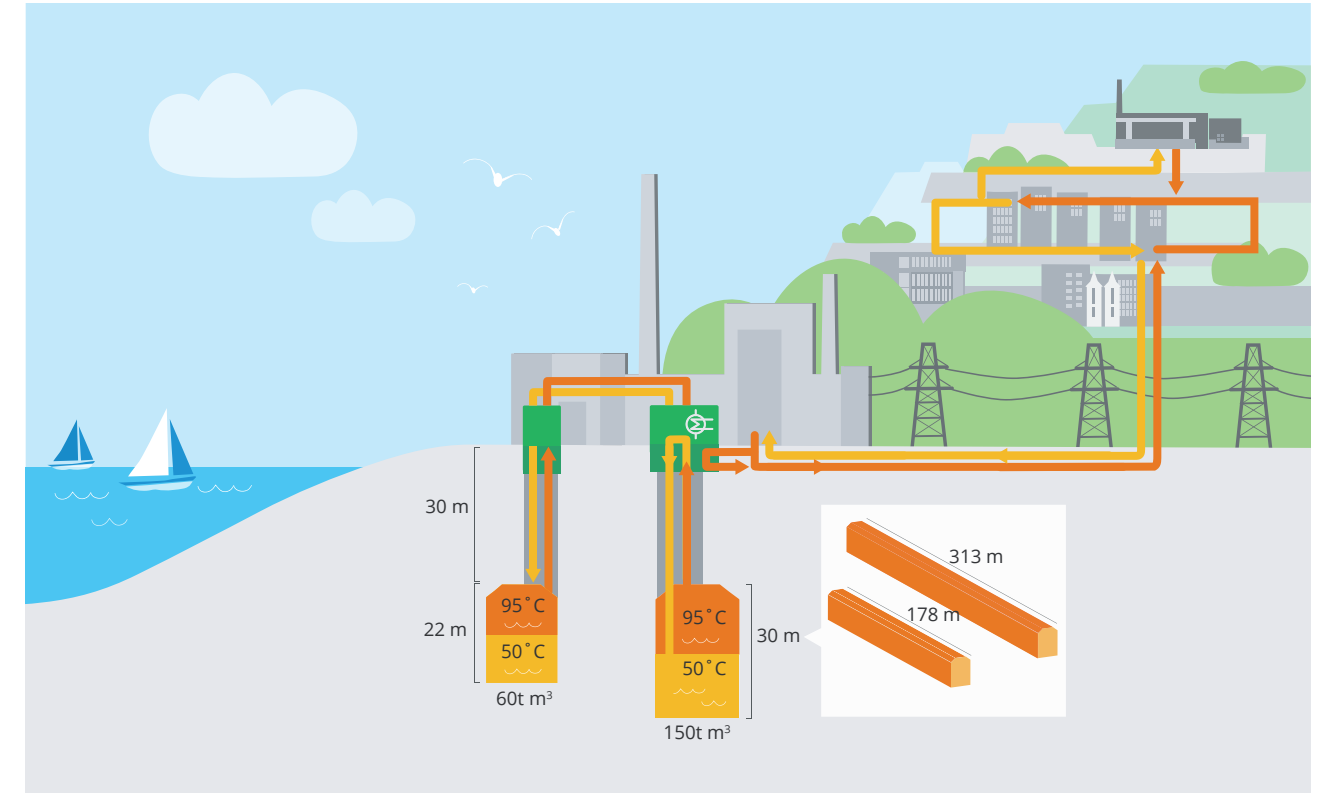


Kuva 24.3 BTES-järjestelmän periaate kesällä ja talvella

Kaukolämpöjärjestelmiin liitetyt vesivaraajat (CTES ja TTES)

Suomessa useisiin kaukolämpöverkkoihin on liitetty **vesivaraaja**. Varaajina käytetään useimmiten maan päälle rakennettuja vesisäiliöitä. Joissain tapauksissa käytetään kallioon louhittuja luolia, jotka ovat aiemmin toimineet öljyvarastoina. Suuria säiliöitä voidaan käyttää kesäaikaisen ylijäämälämmön talvivarastointiin ja pienempiä säiliöitä puolestaan vastapainevoimalaitosten sähköntuotannon optimointiin sähkön hinnan vaihteluiden mukaisesti.

Vuonna 2020 Vaasan Vaskiluodossa otettiin käyttöön aiemmin öljyvarastoina käytetyistä luolista tehty **luolalämpövarasto** (CTES, cavern thermal energy storage), joka varastoi jätteenpolttolaitoksen ylimääräistä lämpöenergiaa. Järjestelmä mahdollistaa kesäaikaisen kaukolämmön kulutuksen ylittävän lämmöntuotannon pitkäaikaisvarastoinnin ja käyttöönoton talvikuukausien kulutushuipujen aikana. Varastointitilavuus on $150\,000 \text{ m}^3$, lataus- ja purkauskapasiteetti 100 MW sekä varastointikapasiteetti noin 7–9 GWh käyttölämpötila-alueella $45\text{–}90 \text{ °C}$.



Kuva 24.4 Vaasan Vaskiluodon luolalämpövaraston periaate (EPV Energia)

Haapaniemen voimalaitoksen yhteyteen rakennettu **kaukolämpöakku** (TTES, tank thermal energy storage) otettiin käyttöön vuonna 2020. Akku on kokonaistilavuudeltaan $15\,000 \text{ m}^3$ (korkeus $50,5 \text{ m}$ ja halkaisija 21 m). Maksimiviesivirralla 750 kg/s päästään noin 80 MW:n tehoon, ja varastointikapasiteetti on vastaavasti 800 MWh. Kuvas-
ta 24.5 b nähdään, että kaukolämpöakussa kuuma ja kylmä vesi saadaan helposti pidettyä toisistaan erillään veden lämpötilan mukaan tapahtuvan kerrostumisen ansiosta.

Kaukolämpöakkuja käytetään päivittäin optimoitaessa voimalaitoksen sähköntuotantoa sähkön hinnan vaihteluiden mukaan. Kun sähkön hinta on korkea, laitosta ajetaan maksimiteholla ja ylimääräinen lämpö syötetään kaukolämpöakkuun. Kun sähkön hinta on matala, laitosta ajetaan pienemällä teholla ja lämpöä puretaan akusta kaukolämpöverkkoon. Nykyisillä suurilla sähkön hinnan vaihteluilla akkuinvestoinnin takaisinmaksuaika on muutamia vuosia.



OPETUSHALLITUS
UTBILDNINGSTYRELSEN

Seudun Energiantuotannon suunnitelma perustaa synteettisen metanolin tuotantolaitos Naantaliin. Suunnitelman mukaan Naantalin voimalaitokselta saataisiin hiilidioksidia ja höyryä metanolin valmistukseen ja prosessissa syntyvällä hukkalämmöllä tuotettaisiin kaukolämpöä. Mikäli investointipäätös tehdään, voisi kaupallinen tuotanto alkaa vuonna 2029.

Vastaavia laitosinvestointeja vetytalouteen liittyen on Suomessa suunnitteilla jopa useiden kymmenien miljardien eurojen edestä. Kustannusriskit ja rahoituksen saannin haasteet ovat kuitenkin osin hidastaneet suunnittelua ja voivat jopa estää joitakin suunniteltuja investointeja toteutumisesta. Vetytalouden kehittäminen vaatii pitkäjänteistä ja kokonaisvaltaista, asetetut tavoitteet huomioivaa poliittista

ohjausta, koska vety ja synteettiset polttoaineet eivät ole tänä päivänä (normaalioloissa) kilpailukykyisiä fossiilisiin vaihtoehtoihin verrattuna.

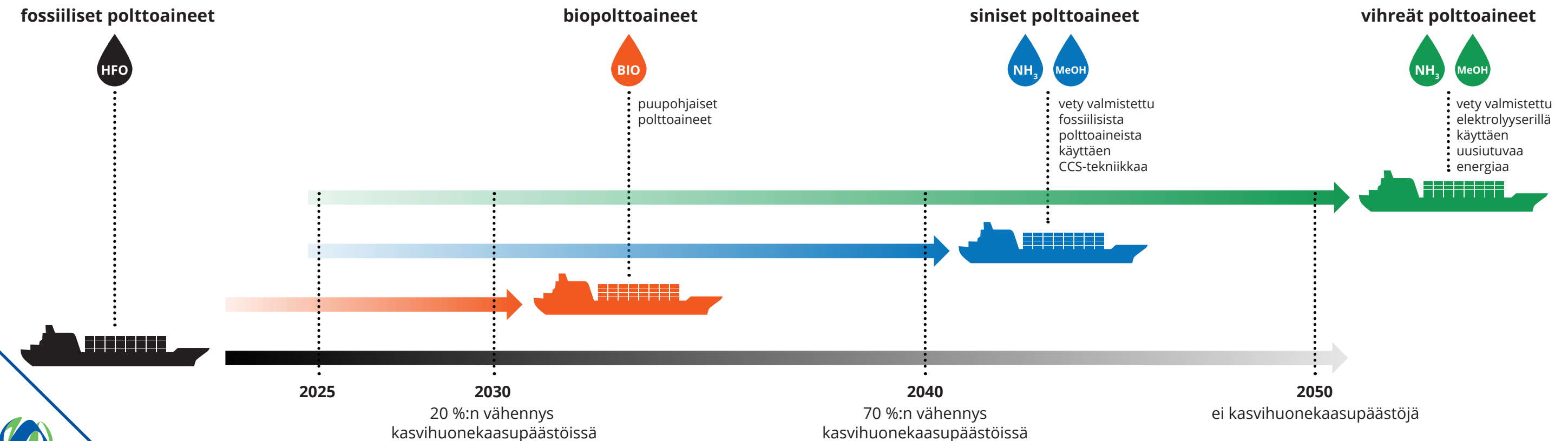
Synteettisille polttoaineille on tarvetta erityisesti lento- ja meriliikenteessä. Kuvassa 25.2 esitetään EU:n asettamat vähimmäistavoitteet lentopolttoaineiden uusiutuvien ja synteettisten polttoaineiden osuuksille. Vuoden 2025 alusta lähtien EU:n suurimilla lentokentillä tankattavaan polttoaineeseen on sekoitettava kaksi prosenttia uusiutuvaa lentopolttoainetta. Osuus kasvaa viiden vuoden välein niin, että vuonna 2050 uusiutuvien osuus on jo 70 %. Vuodesta 2030 alkaen uusiutuvien polttoaineiden joukkoon on sekoitettava myös synteettisiä polttoaineita. Suomessa sekoitusvelvoite koskee Helsinki-Vantaan lentoasemalla tapahtuvaa tankkausta.

Synteettisillä polttoaineilla on kysyntää myös merenkulkualalla. Perinteisesti suuret rahtialukset ovat käyttäneet polttoaineena raskasta tai kevyttä polttoöljyä. Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO (International Maritime Organization) on asettanut laivaliikenteen osalta tavoitteeksi hiilineutraaliuden saavuttamisen vuoteen 2050 mennessä. Tämä tapahtuu lisäämällä asteittain biopolttoaineiden ja ammoniakkin (NH_3) sekä synteettisten polttoaineiden, kuten vihreän metanolin (CH_4O tai CH_3OH), käyttöä kuvan 25.3 mukaisesti.

Laivaliikenteessä ollaan jo nyt siirtymässä yksipolttoaineympäristöstä monipolttoaineympäristöön ja näin luodaan mahdollisuuksia vihreään siirtymään. Esimerkiksi Wärtsilän vuosina 2023–2024 konttialuksiin toimittamista moottoreista jo

60 % pystyy käyttämään metanolia polttoaineena. Wärtsilässä uskotaan, että tulevaisuudessa myös kiinnostus ammoniakkiin polttoaineena tulee kasvamaan. Ammoniakin etuna metanoliin verrattuna on, että sen valmistamiseen ei tarvita hiilidioksidia eikä sen poltossa sitä myöskään synny. Sen sijaan ammoniakkin valmistuksessa tarvitaan typpeä, joka voidaan ottaa ympäröivästä ilmastasta. Metanoli ja ammoniakki ovat laivapolttoaineina edullisia, koska ne vaativat vähemmän tilaa aluksessa kuin muut vihreät polttoaineet.

Seuraavaksi tarkastellaan vedyn valmistukseen ja hiilidioksidin talteenottoon sekä näiden syntetisointiin soveltuvia teknologioita ja prosesseja, joiden avulla voidaan tuottaa synteettisiä polttoaineita.



asettamat tavoitteet merenkulun kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi



OPETUSHALLITUS
UTBILDNINGSTYRELSEN