

Tallinna Tehnikaülikool  
Soojustehnika Instituut

**KOMBINEERITUD  
SOOJUSJÕUSEADMED**

Doktorant: Alan Vaht  
Õppejõud: dots. Rein Kruus

Tallinn 2001

## Sisukord

Jooniste loetelu.....	3
Tabelite loetelu.....	3
SISSEJUHATUS .....	4
1. GAASITURBIIN .....	5
1.1    Kombineeritud auru-gaasitsükliga elektrienergia tootmine .....	7
1.1.1    Üherõhuline aurutsükkel .....	8
1.1.2    Toitevee temperatuuri mõju gaasiturbiini efektiivsusele .....	10
1.1.3    Üherõhuline aurutsükkel väävlirikastele kütustele .....	11
1.1.4    Kahe- ja kolmerõhulised aurutsüklid .....	11
1.1.5    Täiendav kütuse põletamine utilisatsioonikatlas .....	13
1.1.6    Erinevate aurutsüklite võrdlus .....	14
1.2    Kombineeritud auru-gaasitsükliga koostootmine .....	14
1.3    Aurutsükli peale ehitatud gaasitsükkel.....	16
1.4    Gaasiturbiiniga kombineeritud rõhu all keevkihtpõletamine .....	17
1.5    Auru sissepritsimisega gaasiturbiin (STIG – Steam Injected Gas Turbine) ...	17
1.6    Niiske õhu turbiin (HAT – Humid Air Turbine).....	18
1.7    Gaasiturbiinides põletatavad kütused.....	18
2. KÜTUSE ELEMENDID.....	19
2.1    Kütuse elementide tööprintsip .....	20
2.2    Kütuse elementide tüübid.....	21
2.2.1    Fosforhappega kütuse element.....	21
2.2.2    Polümeermembraaniga kütuse element .....	22
2.2.3    Sula karbonaatidega kütuse element.....	22
2.2.4    Tahke oksiidiga kütuse element.....	23
2.3    Kütuse elementide mõju keskkonnale.....	23
3. SISEPÕLEMISMOOTORID .....	24
KASUTATUD KIRJANDUS .....	26

## Jooniste loetelu

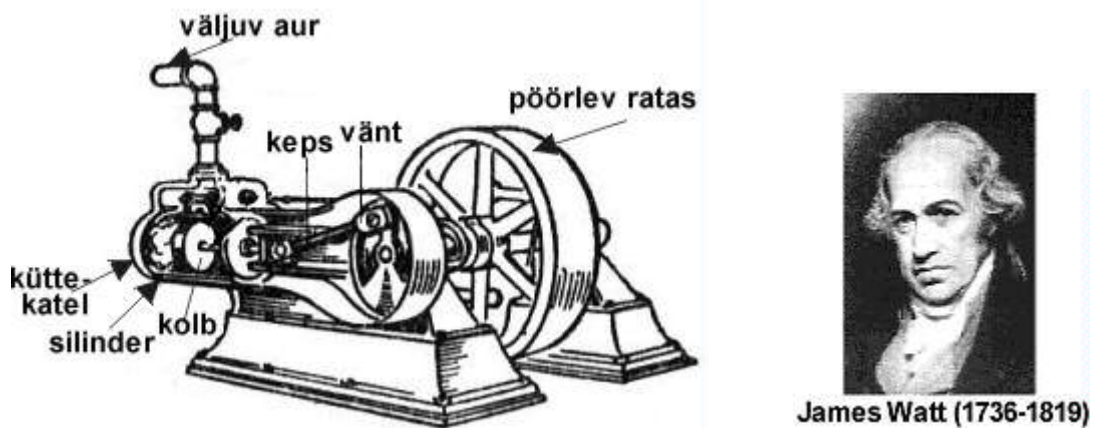
Joonis 1 James Watt ja tema aurumasin aastal 1782.....	4
Joonis 2 Gaasiturbiini põhimõtteline skeem elektrienergia ja soojuse koostootmisel .....	6
Joonis 3 Üherõhulise aurutsükliga HRSG.....	8
Joonis 4 Üherõhulise aurutsükliga HRSG energia/temperatuuri dünaamika.....	9
Joonis 5 Kolmerõhulise aurutsükliga HRSG .....	12
Joonis 6 Kolmerõhulise aurutsükliga HRSG energia/temperatuuri dünaamika .....	13
Joonis 7 Kombineeritud auru-gaasitsükliga koostootmine auru väljastamiseks.....	15
Joonis 8 Kombineeritud auru-gaasitsükliga koostootmine sooja vee väljastamiseks.....	16

## Tabelite loetelu

Tabel 1 Maailma installeeritud energiavõimsused tehnoloogiate järgi.....	6
Tabel 2 Erinevate tehnoloogiate kasutegurid .....	7
Tabel 3 Erinevate aurutsüklite tehniliste andmete võrdlus (madala väävlisisaldusega gaaskütuse kasutamisel) .....	14
Tabel 4 Arvestatav maagaasi varu maailmas .....	19

## SISSEJUHATUS

Ajalooost on teada, et kõige esimene teadaolev energia väljundiga seade oli tuuleveski, mille peajoontes kujutas kreeka teadlane Heron Alexandria juba 1. sajandil. Heron'i leiutiste hulka kuulub ka aurumasin, mis oli tegelikult rohkem mänguasi kui aurumasin. Maaailma esimese kaubandusliku aurumasinana leiutas Inglismaa leiutaja Thomas Newcomen (1663-1729) aastal 1712. Leiutis oli mõeldud vee väljapumpamiseks kivisöökaevandusest. Lisaks Newcomen'i leiutisele võib leida, et esimese aurumasinana leiutise au kuulub hoopiski James Watt'ile (1736-1819), kes tegelikult ainult täiustas Newcomen'i aurumasinat, mis valmis aastal 1782 (vt. Joonis 1).



**Joonis 1 James Watt ja tema aurumasin aastal 1782**

Aurumasinaid kasutati kuni 20. sajandini. Siis lasti käiku auru- ja gaasiturbiin ning sise põlemis- ja elektrimootor.

Esimene gaasiturbiini tööpõhimõttele sarnane seade oli jällegi tuuleveski. Nimelt 16. sajandil avastati juhuslikult, et korstnast tõusvaid kumasid suitsugaase saab kasutada tuuleveski labade ja võlli ringiajamiseks. 19. sajandil arendati mitmeid gaasiturbiine, millede disainiks oli eraldi kompressor ja turbiin. Kaasaegse gaasiturbiini otseseks eelkäijaks oli 1872. aastal Saksa inseneri F. Stolze'i poolt kujundatud mitte pidevalt töötav gaasiturbiin, kus turbiin ja kompressor asusid ühel võllil. Põhjus, miks Stolze'i gaasiturbiin ei suutnud pidevalt töötada, oli tingitud turbiini ja kompressori kasutegurist. Turbiini ja kompressori madalate kasutegurite tõttu ei tootnud turbiini mehaaniline

väljund piisavalt palju energiat, et juhtida kompressorit ning seetõttu ei saanud süsteem pidevalt töötada.

Esimene suurem ja pidevalt töötav gaasiturbiin ehitati Prantsusmaal Pariisis 1903. aastal. 1930. aastal kasutasid Inglismaa ja Saksamaa teadlased gaasiturbiini potentsiaali lennunduses ning II m. s ajal arendati gaasiturbiine peamiselt lennukite tarvis. Hiljem kasvas aga just lennundusest välja gaasiturbiin, mida kasutati elektri tootmiseks.

Esimese auruturbiini (aktiivturbiin, 3,5 kW) ehitas Rootsi insener Laval aastal 1883. Järgmisel aastal ehitas Inglismaa teadlane Parsous reaktiivturbiini.

Käesolev töö annab ülevaate eelnevalt kirjeldatud seadmetest väljaarenenud kaasaegsetest soojusjõuseadmetest, nende erinevatest skeemidest ja efektiivsusnäitajatest.

## 1. GAASITURBIIN

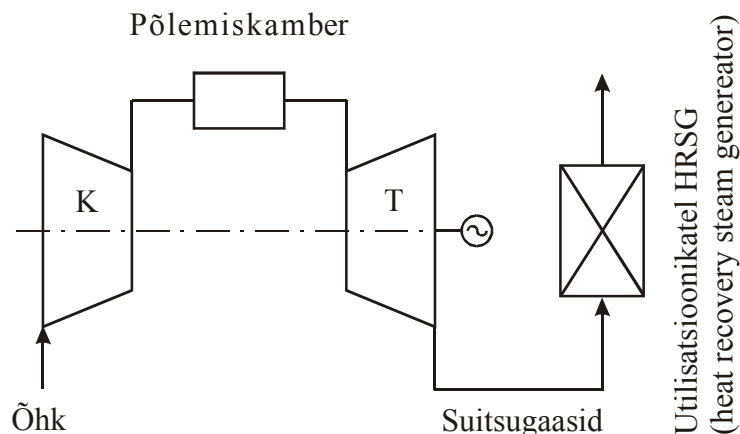
Gaasiturbiin on selline soojusmootor, kus töökehaks on põlemisproduktid koos õhuga. Tööprintsibiilt on gaasiturbiin analoogiline auruturbiiniga kus soojusenergia muudetakse algul kineetiliseks energiaks ja seejärel mehaaniliseks energiaks. Kaasaegne gaasiturbiin on väljaarenenud suhteliselt madala efektiivsusega seadmest. 1970 ja 80-ndatel kasutati gaasiturbiine nende kiire käivitamise tõttu peamiselt vaid tipukoormuste katmiseks. 1990-ndatel on aga üha rohkem hakatud gaasiturbiine kasutama nii elektrienergia ja soojuse koostootmiseks kui ka ainult elektri tootmiseks. Gaasiturbiinseadmete jätkuv populaarsus ja uute võimsuste installeerimise aktiivsus on tingitud energia tootmiseks kasutatava kütuse (peamiselt maagaas) vähesest keskkonnaohtlikkusest. Samal ajal on pidevalt karmistunud nõuded atmosfääri paisatavate saasteainete osas mõjunud negatiivselt uute tahkekütusega seadmete paigaldamist. Lisaks gaaskütuse vähesele keskkonnaohtlikkusele mõjutab erinevate tootmistehnoloogiate vahel valiku tegemist gaasiturbiinide kasuks nende paigaldamise kiirus, mis on tingitud suhteliselt standardsetest moodulitest millest gaasiturbiin koosneb. Kuni 1998. aastani oli tunda gaasiturbiinseadmete hindade langust, mis muutis uute võimsuste paigaldamise majanduslikult atraktiivsemaks Nõudluse kasvust tingituna on aga gaasiturbiinide hinnad viimastel aastatel tõusnud keskmiselt 7% võrreldes 1998.

aasta tasemega. 1999. a. andmete järgi moodustasid gaasiturbiinid 10% maailma installeeritud kogu energiavõimsustest (vt. Tabel 1<sup>1</sup>) [1].

**Tabel 1 Maailma installeeritud energiavõimsused tehnoloogiate järgi**

Auruturbiin	66%	2050 GW
Gaasiturbiin	10%	300 GW
Hüdrojaam	22%	680 GW
Diiselmootorid	2%	70 GW
<b>Kokku</b>	<b>100%</b>	<b>3100 GW</b>

Gaasiturbiini põhimõtteline (lihtsustatud) skeem elektrienergia ja soojuste koostootmisel on esitatud joonisel (Joonis 2).



**Joonis 2 Gaasiturbiini põhimõtteline skeem elektrienergia ja soojuste koostootmisel**

Gaasiturbiini põlemiskambrisse sisenev õhk komprimeeritakse kompressoris (K). Kütusepõlemine toimub põlemiskambris, millest gaasid väljuvad temperatuuriga 750...900°C (ei kasutata düüside ja töölabade jahutust) ning juhitakse gaasiturbiini (T) kus gaasid paisuvad ja turbiin teeb tööd, mille tulemusel toodetakse elektrienergiat. Kaasaegse gaasiturbiiniga võimsusega 200MW ja suurematega on võimalik saavutada kütuse energia elektriks muundamise kasutegur 30-35% (vt. võrdlust teiste tehnoloogiatega, Tabel 2). Gaasiturbiini kasutegurit saab tõsta gaasiturbiini sisenevate

<sup>1</sup> Tabelis pole arvesse võetud taastuvaid energia ressursse ning arvestatud on vaid auru- ja gaasiturbiinidega, mis on suuremad kui 3 MW. Diiselmootoritest on arvesse võetud vaid need, mis on suuremad kui 1 MW.

gaaside temperatuuri tõstmisega. Gaasiturbiini düüside ja töölabade õhkjahutuse kasutamisel võib gaasiturbiini siseneva gaasi temperatuur olla isegi 1400-1430°C.

**Tabel 2 Erinevate tehnoloogiate kasutegurid**

	Kasutegur
Tavapärane kivisõejaam	38-47
Rõhu all keevkihtpõletamine	45
Gaasiturbiin	30-35
CHP gaasiturbiin	55
Kütuse elemendid:	36
- fosforhappega kütuse element (PAFC)	36
- membraan kütuse element (PEM)	40
- tahkeoksiid kütuse element (SOFC)	50
Aeglaste pööretega diiselmootor	50

Et kütuses sisalduvat energiat efektiivsemalt kasutada on võimaluse korral otstarbekas kasutada suitsugaaside jääksoojust auru või soojuse tootmiseks utilisatsioonikatlas (HRSG), tootes koostootmisrežiimis üheaegselt elektrienergiat ja soojust. Sellisel juhul on kütuse energia muundamise kasutegur u. 55%. Koostootmisel saab rääkida ka energiaressursside säästvamast kasutamisest, mis on Eesti Vabariigi **Kütuse- ja energiamajanduse pikaajalise riikliku arengukava** ja ka Euroopa Liidu üks eesmärkidest.

Gaasiturbiinist väljuvad gaasid sisaldavad u. 15% hapnikku, mis annab võimaluse põletada HRSG-s täiendavalt kütust ning toota sellevõrra täiendavalt auru või soojust. Toodetud auru on võimalik kasutada näiteks mõne tööstusprotsessi tööks.

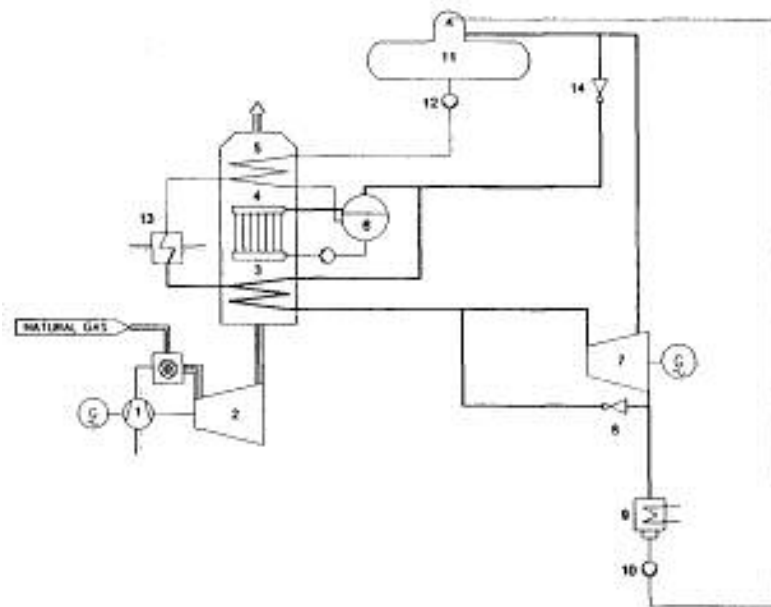
### **1.1 Kombineeritud auru-gaasitsükliga elektrienergia tootmine**

Juhul kui on vajalik suurem elektriline võimsus, on otstarbekas ehitada auru-gaasitsükliga seade, kus elektrit toodetakse nii gaasi- kui ka auruturbiiniga. Auru tootmiseks kasutatakse samuti HRSG-d, mille järel juhitakse aur auruturbiini, suurendades sellega elektrilist võimsust. Kombineeritud auru-gaasitsükliga seadmega

on võimalik saavutada kasutegur kuni 60%-ni. Erinevate programmide raames (peamiselt USA Energeetikaministeeriumi eestvedamisel) on seatud eesmärgiks saavutada kasutegur kuni 70%.

### 1.1.1 Üherõhuline aurutsükkel

Lihtsaim kombineeritud auru-gaasitsükliga seade on üherõhuline aurutsükkel, kus auru tootmine HRGS-is toimub ühel auru rõhul (vt. Joonis 3).



**Joonis 3 Üherõhulise aurutsükliga HRSG**

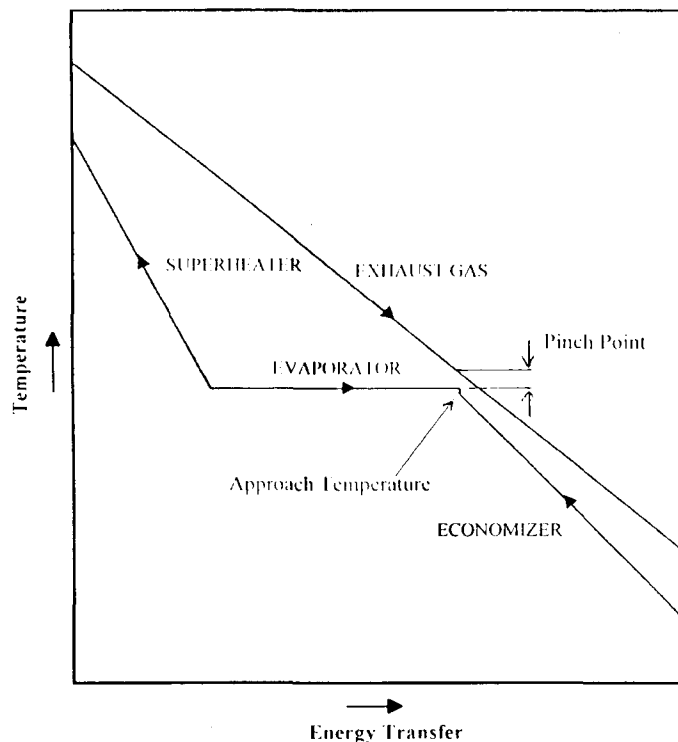
- 1- kompressor; 2- gaasiturbiin; 3- ülekuumendi; 4- aurustusküttepind;
- 5- ökonomaiser; 6- trummel; 7- auruturbiin; 8- auruturbiini baipassliin;
- 9- kondensaator; 10- kondensaadipump; 11- deaeraator; 12-toiteveepump;
- 13- gaasiturbiini jahuti; 14- deaeraatori tööaur.

Auruturbiin (7) on varustatud baipassliiniga (8), mille kaudu on võimalik juhtida auru otse kondensaatorisse. Baipassliini kasutatakse juhul kui mingil põhjusel pole võimalik auru läbi turbiini juhtida (nt. sissekütmine või auruturbiin ei tööta). Peale kondensaatorit (9) pumbatakse kondensaat kondensaadipumbaga (10) tagasi deaeraatorisse (11). Toiteveepumbaga (12) pumbatakse toitevesi HRSG-sse. Deaeraatori tööks võetakse auru turbiinivaheltvõttust. Juhul kui auru rõhk turbiinivaheltvõttust on liialt madal võetakse auru deaeraatori tööks läbi liini (14) otse trumlist (6).



HRSG koosneb kolmest erinevast küttepinnast: ökonomaiser (5), aurustusküttepind (4) ja ülekuumendi (3). Ökonomaiseris soojendatakse toitevesi temperatuurini, mis on lähedane aurustustemperatuurile. Ökonomaiseris soojendatud toitevesi aurustatakse konstantsel temperatuuril ja rõhul aurustuskontuuris. Trumli ülesandeks on vee ja kuivküllastunud auru eraldamine. Trumlist väljub aur ülekuumendisse, mille järel juhitakse ülekuumendatud aur ehk värsket aur auruturbiini.

Joonisel (Joonis 4) on esitatud üherõhulise aurutsükliga HRSG energia/temperatuuri dünaamika, mis iseloomustab erinevate küttepindade soojusvahetust. Pindala, mis jääb gaasi ja auru/vee temperatuuri sirgete vahele, on heitgaasidelt aurule/veele üleandmata soojushulk, mis juhitakse korstnasse. Mida madalam on aga HRSG-st lahkuvate heitgaaside temperatuur, seda kõrgem on HRSG kasutegur. Juhul kui suurendada küttepinda, on võimalik soojuskadusid vähendada, kuid see ei saa kunagi võrduda nulliga – isegi lõpmatu suure küttepinna kasutamisel.



**Joonis 4 Üherõhulise aurutsükliga HRSG energia/temperatuuri dünaamika**

Joonisel on näidatud ka *pinch-point* (temperatuurivahe) temperatuur, mis on heitgaaside ja auru/vee temperatuuride vahe aurustusküttepinna lõpus. Madala temperatuurivahe

saavutamiseks peab kasutama suuremat küttepinda, mille tulemusel kasvab aurutoodang. Tavaliselt on nimetatud temperatuurivahe 8-15K.

Joonisel (Joonis 3) esitatud üherõhulise aurutsükliga HRSG toitevee temperatuur on 60°C ning lahkvate heitgaaside temperatuur 133°C, mis näitab et heitgaaside soojust utiliseeritakse suhteliselt madala kasuteguriga. Kirjeldatud kombineeritud auru- gaasitsükliga seadme elektriline kasutegur on 57,7%, millest 37,6% on gaasiturbiini ja 20,1% auruturbiini elektriline kasutegur.

Siinkohal pakub huvi ja on otstarbekas anda lühike ülevaade erinevate parameetrite mõjust üherõhulise aurutsükliga HRSG efektiivsusele ning kogu tsükli efektiivsusele. Nendest viimane on olulisem ja omab suuremat tähtsust.

Oluline on teada, et mida kõrgem on värske auru rõhk, seda madalam on HRSG kasutegur ehk heitgaaside soojus utiliseeritakse vähem efektiivsemalt ning heitgaaside temperatuur HRSG-st väljumisel on kõrgem. Kõrgemast rõhust tingituna aurustub vesi aurustusküttepinnas kõrgemal temperatuuril ning väheneb auru toodang. Samal ajal suureneb turbiini koormus, kuna entalpialang auruturbiinis on suurem. Optimaalne lahendus leitakse kahe teguri koosmõjust, kusjuures nendest tähtsaim on entalpialang auruturbiinis.

Värske auru rõhk ei saa aga väga kõrge olla. Nimelt on see seotud värske auru niiskussisalduse kasvuga auruturbiini viimastes astmetes, kus selle tulemusel suureneb erosioonioht (niiskussisaldus ei tohi ületada 16%).

HRSG konstruktsioon avaldab väga suurt mõju gaasiturbiini elektrilisele võimsusele ja kasutegurile. Mõju suurus oleneb heitgaaside rõhulangust HRSG-s, mis peab jääma võimalikult väikseks. Vasturõhu suurenemine alandab entalpialangu gaasiturbiinis. Teatud osa kaotatud võimsusest gaasiturbiinis on võimalik teha tasa HRSG-s kuna heitgaaside temperatuur kasvab. Rõhulang HRSG-s on tavaliselt 25-30 mbar.

### **1.1.2 Toitevee temperatuuri mõju gaasiturbiini efektiivsusele**

Heitgaaside soojuse utiliseerimise efektiivsuse tõstmiseks peab toitevee temperatuur olema võimalikult madal, mis on üks suuremaid erinevusi tavapärase aurukatla võrreldes, kus toitevee temperatuur on kõrge. Peamine põhjus on selleks aurukatla ökonomaiseri järel asetsev õhuelsoojendi, millega on võimalik utiliseerida suur osa suitsugaaside energiast. Gaasiturbiini puhul aga ei kasutata õhuelsoojendust, mis küll

tõstaks HRSG kasutegurit, kuid samal ajal alandaks kompressori kasutegurit, kuna õhu soojendamise suurenemine õhu maht ja kompressor teeb selle võrra rohkem tööd.

Üherõhulise aurutsükliga HRSG näite puhul oli heitgaaside temperatuur HRSG järel 133°C, mida on võimalik alandada kui suurendada ökonomaiseri küttepinda ja kasutada soojendatud vee retsirkulatsiooni suunates osa soojendatud veest tagasi deaeraatorisse kondensaadi ettesoojendamiseks. Deaeraatorisse sisenemisel, sinna suunatud vesi aurustub ning seda kasutatakse kondensaadi deaereerimisel, mille tulemusel kaob vaheltvõtuauru vajadus ning suureneb auruturbiini elektriline võimsus. Kirjeldatud skeemi kasutamisel kasvab kogu tsükli kasutegur 0,1% e. 57,8%-ni. Lahkuvate heitgaaside temperatuur langeb 133°C → 112°C. Negatiivseks aspektiks on tunduvalt suurem HRSG küttepind, mis suurendab viimase hinda.

HRSG konstruktsiooni valikul tuleb arvestada kasutatava kütuse väävlisisaldust. Viimasest sõltub ka toitevee temperatuur, mis peab olema piisavalt kõrge vältimaks heitgaaside temperatuuri langemist alla väävelhappe kastepunkti temperatuuri. Väävelhappe kastepunkti temperatuur sõltub kütuse väävlisisaldusest. Toodud näites, kus üherõhulise aurutsükliga HRSG toitevee temperatuur on 60°C, kasutatakse madala väävlisisaldusega (<3ppm) gaaskütust. Vedelkütuste kasutamisel on toitevee temperatuur 120-160°C.

### **1.1.3 Üherõhuline aurutsükkel väävlirikastele kütustele**

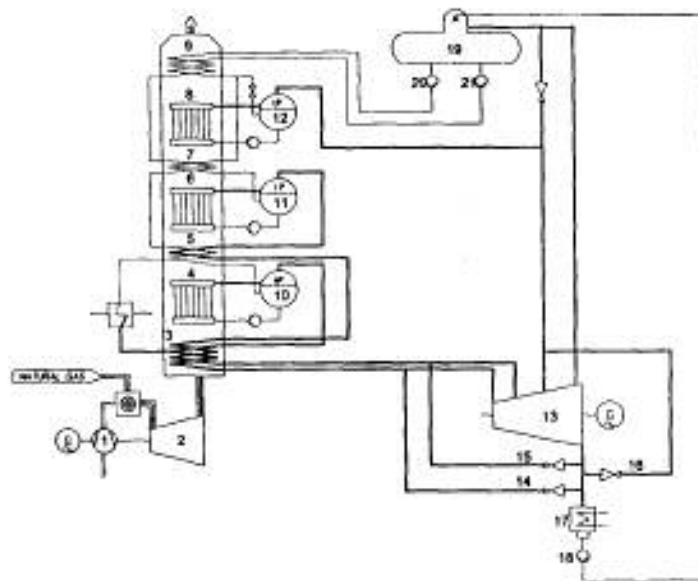
Väävlirikaste kütuste põletamisel kasutatakse sellise konstruktsiooniga HRSG, kus ökonomaiseri järele on asetatud täiendav aurustuskontuur koos trumluga. Sellisel juhul peab aurustusküttepind töötama auru/vee rõhul, mis on võrdeline väävelhappe kastepunkti temperatuuriga. Toodetud auru kasutatakse kondensaadi deaereerimiseks. Kirjeldatud skeemi kasutamisel on kogu tsükli kasutegur 57,2% (üherõhuline aurutsükkel) ja HRSG-st lahkuvate heitgaaside temperatuur 148°C.

### **1.1.4 Kahe- ja kolmerõhulised aurutsüklid**

Madalarõhulise aurustuskontuuriga on võimalik toota auru rohkem kui on vaja kondensaadi soojendamiseks ja deaereerimiseks. Toodetud auru võib juhtida auruturbiini. Sellist skeemi nimetatakse kahe- või kolmerõhuliseks aurutsüklikuks, millega

auruturbiini elektriline kasutegur on 21,0% ning kogu tsükli kasutegur 58,6%, mis on 0,9% suurem võrreldes üherõhulise aurutsükliga. HRSG-st lahkuvate heitgaaside temperatuur on 96°C, mis on 37°C madalam kui üherõhulisel aurutsükli.

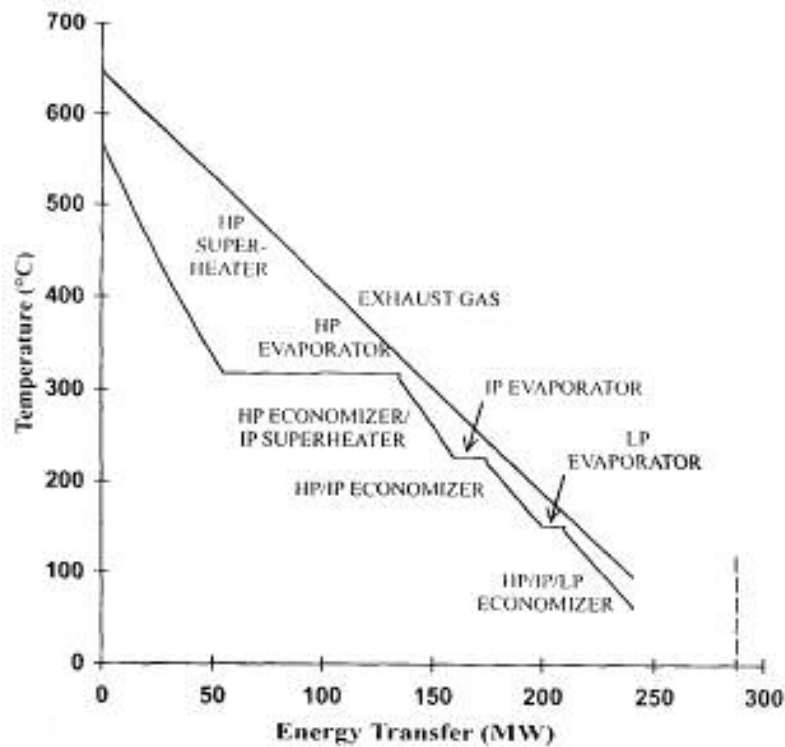
Kolmanda aurustuskontuuri lisamisega kaheõhulisele aurutsükli saavutatakse kasutegur 58,7%, mis on 0,9% suurem võrreldes kaheõhulise aurutsükliga. Sellist tsükli nimetatakse kolmerõhuliseks aurutsükliks (vt. Joonis 5), kus kasuteguri tõus on saavutatud peamiselt heitgaaside utiliseerimisel väikese eksergia<sup>2</sup> kasvuga. Kolme aurustuskontuuri kasutamise on võimalik vähendada joonisel (Joonis 4) kirjeldatud gaasi ja auru/vee temperatuuri sirgete vahelist pindala. Joonisel (Joonis 6) on esitatud kolmerõhulise aurutsükliga HRSG energia/temperatuuri dünaamika, kus gaasi ja auru/vee temperatuuri sirgete vaheline pindala on väiksem üherõhulise aurutsükliga võrreldes.



### Joonis 5 Kolmerõhulise aurutsükliga HRSG

- 1- kompressor; 2- gaasiturbiin; 3- HP/IP (kõrgrõhk/keskrõhk) ülekuumendi;  
4,6,8- HP, IP ja LP (madalrõhk) aurustusküttepinnad; 5- HP ökonomaiser / IP ülekuumendi;  
7,9- HP/IP ökonomaiser; 10,11,12- HP, IP, LP trumlid; 13- auruturbiin;  
14,15,16- auruturbiini HP, IP, LP baipassliinid; 17- kondensaator; 18- kondensaadipump;  
19- deaeraator; 20,21-IP, HP toiteveepumbad.

<sup>2</sup> eksergia on termodünaamiline mõiste, mis näitab termodünaamilise keskkonna võimet teha tööd



Joonis 6 Kolmerõhulise aurutsükliga HRSG energia/temperatuuri dünaamika

### 1.1.5 Täiendav kütuse põletamine utilisatsioonikatlas

Gaasiturbiinist väljuvad gaasid sisaldavad u. 15% hapnikku, mis annab võimaluse põletada HRSG-s täiendavalt kütust, tõstes sellega heitgaaside temperatuuri. Elektrienergia ja soojuste koostootmisel annab kütuse täiendav põletamine võimaluse reguleerida elektri- ja soojuskoormusi eraldi. Täiendava kütuse põletamine üherõhulise aurutsükliga HRSG-s tõstab auruturbiini elektrilist võimsust 30,7MW. Kogu tsükli kasutegur on 57,9%, mis on 0,2% suurem võrreldes ilma täiendava kütuse põletamiseta. HRSG-st lahkuvate heitgaaside temperatuur on 71°C, mis on 62°C madalam. Heitgaaside madal temperatuur saavutatakse suurenenud auru toodanguga, millega suureneb ka massikulu läbi ökonomaiserini ning heitgaaside soojus utiliseeritakse paremini.

Oluline on märkida, et täiendava kütuse põletamine mitmerõhulise aurutsükliga HRSG-s annab kasuteguris negatiivse efekti, sest ilma täiendava põletamiseta aurutsükli on niigi maksimaalse heitgaaside soojuse utiliseerimise kasuteguriga.

### 1.1.6 Erinevate aurutsüklite võrdlus

Eelnevalt kirjeldatud aurutsüklitest annab ülevaate Tabel 3. Tabelis toodud andmed näitavad kuidas erinevate konstruktsioonidega utilisatsioonikatelde kasutamisel võib neto kasutegur tõusta 56,8%-lt 58,7%-ni ja elektriline võimsus 268,7MW-lt 277,7MW-ni. Täiendava kütuse põletamisel utilisatsioonikatlas on võimalik elektrilist võimsust veelgi suurendada.

**Tabel 3 Erinevate aurutsüklite tehniliste andmete võrdlus (madala väävlisisaldusega gaaskütuse kasutamisel)**

		1-rõhuline auru- tsükkel	2-rõhuline auru- tsükkel	3-rõhuline auru- tsükkel	2-rõhuline auru- tsükkel + vaheük.	2-rõhuline auru- tsükkel + vaheük.	1-rõhuline auru- tsükkel + lisakütuse põletamine
PK-s põletatud kütus	MW	473	473	473	473	473	473
Lisakütuse põletamine HRSG-s	MW	0	0	0	0	0	51
Põletatud kütus kokku	MW	473	473	473	473	473	524
GT elektriline võimsus	MW	178	178	178	178	178	178
AT elektriline võimsus	MW	94,8	99,0	99,7	102,5	104,9	125,5
Elektriline võimsus kokku (bruto)	MW	272,8	277	277,7	280,5	282,9	303,5
Bruto kasutegur	%	57,7	58,6	58,7	59,3	59,8	57,9
Omatarve	MW	4,1	4,5	4,5	4,6	5,2	5,0

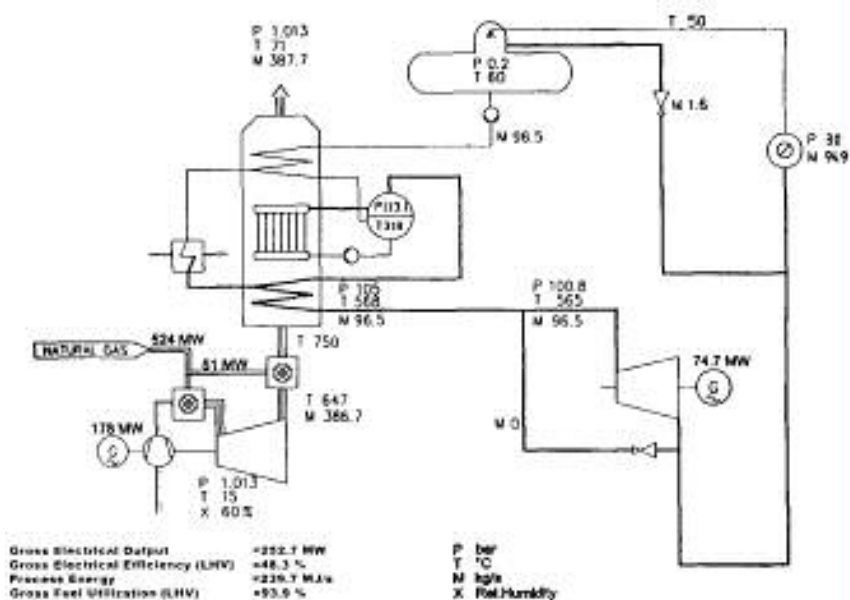
### 1.2 Kombineeritud auru-gaasitsükliga koostootmine

Koostootmine (CHP – combined heat and power) on protsess, kus üheaegselt toodetakse elektrienergiat ja soojust, mille tulemusel kasutatakse kütuses sisalduvat energiat palju efektiivsemalt ja säästlikumalt. Koostootmisel võib soojust toota kas auruna mõne tööstusprotsessi tarvis või sooja veena kütteks.

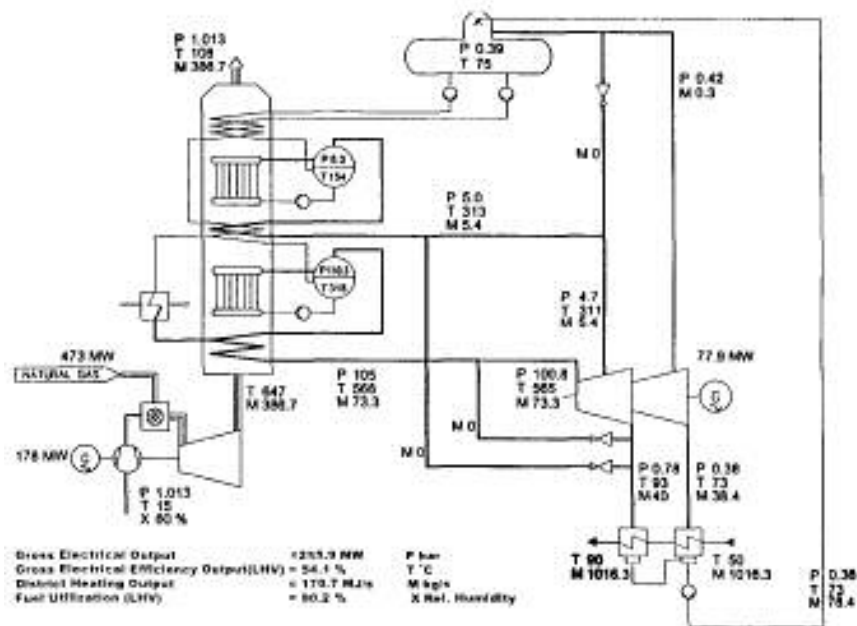
Kombineeritud auru-gaasitsükliga koostootmisel võib kasutada täiendavat kütuse põletamist utilisatsioonikatlas, millega on võimalik reguleerida auru toodangut sõltumata elektrienergia toodangust.

Joonisel (Joonis 7) on esitatud üherõhuline koostootmistsükkel koos täiendava kütuse põletamisega. Auru väljastatakse vasturõhul 3 bar. Protsessist tagastuva kondensaadi temperatuur on 50°C, mille soojendamiseks temperatuurini 60°C ja deaereerimiseks võetakse aur auruturbiini viimasest astmest. Vasturõhust tingituna on seadme elektriline kasutegur 48,3%, mis u. 10% väiksem võrreldes sama seadmega, mis töötab kondensatsioonitsükli järgi. Kuid lisaks elektrienergiale toodetakse ka soojust 239,7MW, mis annab kütuse energia muundamise kasuteguriks 93,9%. Lahkuvate heitgaaside temperatuur on 71°C.

Koostootmisrežiimis soojusvõrku väljastatava soojuse tootmiseks võib kasutada samuti vasturõhuga auruturbiini (vt. Joonis 8), kuid sellisel juhul on koostootmise kasutegur mõnevõrra väiksem. Väiksem kasutegur (90,2%) on tingitud peamiselt kõrgemast toitevee temperatuurist (75°C), mistõttu ka lahkuvate heitgaaside temperatuur on mõnevõrra kõrgem (108°C). Kirjeldatud skeemi elektriline kasutegur on 54,1%.



Joonis 7 Kombineeritud auru-gaasitsükliga koostootmine auru väljastamiseks



Joonis 8 Kombineeritud auru-gaasitsükliga koostootmine sooja vee väljastamiseks

### 1.3 Aurutsükli peale ehitatud gaasitsükkel

Elektrijaamades, kus aurukatla tööressurs on ammendunud, kuid samal ajal võiks auruturbiini olemasolevaid ressursse veel kasutada, on võimalus ehitada gaasitsükkel aurutsükli peale. Olemasoleva skeemi ümberehitamiseks võib aurukatelt kombineerida või asendada täielikult gaasiturbiini ja HRSG-ga. Sellise ümberehitusega saadakse kombineeritud auru-gaasitsükliga seade, mida sõltuvalt skeemist võib kasutada kas elektrienergia tootmiseks või elektrienergia ja soojuste koostootmiseks. Kombineeritud auru-gaasitsükliks ümberehitamisega tõuseb jaama kasutegur, mis on võrreldav uue kombineeritud tsükli kasuteguriga.

Ümberehitamise motiiviks võib olla ka puhtalt vaid soov suurendada jaama kasutegurit ka juhul kui olemasolevatel seadmetel on veel piisavalt tööressursse.

Aurukatla täielikul asendamisel gaasiturbiini ja HRSG-ga suletakse toitevee ettesoojendamiseks auruturbiini vaheltvõttud. Vesi aurustatakse HRSG-s, mille järel värske aur juhitakse auruturbiini. Auruturbiini vaheltvõttude sulgemisega suureneb auruturbiini võimsus. Ümberehitamisel on tähtis valida õige võimsusega gaasiturbiin, millest sõltub kombineeritud tsükli kasutegur. Liialt väikse gaasiturbiini valikul ei tooda HRSG piisavalt auru ning tsükli kasutegur on seetõttu väiksem.



## 1.4 Gaasiturbiiniga kombineeritud rõhu all keevkihtpõletamine

Gaasiturbiiniga kombineeritud rõhu all keevkihtpõletamise tehnoloogia võimaldab põletada kivisütt keskkonnasõbralikumalt, kui tavapärane kivisöel töötav elektrijaam. Seetõttu on sellise tehnoloogia vastu maailmas suur huvi. Kivisöe põlemiseks saadakse põlemisõhk kompressorist rõhuga 12...16 baari. Enne põlemisprotsessi segatakse kivisüsi sorbendiga (kasutatakse lubjakivi) ning kuna põlemine toimub madalal temperatuuril 850°C, saavutatakse kõrge väävlisidumisaste. Kuumad gaasid puhastatakse vastavates tsüklonites ning seejärel juhitakse gaasiturbiini. Gaasiturbiinis paisunud gaasid utiliseeritakse HRSG-s, kus soojendatakse ette toitevett. Toitevesi juhitakse rõhu all keevkihtkatlasse ning selles toodetud aur auruturbiini.

Kirjeldatud skeemi kasutegur on 3-4% suurem tavapärase kivisöe elektrijaamaga võrreldes ning see tagab mõningase kütuse kokkuhoiu.

Näitena võib tuua 426MW elektrilise võimsusega ABB Carbon P800 üksik mooduli, mille kasutegur on 44-45%.

Keeruka skeemi tõttu on seadmed väga kallid ning praktiliselt puudub võimalus gaasi- ja auruturbiini eraldi reguleerimiseks.

## 1.5 Auru sissepritsimisega gaasiturbiin (STIG – Steam Injected Gas Turbine)

Auru sissepritsimisega gaasiturbiin on seade, kus gaas ja aur paisuvad gaasiturbiinis koos. Vesi aurustatakse utilisatsioonikatlas gaasiturbiini jääksoojusega ja juhitakse gaasiturbiini põlemiskambrisse. Võrreldes tavalise gaasiturbiiniga, annab STIG suurema kasuteguri, kuna kasutatakse heitgaaside soojuse utiliseerimist. Kombineeritud auru-gaasitsükliga võrreldes on aga kasutegur u. 10% madalam. Auru sissepritsimisega suureneb massikulu läbi gaasiturbiini, suurendades sellega seadme võimsust, samal ajal suureneb ka kütuse kulu. Sissepritsitava koguse muutmisega saab reguleerida gaasiturbiini võimsust. Sissepritsitava auru kogus on üle 2-4% õhu kogusest. Vee aurustamiseks võib kasutada ühe- või mitmerõhulist aurutsükli. Kui aur juhitakse gaasiturbiini ühel rõhul, kasutatakse üherõhulist aurutsükli. Gaasiturbiini võimsuse suurendamiseks võib kasutada mitmerõhulist aurutsükli, juhtides madalama rõhuga auru ka gaasiturbiini astmete vahele.

Kuna kogu toodetud aur on lõppkokkuvõttes kadu atmosfääri, on seetõttu sellise skeemi lisavee vajadus suur. Osa toodetud aurust kasutatakse lisavee deaereerimiseks ja ettesoojendamiseks.

STIG kasutegur on 45%. Auru sissepritsimine tingib madalad NO<sub>x</sub> heitmed.

Veelgi efektiivsem seade on Turbo-STIG, mille kasutegur on 51%. Sobib kasutamiseks väikestes koostootmisjaamades. Skeemi on liidetud auruturbiin, mis asetseb gaasiturbiini ja generaatoriga ühel ja samal võllil. Vesi aurustatakse utilisatsioonikatlas ja juhitakse auruturbiini. Kasutatakse töötanud auru vaheülekuumendust, mille järel aur pritsitakse gaasiturbiini põlemiskambrisse. Auruturbiini lisamisega suureneb elektriline võimsus ja kasutegur, kuid viimane jääb siiski väiksemaks kombineeritud auru-gaasitsükliga seadmega võrreldes, kus on võimalik saavutada elektriline kasutegur kuni 60%.

STIG seadmete kasutamist piirab suur lisavee vajadus.

### **1.6 Niiske õhu turbiin (HAT – Humid Air Turbine)**

HAT on seade, kus gaasiturbiini põlemiskambrisse juhitakse niiske õhk auru sisaldusega >25%. Tõuseb gaasiturbiini kasutegur ja võimsus. Võrreldes kombineeritud auru-gaasitsükliga seadmega jääb kasutegur madalamaks. Vee aurustamiseks kasutatakse utilisatsioonikatelt, kus heitgaasidega kuumutatakse ka õhu ja auru segu.

HAT seadmete kasutamist piirab suur lisavee vajadus.

### **1.7 Gaasiturbiinides põletatavad kütused**

Gaasiturbiinides põletatakse põhiliselt looduslikku maagaasi, kuid lisaks sellele võib põletada ka: a) tahke kütuse gaasistamisel saadavat gaasi ja b) spetsiaalseid vedelkütuseid (nt. metanool, toornafta, raskekütteõli, põlevkiviõli).<sup>3</sup>

Tabel 4 iseloomustab Maailma Energeetikanõukogu (World Energy Council – WEC) andmetel [2] arvestatavat maagaasi varu maailmas aastal 1995. Kui 1998. aastal toimunud WECi 17. maailmakongressil Houstonis räägiti palju energiaressursside nappusest maailmas, siis WECi 18. kongressil Buenos Aireses nimetati, et Maailmas

---

<sup>3</sup> (a) ja (b) kategooriatesse kuuluvate kütuste kasutamine on piiratud ning nende kasutamine sõltub nende keemilisest analüüsist ja gaasiturbiinist mida kasutatakse. Nimetatud kategooriatesse kuuluvaid kütuseid saab kasutada selleks ettenähtud spetsiaalsetes gaasiturbiinides, millel on suur põlemiskamber.

tervikuna pole mingit energiaressursside kriisi ja see ei ähvarda meid veel vähemalt 150-200 aasta jooksul (oma koht on siin ka maagaasil).

Gaasiturbiinis kasutatavate kütuste kasutamisel on oluliseks näitajaks kütuse koostis (vedelkütuste puhul eriti väävlisisaldus), mis avaldab otsest mõju gaasiturbiini efektiivsusele ja atmosfääriheitmetele.

Piirkondades kus gaasivarustus on piiratud või see puudub, on võimalik kasutada veeldatud gaasi, mille hind koos gaasi veeldamise ja transpordiga on kõrgem võrreldes gaasivõrgust saadava gaasi hinnaga.

**Tabel 4 Arvestatav maagaasi varu maailmas**

	Reserv (triljon m <sup>3</sup> )	Hinnanguline reserv aastates
Aafrika	10,116	49
Põhja Ameerika	9,017	13
Lõuna Ameerika	5,430	58
Aasia	8,729	43
CIS (koos Venemaaga)	56,006	>100
Euroopa	6,129	21
Kesk-Ida	44,843	>100
Okeaania	1,065	34
<b>Kokku</b>	<b>141,335</b>	–
<b>Maailma keskmine</b>	–	<b>81</b>

## 2. KÜTUSE ELEMENDID

1839. aastal vaatles Sir William Grove hüdrolüüsi protsessi, pistes kaks elektroodi vette, kus vesinik reageeris ühe ja hapnik teise elektroodiga, mille tulemusel tekkis elektroodide vahel elektri pinge. Sajand hiljem alustas kütuse elementide arendamist Francis Bacon. 1950-ndate lõpus litsentseeris Pratt and Whitney Aircraft Corporation (praegu United Technologies Corporation) Bacon'i tehnoloogia ja alustas ise selle arendamist eesmärgiga kasutada seda USA kosmose programmis.

Kütuse element on elektrokeemiline seade, kus elektritootmiseks kasutatakse vesinikku. Vesinikku saadakse aga keemilise protsessi tulemusel looduslikust gaasist, metaanist või teistest süsivesinikgaasidest.

Kui gaasi- ja auruturbiini ning sise põlemismootori efektiivsus on piiratud maksimaalse teoreetilise soojusjõuseadmete efektiivsusega, siis kütuse elementidel selline piirang puudub ning see on nende suurimaks eeliseks.

Gaasi- ja auruturbiiniga on kütuse energia muundamise kasutegur 25-47%, kus ülemine piir on saavutatav suurte seadmetega. Kütuse elementide kasutegur on 30-50%, mis üldjuhul pole seotud seadme suurusega. Kütuse elementide kombineerimisel gaasiturbiiniga on võimalik kasutegurit veelgi suurendada. Sellisel juhul on kasutegur kuni 70%.

Kütuse elementide eelised:

- liikuvate osade puudumise tõttu võivad töötada pikka aega ilma hoolduseta (palju kauem kui turbiin või mootor);
- liikuvate osade puudumise tõttu töötavad väga vaikselt;
- tahkekütusega elektrijaamadega võrreldes on atmosfääri paisatavate saasteainete tase suhteliselt madal

1990-ndate keskpaigaks polnud turul veel ühtegi kütuse elementi, kuid juba 1998. aastaks oli neid USA-sse, Jaapanisse ja Euroopasse kokku installeeritud 70 seadet.

## 2.1 Kütuse elementide tööprintsip

Kütuse elemendis toimuv keemiline protsess on võrreldav vesiniku ja hapniku põlemisel asetleidvaga. Viimasel juhul on põlemisreaktsiooni tulemuseks soojus. Kütuse elemendis toimuv keemiline protsess on kontrollitav ning väljundiks on elektrivool. Põlemisreaktsiooni tekitamiseks peavad vesiniku ja hapniku aatomid omavahel kokku puutuma. Aatomite kokku puutumisel vahetatakse elektrone. Kütuse elemendis on elektronidevahetus eraldatud aatomite omavahelise kokku puutumise protsessist elektrolüüdiga. Kuna elektronide vahetus ei saa toimuda läbi elektrolüüdi, toimub see läbi välimise elektrikontuuri, mis ühendab elektroode. Selle tulemuseks on kütuse elementide poolt toodetud elekter.

Tinglikult võib öelda, et elektri tootmiseks “põletab” kütuse element vesinikku ja hapniku. Vesiniku saamiseks tuleb teda toota looduslikust gaasist, metaanist või teistest

süsivesinikgaasidest, muundades CH vesiniku ja süsinikdioksiidi seguks. Kirjeldatud protsessi nimetatakse süsivesiniku reformatsiooniks. Reformatsiooni tulemusel tekib kindel kogus süsinikoksiidi, mis madalatel temperatuuridel saastab elektroode. Kõrgematel temperatuuridel on CO mõju elektrootodidele palju väiksem kuna kõrgetemperatuurilised kütuse elemendid utiliseerivad tekkinud CO kui kütuse.

Vahest väidetakse, et kütuse elemendid ei tooda CO<sub>2</sub>-te, mis on ka tõsi, sest kütusena kasutatakse vesinikku. Vesinikku toodetakse aga gaasist ning selles protsessis toodetakse sama kogus CO<sub>2</sub>-te kui gaasiturbiiniga sama koguse gaasi põletamisel. Mida suurem on kütuse elementide kasutegur seda vähem CO<sub>2</sub>-te toodetakse. Sama võrdlus kehtib ka kütuse elementide ja gaasiturbiinide omavahelisel võrdlusel. Kütuse elementide kõrgema kasuteguri tõttu toodetakse vähem CO<sub>2</sub>-te, kui gaasiturbiiniga.

## 2.2 Kütuse elementide tüübid

Elektri tootmiseks on välja arendatud peamiselt neli erinevat tüüpi kütuse elementi:

- fosforhappega kütuse element
- polümeermembraaniga kütuse element
- sula karbonaatidega kütuse element
- tahke oksiidiga kütuse element

### 2.2.1 Fosforhappega kütuse element

Fosforhappega kütuse elemendis (PAFC- phosphoric acid fuel cell) on elektrolüüdina kasutatud kontsentreeritud fosforhapet. PAFC töötab temperatuurivahemikus 150...200°C. 1980-ndate lõpus ja 90-ndate alguses katsetati mitmeid 40kW seadmeid, mille järel USA firma ONSI Corporation tõi turule esimese 200kW seadme mille elektriline kasutegur oli 36%. Lisaks elektrienergiale võib seadet kasutada ka sooja vee tootmiseks.

Vaikne töö ja madal atmosfääriheitmete tase võimaldavad PAFC-d kasutada elamute lähedal. Seade võib töötada ilma teeninduseta kuni 34 tuhat tundi. 1997. aastal oli PAFC võimsusühiku maksumus 3000USD/kW [3].

### **2.2.2 Polümeermembraaniga kütuse element**

Polümeermembraaniga kütuse elemendis (PEM- proton exchange membrane) on elektrolüüdiks polümeermembraan. PEM iseloomustatakse ka kui tahket kütuse elementi, kuid tegelikult sisaldab seade suurt kogust vett, ilma milleta seade ei tööta efektiivselt. PEM töötemperatuuriks on kuni 100°C, mistõttu nõuded kasutatavatele materjalidele ei ole nii suured kui kõrge töötemperatuuriga kütuse elementidel. Madalad temperatuurid põhjustavad aga elektrodide saastumist CO-ga.

Seadme kerge kaal võimaldab PEM-i kasutada edukalt autotööstuses. 1990-ndatel investeeris Daimler Benz Ballard'i programmidesse, et arendada PEM-il põhinevat automootorit [4].

1997. aastal lasti Ballard Generating Systems'i poolt kolme aasta pikkuseks katsetuseks käiku esimene 250kW-ne PEM prototüüp elektrienergia tootmiseks. Seadme kasutegur oli 40%.

PEM seadmeid saab käivitada väga kiirelt, mistõttu saab neid hästi kasutada hädaolukordades. Seadme maksumus on 500-1000 USD/kW (1998. aasta hinnatase).

### **2.2.3 Sula karbonaatidega kütuse element**

Sula karbonaatidega kütuse elemendis (MCFC- molten carbonate fuel cell) kasutatakse elektrolüüdina karbonaate, mis toatemperatuuril on tahkes olekus, kuid töötemperatuuril 650°C muutuvad vedelaks. Kõrge töötemperatuuri juures toimub vesiniku ja hapniku keemiline reaktsioon efektiivsemalt, mistõttu on ka kütuse elementide töö efektiivsem. Kasutataval temperatuuri tasemel põleb ka süsivesiniku reformatsiooni tulemusel tekkinud CO. Kõrge töötemperatuur esitab aga kõrgendatud nõuded kütuse elemendis kasutatavatele materjalidele.

Esimeseks demonstratsioon projektiks oli 1997. aastal 2MW-ne seade Santa Clara's Californias, mis töötas 4000h.

MCFC on palju efektiivsem kui PAFC. Seadmete võimsused on 1-20MW ning maksumus 3000 USD/kW. Toodangumahtude suurenemisel võivad hinnad langeda kuni kaks korda. Hinna poolest on seadmel raske konkureerida tavapärase elektritootmise tehnoloogiaga, kuid kohtades, kus on tingimuseks vaikne hääl ja madalad emissioonid, on nende kasutamine õigustatud.

### **2.2.4 Tahke oksiidiga kütuse element**

Tahke oksiidiga kütuse elemendis (SOFC- solid oxide fuel cell) kasutatakse elektrolüüdina stabiliseeritud keraamilist materjali tsirkooniumoksiidi. Et laetud hapniku aatomid läbiksid tahket elektrolüüti, peab viimast kuumutama temperatuurini 1000°C, mille juures saavutatakse hea juhitavus läbi elektrolüüdi. Kõrgest temperatuurist tingituna on esitatud kõrgendatud nõuded kütuse elemendis kasutatavatele materjalidele. Mitmetes uuringutes on püütud leida materjale, mis võimaldaksid alandada temperatuuri 800°C-le. Toodud temperatuur lubaks kasutada roostevabaterast SOFC konstruktsioonimaterjalina, samuti väheneks ka seadme hind.

Töötemperatuuril 1000°C on SOFC elektriline kasutegur 50%. Seadme kõrge temperatuurilist soojust on võimalik kasutada koostootmissüsteemis või gaasiturbiinis. SOFC kombineerimine gaasiturbiiniga (SOFC-GT) võimaldab saavutada seadme elektrilist kasutegurit isegi üle 70%.

Suurepäraseid tulemusi on andnud katsed, kus SOFC töötab rõhu all (15 ata). Sellisel juhul on seadet gaasiturbiiniga parem kombineerida, saades kõrgeima võimaliku kütuse energia muundamise kasuteguri.

SOFC-GT seadmete võimsused on 1-5MW ning maksumus 1000-1200 USD/kW.

Parimad tulemused SOFC seadmete arendamisel kuuluvad USA ettevõttele Westinghouse, kes on suunanud oma panuse torukujulise struktuuriga kütuse elementide arendusse.

### **2.3 Kütuse elementide mõju keskkonnale**

Kütuse elementide kasutamisel on väevli ja lämmastikuühendite emissioon äärmiselt madal, mistõttu on neid võimalik paigaldada elamute piirkonda. Tavapärase elektri tootmistehnoloogiatega võrreldes on kütuse elementide kasutegur kõrgem, mistõttu ka CO<sub>2</sub> emissioon on proportsionaalselt madalam.

### 3. SISEPÕLEMISMOOTORID

Peamiselt on kasutusel Otto- ja diiselmootoriga sise põlemismootorid. Olenevalt mootori tüübist kasutatakse peamiste kütustena bensiini, diiselmootoriga, gaasi, gaasistatud biomassi ja nn. prügimäegaasi (metaan).

Gaasimootorites kasutatakse gaasi süütamiseks süüteküünalt. Diiselmootorites soojendatakse aga õhk temperatuurini, mille juures kütus süttib silindrisse sisenemisel.

Sise põlemismootoreid võib kasutada elektrienergia ja soojuse koostootmiseks või ainult elektrienergia tootmiseks. Mootori ülekuumenemise vältimiseks tuleb kasutada mootorijahutust, kus soojust saab kasutada sooja vee tootmiseks. Kasutatakse ka mootori heitgaaside soojuse utiliseerimist, millega suureneb kütuse energia muundamise kasutegur veelgi. Mootorite elektriline kasutegur on 35...42%. Elektrienergia ja soojuse koostootmisel on võimalik saavutada kasutegur kuni 92%.

Sise põlemismootorite kombineerimisel auruturbiiniga on võimalik toota täiendavalt elektrienergiat, mille tulemusel saavutatakse elektriline kasutegur kuni 50%. Wärtila on teinud katsetusi kasutada kõrgetele temperatuuridele vastupidavaid materjale ning sihiks on seatud saavutada elektriline kasutegur kuni 55%.

Gaasimootorites põletatakse gaas suhteliselt lahja seguna, mistõttu NO<sub>x</sub> heitmed on väiksed. Kõrgete NO<sub>x</sub> heitmetega mootorite puhul kasutatakse heitmete vähendamiseks katalüsaatoreid. Gaasimootoritega võrreldes on diiselmootorite poolt atmosfääri paisatavate saasteainete hulk ja kogused suuremad. Gaasimootorite põhilisteks saasteaineteks on NO<sub>x</sub> ja CO<sub>2</sub>, milledele lisaks paiskavad diiselmootorid atmosfääri ka süsivesiniku ühendeid, süsinikoksiidi ja vääveldioksiidi. Raskekütteõli võib sisaldada 3-4% väävlit, mistõttu selle kasutamisel, diiselmootorites, on vajalik kütuse väävlit puhastamine.

Sise põlemismootoritele sobib kõige paremini ühtlane töörežiim. Pidevad käivitused ja seiskamised vähendavad remontide vahelist aega. Otto mootorite kasutamisel on töötundide arv kapitaalremondini 35000-55000 tundi, diiselmootoritel 25000-45000 tundi.

Kasutatavad ühikvõimsused on kuni 50MW. Näitena võib tuua 1999. aastal Lõuna-Indias käiku lastud 200MW jaamast, mis koosnes neljast 50MW seadmest [4]. Silindrite suurused on erinevatel mootoritel väga erinevad. Suurimad silindrid on tavaliselt diiselmootoritel. Üheksa silindrilisel 24MW diiselmootoril on silindri läbimõõt 800mm.



Aastatel 1995-1998 ehitatud 50-125MW diiselektrijaamade hinnad on vahemikus 1100-1300 USD/kW. Väiksemate diiselmootorite hinnad on veelgi kallimad.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. R. Kehlhofer, R. Bachmann, Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants, Second Edition 1999, Tulsa, Oklahoma, pp.298.
2. World Energy Council, Survey of Energy Resources, 1995, <http://www.worldenergy.org/>
3. Electric Power Research Institute.
4. Paul Breeze, Power Generation Technologies, Financial Times Energy, 1998, pp.160.
5. Wendt, Hartmut, Electrochemical engineering: science and technology in chemical and other industries, 1999, pp.250.
6. Modern Power Systems, January 1999, pp. 21-30.