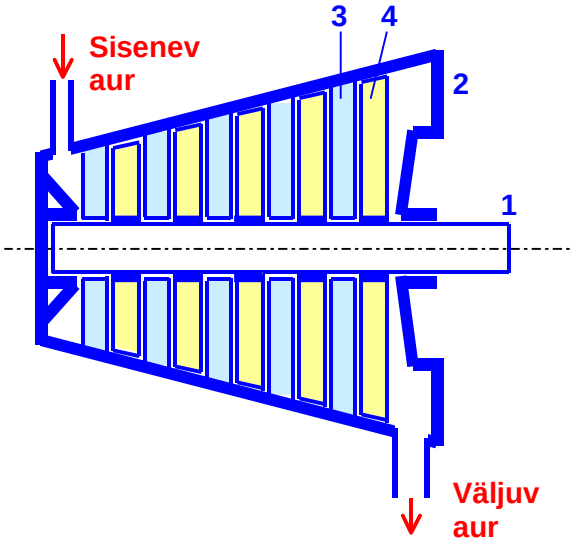
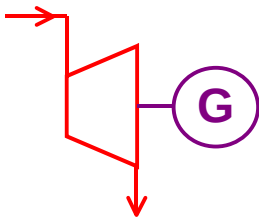
2.3 AURUTURBIINID

Auruturbiinis suunatakse ülekuumutatud aur düüside või ringikujuliselt paigutatud juhtlabade abil turbiini võllil ringikujuliselt paiknevatele töölabadele. Töölabadele toimiv jõud paneb turbiini tööratta pöörlema, kusjuures pöörlemissagedus on enamasti mõni tuhat pööret minutis. Turbiini levinuim ehituspõhimõte on lihtsustatult kujutatud joonisel **2.3.1**.



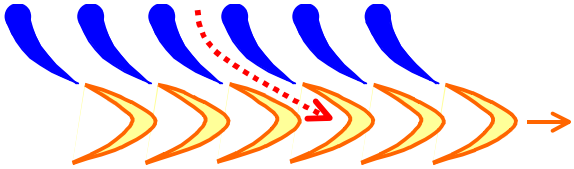
Joonis 2.3.1. Auruturbiini ehituspõhimõte. *1* rootori võll, *2* turbiini kere, *3* juhtlabad, *4* töölabad

Nii juht- kui ka töölabasid on labaderingi ümbermõõdul harilikult vähemalt mõnikümmend, järjestikuseid labaderinge (*astmeid*) võib olla mõnest kuni paarikümneni. Kuna aur energiat ära andes paisub, on turbiini kere (mida nimetatakse ka *silindriks*) laieneva koonuse kujuline. Turbiini koonusetaoline ehitus on leitud olevat otstarbekas kajastada ühtlasi turbiini tingmärgis (joonis **2.3.2**).



Joonis 2.3.2. Auruturbiini tingmärk koos sellega ühendatud generaatori tingmärgiga ja turbiini läbiva auru suuna näitamisega

Töölabadele toimiv jõud võib olla määratud aurujoa otsese rõhuga (*aktiivturbiin*) või labadelt põrkuva joa reaktiivtoimega (*reaktiivturbiin*). Joonisel **2.3.3** on kujutatud aktiivturbiini, joonisel **2.3.4** aga reaktiivturbiini labade ristlõike võimalik kuju.



Joonis 2.3.3. Aktiivturbiini juhtlabade (ülemine rida) ja töölabade (alumine rida) ristlõike kujunduse näide

Joonis 2.3.4. Reaktiivturbiini juhtlabade (ülemine rida) ja töölabade (alumine rida) ristlõike kujunduse näide

On ka turbiine, mis sisaldavad nii aktiiv- kui ka reaktiivastmeid (*aktiiv-reaktiivturbiinid*).

Mida kõrgemad on auru parameetrid (rõhk ja temperatuur) ja mida suurem on turbiini nimipöörlemiskiirus, seda väiksemad on ühelsamal võimsusel turbiini mõõtmed ja mass. Seetõttu püütakse valida valida auru parameetrid nii kõrged nagu seda lubab turbiini labade materjal, milleks enamasti on kuumuskindel eriteras. Pöörlemiskiirus on määratud käitatava masina nõutava kiirusega. Kütustpõletavates ja tuumaelektrijaamades kasutatakse auruturbiine sünkroongeneraatorite käitamiseks, mille pöörlemissagedus vahelduvvoolu sagedusel 50 Hz ja minimaalse võimaliku pooluste arvu (2 pooluse) korral on 3000 1/min. Tuumaelektrijaamades, kus auru parameetrid on madalamad, on sageli otstarbekam kasutada väiksemat pöörlemissagedust – 1500 1/min ja vastavalt neljapooluselisi generaatoreid.

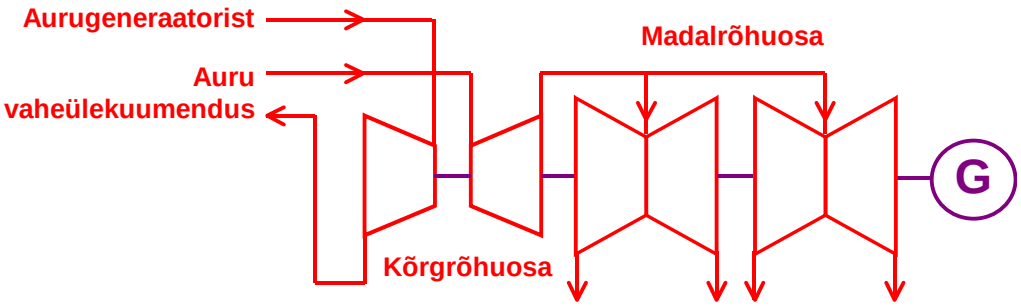
Pöörlevate masinate puhul eristatakse **pöörlemiskiirust** ja **pöörlemissagedust**. Esimest mõõdetakse radiaanides sekundis (rad/s) ja väga harva mõne muu nurga- ja ajaühiku jagatisena, teist pööretes sekundis (1/s) või minutis (1/min) ja harva mõne pikema ajaühiku kohta.

Põhja-Ameerikas ja ka muude maailmajagude mõnedes riikides on vahelduvvoolu sagedus 60 Hz ja generaatorite ning turbiinide pöörlemissagedus vastavalt enamasti 3600 1/min, mis võimaldab vähendada nii turbiinide kui ka generaatorite materjalimahukust võrreldes sagedusega 50 Hz. Turbiini materjalimahukuse vähendamiseks võidakse see mõnikord ette näha suuremale pöörlemissagedusele (nt 10 000 1/min) ja paigutada turbiini ja generaatori vahele reduktor.

Auruturbiinide põhikasutusala on soojuselektrijaamad, kus nende abil saadakse maailmas praegu ligikaudu 82 % kogu elektrienergiast. Valmistatakse neid, nagu ka nende juurde kuuluvaid generaatoreid (*turbogeneraatoreid*) võimsusega mõnest kilovatist kuni võimsuseni ligikaudu 1400 MW. Peale auruturbiinelektrijaamade leiavad nad kasutamist laevade ajamites ja (harvemini) mõnedes tööstuspaigaldistes.

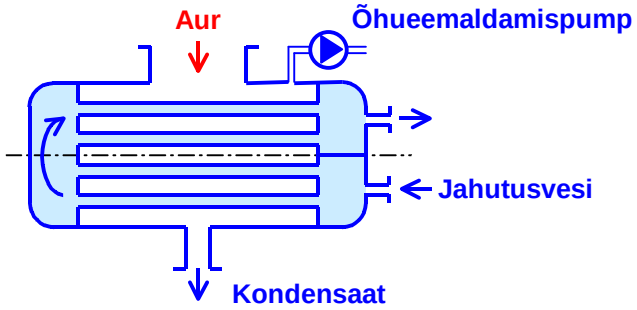
Maailma võimsaimad auruturbiinid on Palueli tuumaelektrijaamas Prantsusmaal. Nende võimsus on 1400 MW, siseneva auru rõhk 7 MPa ja aurutarve 7775 t/h.

Võimsad auruturbiinid võivad koosneda mitmest omavahel ühendatud osaturbiinist nagu see on kujutatud näiteks joonisel **2.3.5**.

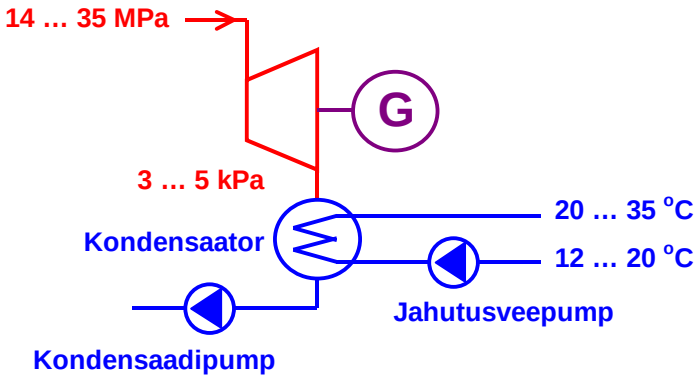


Joonis 2.3.5. Mitmeosalise auruturbiini ehitusskeemi näide

Auruturbiini järel aur enamasti kondenseeritakse (veeldatakse). Selliseid turbiine nimetatakse *kondensatsioonturbiinideks* ja nende juurde kuulub veega või (väga harva) õhuga jahutatav ***kondensaator***, mille ehituspõhimõte on kujutatud joonisel **2.3.6**. Külm jahutusvesi suunatakse läbi torude, mille pinnal aur kondenseerub. Nullilähedane rõhk (tavaliselt 3…5 kPa) saavutatakse jahutusvee piisavalt madala temperatuuriga. Kuna läbi turbiini madalamarõhulise osa tihendite satub aurutrakti mingil määral õhku, on kondensaator varustatud õhueemaldamispumbaga. Turbiini ja kondensaatori ühendusskeem on kujutatud joonisel **2.3.7**.



Joonis 2.3.6. Auruturbiini kondensaatori ehituspõhimõte

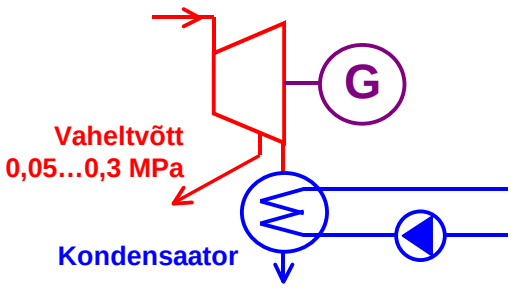


Joonis 2.3.7. Kondensatsioonturbiini ja kondensaatori ühendamisskeem. Aururõhu ja jahutusvee temperatuuri arvväärtused on esitatud näitena

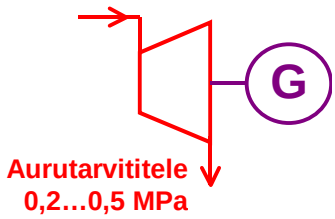
Kondensaatori jahutusveega viiakse ära soojus, mis vabaneb auru kondenseerumisel. Turbiini siseneva kuuma kõrgrõhulise auru energiast moodustab see nüüdisaegsetes soojuselektrijaamades tavaliselt ligikaudu 55 % ja seega võib kondensatsioonturbiini kasuteguriks lugeda neis jaamades ligikaudu 45 %. Auru madalamate parameetrite korral (näiteks tuumaelektrijaamades) võib turbiinagregaadi kasutegur olla veelgi madalam. Kasutegurit saab mõnevõrra tõsta kõrgrõhulise auru ühe- või mitmekordse vahe-ülekuumendusega, nagu see on kujutatud näiteks joonisel **2.3.5**.

Et kondensaatori jahutusvesi liigselt ei kuumeneks (see vähendaks turbiini kasutegurit), on selle kogus suhteliselt suur – 50 kuni 100 kg ühe kilogrammi auru kohta ehk 0,10…0,15 m^3 saadava elektrienergia iga kilovatt-tunni kohta. Kuna jahutusvesi soojeneb kondensaatoris ainult 15…20 K võrra, on selles sisalduva soojuse tehniline rakendamine raske ja enamasti juhitakse soojenenud vesi tagasi kas samasse veekogusse, kust see võeti, või (suletud jahutuskontuuri korral) jahutustorni, kus soojus viiakse ära jahutusõhuga.

Aurus sisalduvat energiat saab täielikumalt kasutada sel teel, et turbiini madalrõhuosast võetakse osa auru muude aurutarvitite (näiteks aurkütte või veekuumutite) toiteks (joonis **2.3.8**). Sellised turbiinid annavad nii mehaanilist energiat kui ka soojust (soojust seejuures enamasti 2…4 korda rohkem kui mehaanilist energiat). Neid nimetatakse ***vaheltvõtuturbiinideks*** ja kasutatakse elektri ja soojuse koostootmisjaamades, mida lähemalt kirjeldatakse jaotises **5.2**. Energia muundamise kasutegur on neis jaamades tavaliselt ligikaudu 60 %. Veel kõrgema kasuteguri (kuni 85 %) võimaldavad saavutada ***vasturõhuturbiinid***, milles kogu väljuv aur, enamasti rõhul 0,2…0,5 MPa, suunatakse tööstuslikele aurutarbijatele (joonis **2.3.9**).



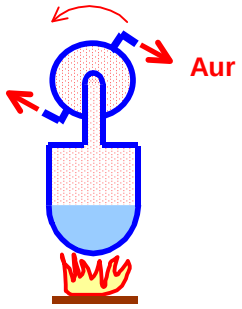
Joonis 2.3.8. Vaheltvõtu-auruturbiini põhimõte



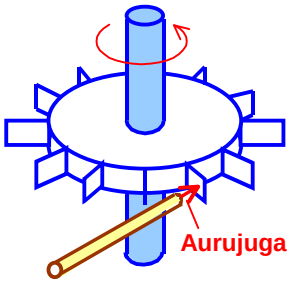
Joonis 2.3.9. Vasturõhu-auruturbiini põhimõte

Esimeseks auruturbiiniks (nimelt reaktiiv-auruturbiiniks) võib lugeda umbes aastal 100 kreeka teadlase Heroni poolt Aleksandrias leiutatud *Heroni kera* (joonis **2.3.10**), mis pandi katlas tekitatud auru toimel pöörlema [2.6]. Esimest **aktiivturbiini** (*aururatast*, joonis **2.3.11**), mis oli

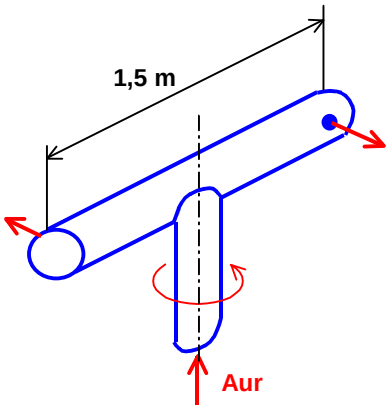
kasutusel pulbritampimismasina ajamina, kirjeldas oma raamatus aastal 1629 itaalia arhitekt Giovanni Branca (1571–1645) [2.7]. Aastal 1831 valmistas USA mehaanik William Avery T-toru taolise reaktiivturbiini (joonis **2.3.12**) ja kasutas seda saeveski ajamina, kuid see ei suutnud ei kasuteguri ega töökindluse poolest võistelda aurumasinaga. Auruturbiinide tegelik kasutamine algas aastal 1883, mil prantsuse päritolu rootsi insener ja tööstur Carl Gustaf de Laval (1845–1913) valmistas enda poolt varem leiutatud koorelahutajate käitamiseks üheastmelise aktiivturbiini, mille töörattale suunati düüsidest suure kiirusega (ülehelikiirusega) väljuv aur (joonis **2.3.13**). Mõne Lavali turbiini pöörlemissagedus oli kuni 42 000 1/min [1.15].



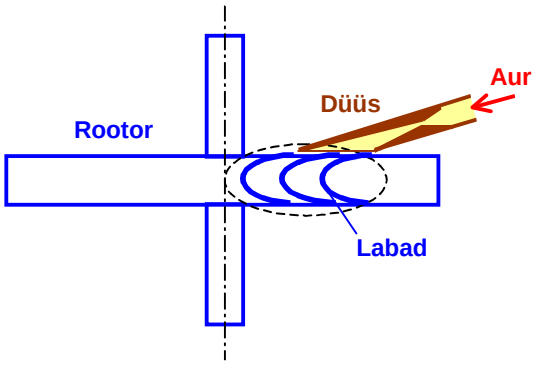
Joonis 2.3.10. Heroni kera



Joonis 2.3.11. G. Branca aururatas

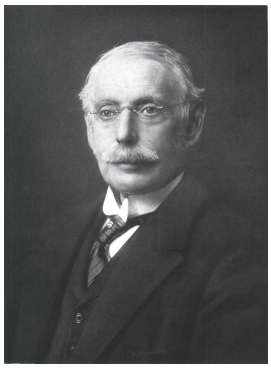


Joonis 2.3.12. W. Avery reaktiiv-auruturbiin



Joonis 2.3.13 C. G. de Lavali aktiiv-auruturbiini talitluspõhimõte

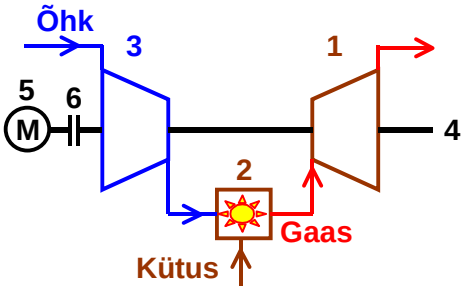
Aastal 1884 leiutas iiri päritolu inglise füüsik ja insener, ettevõtte *Clarke, Chapman, Parsons & Co.* elektrotehnikaosakonna juhataja Charles Algernon Parsons (1854–1931) mitmeastmelise reaktiiv-auruturbiini, mille ehitus vastas joonisel **2.3.1** esitatud põhimõttele (väljaarvatult vast see, et aur sisenes Parsonsi turbiini keskelt ja väljus otstelt) ja mille pöörlemissagedus oli 18 000 1/min [2.11]. Esimeste turbiinide võimsus oli 7,5 kW ja Parsons kasutas neid alalisvoolugeneraatori ajamina laevade elektervalgustuse toiteks pingel 100 V. Aastal 1890 paigaldas Parsons esimese kohtkindla turbogeneraatoragregaadi Newcastle'i elektrijaama, valmistas aastal 1892 esimese kondensatsioonturbiini ja ehitas aastal 1894 maailma esimese auruturbiin-sõukruviajami laeva nimega *Turbinia*, mis saavutas enneolematu sõidukiiruse 34 sõlme. Aastal 1896 patenteeris Prantsusmaal Saint-Etienne'i mäekõrgkooli professor Auguste Camille Edmond Rateau (1863–1930) aktiiv-auruturbiini, mis võis tõhusalt talitleda väiksematel kiirustel kui reaktiivturbiin, ja USA insener, Thomas Alva Edisoni kaastöötaja Charles Gordon Curtis (1860–1936) valmistas turbiini, milles osa astmeid olid aktiivsed, osa reaktiivsed (aktiiv-reaktiivturbiini); viimaste tootmine algas USAs aastal 1903. Kõik kolm turbiinitüüpi leidsid kiiresti rakendamist elektrijaamades ja laevaajamites, sest võrreldes seni kasutatud aurumasinatega olid nende mass ja ruumivajadus kuni 10 korda väiksemad, kasutegur kuni kolm korda kõrgem, pöörlemiskiirus elektrijaamade generaatoritele sobivam ning seejuures ideaalselt ühtlane jne. Pealegi sai neid valmistada palju suurema nimivõimsusega. Aastaks 1910 lõppes aurumasinate kasutamine soojuselektrijaamades täielikult.



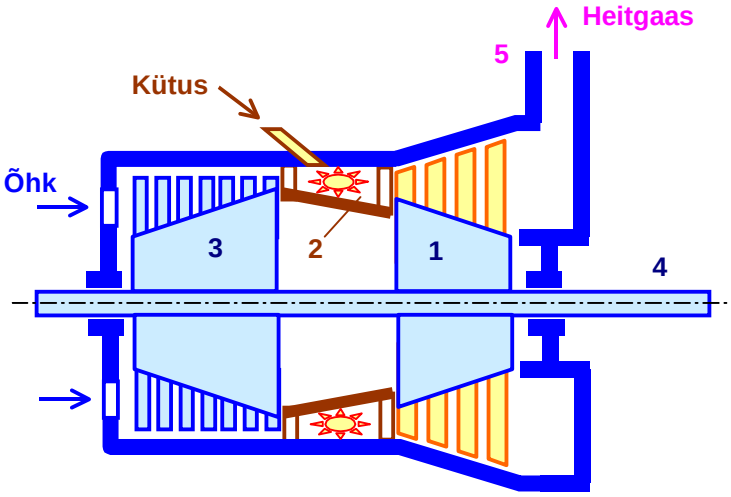
Charles Algernon Parsons

2.4 GAASITURBIINID

Gaasiturbiin sarnaneb oma ehituspõhimõttelt auruturbiiniga (vt joonis **2.3.1**). Erinevus on selles, et auru asemel paneb turbiini rootori pöörlema kütuse põlemisel tekkiv kõrgrõhuline gaas. Kütus põletatakse põlemiskambris, kuhu kõrge rõhu all sisestatakse nii kütus kui ka õhk, kusjuures õhu tihendamiseks vajalik kompressor on samal võllil turbiiniga või kuulub turbiini koostisse (joonised **2.4.1** ja **2.4.2**). Gaasi algrõhk on tavaliselt 0,6…1,2 MPa ja algtemperatuur kuni 900 ^{o}C (jahutatavate labade korral aga ka kuni 1600 ^{o}C). Turbiini ja kompressori pöörlemapanemiseks kasutatakse enamasti käivitus- (tavaliselt elektri-) mootorit.



Joonis 2.4.1. Gaasiturbiini põhimõtteskeem. *1* turbiin, *2* põlemiskamber, *3* kompressor, *4* võll, *5* käivitusmootor, *6* sidur

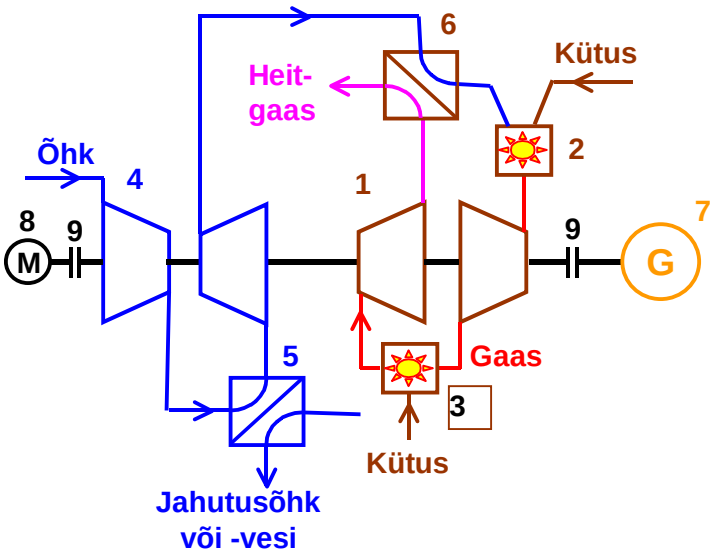


Joonis 2.4.2. Lihtsaima gaasiturbiini ehituspõhimõte (näide). *1* turbiin, *2* põlemiskamber, *3* kompressor, *4* võll, *5* heitgaasikanal

Turbiinist väljuva gaasi temperatuur (kuni ligikaudu 500 ^{o}C) ja kiirus on enamasti sedavõrd suur, et seda saab tõhusalt kasutada

- komprimeeritud õhu eelsoojendamiseks,
- aurugeneraatori kütteks koos saadava auru rakendamisega auruturbiinis (nt gaasiturbiin-auruturbiin- (*kombi*-) elektrijaamades),
- kuumaveekatla kütteks (nt elektri ja soojuse koostootmis-gaasiturbiinelektrijaamades),
- reaktiivjõu tekitamiseks (nt lennukite turboreaktiivajamites).

Kasuteguri tõstmiseks kasutatakse gaasiturbiinides sageli kütuse mitmejärgulist põletamist ja õhu mitmeastmelist komprimeerimist. Joonisel **2.4.2** on kujutatud kahe põlemiskambriga ja kaheastmelise kompressoriga nüüdisaegse statsionaarse gaasiturbiinagregaadi põhimõtteskeem. Esimesse põlemiskambrisse juhitava õhu kogus on piisav, et tagada kütuse põlemine mõlemas põlemiskambris.



Joonis 2.4.3. Mitmeastmelise gaasiturbiinagregaadi põhimõtteskeem.
1 **turbiin,** ***2*** **esimene põlemiskamber,** ***3*** **vahepõlemiskamber,** ***4*** **kompressor,** ***5*** **õhu vahejahuti,** ***6*** **õhu eelkuumuti,** ***7*** **elektrigeneraator,** ***8*** **käivitusmootor,** ***9*** **sidur**

Elektrijaamades ja varu-elektrivarustusagregaatides kasutatakse gaasiturbiine võimsusega 0,5 kuni 400 MW. Võrreldes auruturbiinidega seisnevad nende eelised

- aurukatla ärajäämises,
- vajaduse puudumises vee järele,
- kiires käivitamises (olenevalt võimsusest, mõne sekundi kuni mõne minuti jooksul),
- väikestes mõõtmetes ja väikeses ruumivajaduses (võrreldes aurukatlast ja auruturbiinist koosneva energiaallikatega on gaasiturbiini jaoks vajalik ruumala ligikaudu 200 korda väiksem),
- heitgaaside väiksemas kahjulikus toimes keskkonnale.

Gaasiturbiini puudusteks võrreldes auruturbiiniga on kallimate kuumuskindlate materjalide (eriteraste ja -sulamite) kasutamine, suurem maksumus, labade ning muude aktiivosade kiirem kulumine ja seetõttu sageda regulaarse hooldamise vajadus ja väiksem eluiga (tavaliselt mitte üle mõnekümne tuhande tunni). Energiakaod gaasiturbiinis ei ole tavaliselt üle 15 %. Turbiinist ja kompressorist koosneva ühtse agregaadi kasutegur, arvestades ka kompressori poolt tarbitavat võimsust, on aga võllil saadava mehaanilise võimsuse järgi enamasti 25…40 % ja seega mõnevõrra madalam kui aurukatlast ja auruturbiinist koosneva energiaallika puhul. Turbiini heitsoojuse ärakasutamisel (nt elektri ja soojuse koostootmisjaamades) võib kasutegur olla kuni 60 %.

Gaasiturbiinelektrijaamad sobivad kasutamiseks veevaestes regioonides (nt Araabia poolsaare riikides) ja kiiresti käivituvate tipukatte- või varuenergiaallikatena. Peale elektrigeneraatorite võivad gaasiturbiinid käitada ka muid masinaid. Väga levinud on nad nt naftarafineerimistehastes ja maagaasi-toruliinidel kompressorite ajamitena.

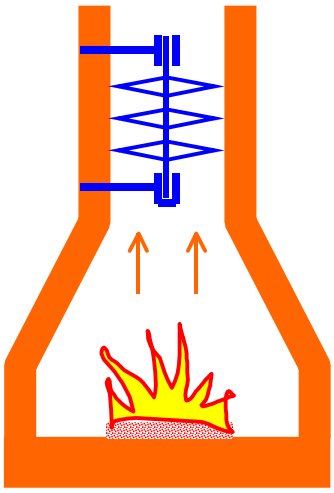
Gaasiturbiine võimsusega kuni mõnikümmend megavatti kasutatakse tõhusalt ka lennukite, laevade ja vedurite ajamites; kütuseks on neil juhtudel enamasti petrool. Lennukiturbiinides tekitatakse veojõud osalt turbiiniga kokkuehitatud tiiviku, osalt reaktiivtoimeliste heitgaasidüüside abil. Võrdlemisi harva on gaasiturbiinid kasutusel autodel.

Maailma suurimal, 555 reisijakohaga reisilennukil *Airbus A380*, mis sooritas oma esimese lennu aastal 2005, on 4 turboreaktiivmootorit *Trent 900* (valmistaja – Suurbritannia firma *Rolls-Royce*), millest igaüks tekitab veojõu 400 kN. See vastab võimsusele ligikaudu 30 MW. Lennuki petroolikulu 100 reisijakilomeetri kohta on veidi alla 3 liitri, mis on väiksem kui senistel lennukitel [2.12].

Vajaduse korral (nt kantavate generaatoragregaatide ja mitmesuguste väikemehhanismide jaoks) saab gaasiturbiine valmistada ka väga väikese võimsusega, nt mõnest vatist mõne kilovatini.

Kütusena kasutatakse gaasiturbiinides enamasti põlevgaase (nt maagaasi) või vedelkütuseid (nt juba mainitud petrooli). On olemas aga ka tahkel kütusel toimivaid gaasiturbiine, kuid sel juhul kuumutatakse kütuse põletamise teel mingit inertset või suhteliselt inertset gaasi (enamasti heeliumi, lämmastikku või õhku), mis suunatakse turbiini ja ringleb kinnises kontuuris.

Esimese seadme, mida võib nimetada gaasiturbiiniks, visandas aastal 1500 Leonardo da Vinci. Nimelt pani ta ette paigutada kamina kohale korstna algusesse, tõusvasse suitsugaasivoolu, järjestikku mitu ühel võllil paiknevat tiivikut, mis võiksid panna pöörlema näiteks praevarda (joonis **2.4.4**). Selle idee realiseeris aastal 1648 inglise mehaanik John Wilkins, kuid eriti laia rakendamist see ei leidnud [2.7].



Joonis 2.4.4. Leonardo da Vinci gaasiturbiini idee

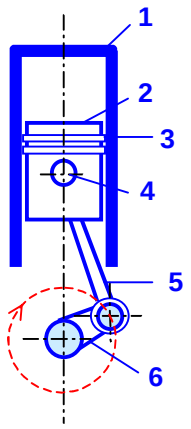
18. ja 19. sajandil tehti mitmeid katseid gaasiturbiini valmistamiseks, kusjuures joonisel **2.4.1** kujutatud skeemi realiseeris aastal 1872 saksa insener F. Stolze. Ühelgi nendest katsetest ei õnnestunud saada turbiinilt kasulikku võimsust. Esimese kasulikku võimsust andva gaasi-turbiini valmistas aastal 1903 Norra insener Ægidius Elling (1861–1949), keda peetaksegi nüüdisaegse gaasiturbiini leiutajaks [2.13]. Aastal 1905 ehitasid prantsuse insenerid Marcel

Armengaud ja Charles Lemale Lavali auruturbiini (vt joonis **2.3.13**) ümber gaasiturbiiniks ja saavutasid esmakordselt turbiini majanduslikult vastuvõetava talitluse [1.15]. Aastal 1926 alustas inglise lennuväeohvitser Frank Whittle (1907–1996) uuringuid eesmärgiga rakendada gaasiturbiine lennukiajamina, kuna need võimaldaksid lennukiirust oluliselt suurendada. Esimese reaktiivmootori patenteeris ta aastal 1930 ja pärast mitu aastat kestnud maapealseid katsetusi tõusis aastal 1941 õhku Suurbritannia esimene reaktiivlennuk. Samas suunas töötas Saksamaal alates aastast 1936 insener Hans Joachim Pabst von Ohain (1911–1998), kelle väga kompaktse gaasiturbiiniga maailma esimene reaktiivlennuk valmis aastal 1939. 1930ndail aastail täiustusid ka statsionaarsed gaasiturbiinid ja aastal 1939 paigaldas Šveitsi firma *Brown, Boveri & Cie.* Neuenburgi varuelektrijaama esimese gaasiturbiin-generaator-agregaadi võimsusega 4 MW. Aastal 1947 pandi Suurbritannia mereväes (*Royal Navy*) esimene gaasiturbiin ühele kahuripaadile ja seejärel algas nende turbiinide edukas kasutamine ka muudel laevadel. Esimese gaasiturbiinveduri valmistas aastal 1948 USA kontsern *General Electric* ja esimese gaasiturbiinauto samal aastal inglise firma *Rover*.

Lennukite gaasiturbiine, mis on oma ressursi õhus ammendanud, saab edasi kasutada maapealsetes rakendustes, sealhulgas elektrigeneraatorite käitamiseks. Ka Saaremaa Jaotusvõrgus (Kuressaares) oli aastail 1985…2000 varutoiteallikana kasutusel turbopropellerlennuki An28 gaasiturbiin koos generaatoriga, mille elektriline võimsus oli 3,2 MW. Seni on see jäänud ainsaks Eestis ülesseatud gaasiturbiin-generaator-agregaadiks.

2.5 KOLBMOOTORID

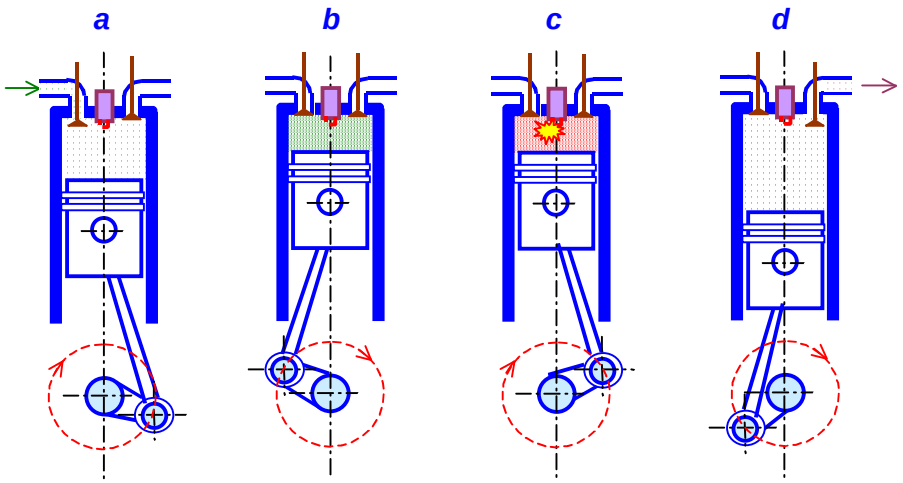
Kolbmootorid põhinevad teatavasti kolvi liikumisel silindris, kusjuures enamasti on see liikumine vahelduvasuunaliselt kulgev ja muundatakse kepsu ja väntvõlli abil pöörlevaks (joonis **2.5.1**).



Joonis 2.5.1. Kolbmehhanismi põhiosad. *1* silinder, *2* kolb, *3* kolvirõngad (kolvi ja silindri vahelise pilu tihendamiseks), *4* kolvisõrm, *5* keps, *6* väntvõll

Kõige laiemalt on sellest mootoriliigist nüüdisajal kasutusel **sisepõlemismootorid**, milles mehaaniline energia tekitatakse gaasilise või vedela kütuse ja õhu segu plahvatuslikul süütamisel. Enamasti on sellised mootorid **neljataktilised**, s.t nende igas töötsüklis toimub järjekorras

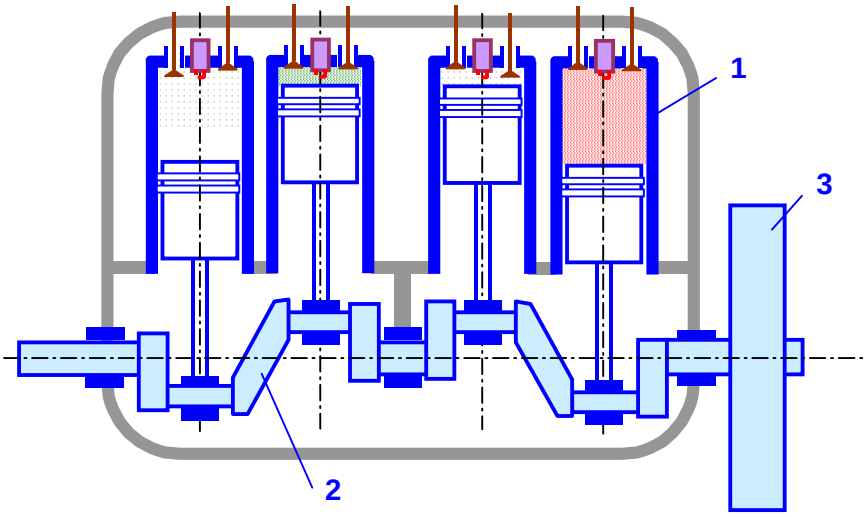
- kütuse ja õhu segu sisselase,
- küttesegu komprimeerimine,
- küttesegu süütamine ja plahvatuslik paisumine koos kolvile toimiva jõu tekkega,
- kütuse põlemissaaduste (heitgaasi) väljalase.



Joonis 2.5.2. Neljataktilise kolbmehhanismi talitluspõhimõte.
1 **sisselasketakt,** ***2*** **komprimeerimistakt,** ***3*** **töötakt,** ***4*** **väljalasketakt**

Nagu näitab joonis, teeb väntvõlli iga töötsükli (4 takti) jooksul kaks pööret, kusjuures energiat saadakse ainult 0,5 pöörde ajal. Seetõttu vajab ühesilindriline mootor, et käiku ühtlustada ja mittetöötakte ületada, kindlasti **hooratast**. Enamasti kasutatakse aga käigu ühtlustamiseks ja mittetöötaktide ületamiseks mitut (enamasti vähemalt nelja) silindrit mis toimivad ühelesamale väntvõllile (joonis **2.5.3**). Valmistatakse kuni 16 silindriga, kuid on püütud valmistada ka 32 silindriga kolbmootoreid.

Peale neljataktiliste toodetakse ka kahetaktilisi sisepõlemismootoreid, mille töötsükkel toimub 1 pöörde jooksul. Esimene takt (töötakt) seisneb komprimeeritud küttesegu süttimises ja kolvi allaliikumises, teine takt – põlemissaaduste väljalaskes ning uue küttesegu sisselaskes ja komprimeerimises.



Joonis 2.5.3. Neljasilindrilise neljataktilise kolbmootori ehituspõhimõte.
1 **silindriplokk,** ***2*** **väntvõll,** ***3*** **hooratas (võib ka puududa)**

Elektrilise sädesüütega kolbmootorites, mis on kujutatud joonistel **2.5.1** kuni **2.5.3**, kasutatakse kütusena enamasti bensiini, etanooli (etüülalkoholi, C_2H_5OH), nende segu või süsivesinikgaase (nt maagaasi või propaani). Suhteliselt harva on kasutusel vesinik. On kasutatud ka puidu gaasistamisel saadavat gaasi. Kõige sagedamini kasutatakse selliseid mootoreid sõiduautodel, kus nende võimsus võib olla kuni ligikaudu 250 kW ja erimass 2…4 kg/kW. Väntvõlli pöörlemissagedus on enamasti 3000…5500 1/min. Kiiruse reguleerimiseks ühendatakse mootor enamasti reduktoriga (käigukastiga). Kestval talitlusel nimikoormusega võib selliste mootorite kasutegur olla 30…40 %, talitlemisel muutuva koormusega on see aga ligikaudu 15 %. Bensiinimootoreid kasutatakse ka muudel sõidukitel (mootorratastel, mootorpaatidel jms) ning väikemehhanismides (mootorsaagides, muruniitjates jms). Neid saab kasutada ka kantavates elektrigeneraatoragregaatides, mida valmistatakse võimsusega mõnest kilovatist mõnekümne kilovatini.

Esimesteks kolbmootoriteks olid **aurumasinad**, mille arengulugu on käsitletud jaotises **2.2**. 19. sajandi esimesel poolel patenteeriti ka mitmeid ligikaudu samasuguse ehitusega sisepõlemismootoreid, mis aga ei leidnud tegelikku kasutamist. Esimese kasutuskõlbuliku sisepõlemis-kolbmootori valmistas aastal 1860 prantsuse insener Jean Joseph Étienne Lenoir (1822–1900); rõhtsa silindriga, elektrilise sädesüütega mootor võimsusega 9 kW talitles valgustusgaasi ja õhu segul, sarnanes oma ehituselt kahepoolse toimega aurumasinaga ja selle kasutegur oli ligi 5 %. Vaatamata madalale kasutegurile ja mitmele muule puudusele hakati seda mootorit tööstuslikult tootma, sest see oli aurumasinaist tunduvalt kompaktsem ja ohutum. Aastal 1862 valmistas saksa mehaanik ja ettevõtja Nikolaus August Otto (1832–1891) täiuslikuma, püstse silindriga gaasimootori ja asutas nende tootmiseks oma ettevõtte. Aastal 1876 leiutas ta neljataktilise gaasil või piiritusel talitleva mootori, mis osutuks sedavõrd tõhusaks, et kõiki nelja- ja kahetaktilisi sundsüütega, kerge vedelkütusega või gaasiga töötavaid sisepõlemismootoreid hakati nimetama **ottomootoriteks**. Esimese bensiinimootori (pöörlemissagedusega 800…900 1/min) valmistas aastal 1883 Otto tehases töötav masinaehitusinsener Gottlieb Daimler (1834–1900) ja esimese automootori ning auto aastal 1885 saksa insener ja ettevõtja Carl Friedrich Benz (1844–1929). Nüüdisaegse kõrgepingelise elektrilise süütesüsteemi töötas aastal 1902 välja saksa mehaanik ja ettevõtja Robert Bosch (1861–1942), kellelt pärinevad ka paljud muud liiklusvahendite elektriseadmete täiustused. Elektrilise starteri leiutas aastal 1911 USA insener Charles Kettering (1876–1958). [1.15]

Bensiini põlemisomaduste parandamiseks (detoneerimise ehk *kloppimise* vältimiseks) hakati sellele aastal 1923 USA firma *General Motors* keemiku Thomas Midgley (1889–1944) poolt väljatöötatud menetlusel lisama tetraetüülpliid $(C_2H_5)_4Pb$ (ligikaudu 1 cm^3 iga liitri bensiini kohta). Autode heitgaasides eraldus vastavalt ligikaudu 1 g pliioksiidi PbO iga liitri kasutatud bensiini kohta, mis tõi endaga kaasa õhu, pinnase ja veekogude ulatusliku mürgitamise. Ainuüksi USAs arvatakse olevat sattunud sel teel keskkonda 20. sajandi jooksul 7 Mt pliid [2.14]. Eriti mürgitatud on autoteede äärealad kauguseni kuni mõnisada meetrit. Inimeste sagenenud terviserikete ning keskkonnakahjulikkuse tõttu lõpetati selle lisandi kasutamine enamikus riikides järk-järgult aastail 1970…1990. Euroopa Liidus tervikuna on pliid sisaldav bensiin keelatud alates 1. jaanuarist 2000.

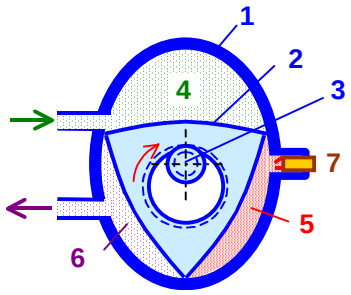
Diiselmootoris, mille leiutas aastal 1892 saksa insener Rudolf Diesel (1858–1913), saavutatakse õhu komprimeerimisel sedavõrd kõrge temperatuur, et sissepritsitav kütus süttib. Tänu elektrilise süütesüsteemi äralangemisele on diiselmootori ehitus lihtsam ja selles saab kasutada raskemaid ning mõnevõrra odavamaid *diislikütuseid*. Viimaseid saadakse enamasti nafta krakkimise teel, kuid naftasaaduste kallinemise ja naftavarude ammendumisohu tõttu on viimasel ajal järjest sagedamini hakatud kasutama õlitaimedest (nt rapsist või sojast) saadavat kütust (*biodiislikütust*). Nagu bensiinimootorid, nii ka diiselmootorid on tavaliselt mitmesilindilised, kusjuures peaaegu võrdsel määral on levinud nii nelja- kui ka kahetaktilised mootorid. Diiselmootorid on kasutusel eeskätt veoautodel, autobussidel, veduritel, laevadel, tankidel ja elektrijaamades, kuid küllalt sageli ka sõiduautodel (näiteks Euroopas on diiselmootoriga varustatud ligikaudu 1/3 kõigist sõiduautodest). Automootorite

võimsus võib olla kuni mõnisada kilovatti, vedurimootoreid valmistatakse võimsuseni kuni 6 MW, laevamootoreid võimsuseni kuni 80 MW. Diiselmootorite kasutegur on mõnevõrra kõrgem kui bensiinimootoritel (kuni 42 %), erimass aga mõnevõrra suurem (2,8…6 kg/kW).

Elektrijaamades kasutatakse diiselmootorist ja generaatorist koosnevaid agregaate võimsusega mõnekümnest kilovatist mõnekümne megavatini niihästi pidevtalitluses kui ka tipukatte- ja varutoiteallikatena. Väga levinud on automaatselt (mõne sekundi kuni mõne minuti jooksul) käivituvad töökindlad diisel-varutoiteallikad vastutusrikaste elektritarbijate (haiglate, pankade, lennujaamade, raadio- ja televisioonijaamade jms) elektrivarustussüsteemides.

R. Diesel patenteeris oma mootori aastal 1893 ja esitles seda edukalt Pariisi maailmanäitusel aastal 1900. Pärast seda algas Saksamaa mootoritehas *MAN* (*Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg*) diiselmootorite seeriatootmine ja juba aastal 1903 hakati neid paigaldama laevadele. Aastal 1904 paigaldas see firma maailma esimese diiselmootorgeneraatori Kiievi elektrijaama ja valmistas aastal 1923 maailma esimese diiselveoauto. Esimese diiselsõiduauto võttis tootmisse aastal 1934 saksa firma *Mercedes-Benz* [1.15].

Vahelduvasuunaliselt kiiresti liikuvad kolvid põhjustavad paratamatult mootori vibratsiooni. Selle puuduse vältimiseks on ette pandud valmistatada pöörleva kolviga (rootor-) mootoreid, mille hulgas on levinuim saksa inseneri Felix Heinrich Wankeli (1902–1988) aastal 1924 leiutatud ***vankelmootor***. Selle mootori kolmetahuline kolb pöörleb ekstsentriliselt ovaalse (täpsemalt öeldes *epitrohhoidse*) ristlõikega silindris ja paneb üle oma sisehammastuse pöörlema mootori võlli (joonis **2.5.4**).



Joonis 2.5.4. Vankelmootori ehituspõhimõte. *1* silinder, *2* rootor, *3* võll, *4* kompressioonikamber, *5* süütekamber, *6* väljalaskekamber *7* süüteküünal

Rootori ristlõige (*Reuleaux' kolmnurk*) on valitud selliselt, et selle servad libisevad mööda silindri sisepinda, moodustades kolm muutuva mahuga kambrit. Igal rootori tahul toimub igal täispöördel üks neljataktiline töötsükkel ja seega tuleb rootori iga pöörde kohta 3 töötsüklit. Rootori suhtes ekstsentriline võll teeb tavaliselt 3 pööret rootori iga pöörde kohta. Vankelmootori käik on ühtlasem kui kui edasi-tagasi liikuvate kolbidega mootoreil, vibratsioon puudub peaaegu täielikult ja erimass on ligikaudu kaks korda väiksem. Kütuseks on enamasti bensiin, kuid valmistatakse ka diislikütusel talitlevaid mootoreid. Kahe- kuni kuuesilindrilisi vankelmootoreid võimsusega kuni 200 kW on kasutatud eeskätt sõidu- ja sportautodel, väiksemaid aga mootorratastel ja kartautodel. Vankelmootori olulisim puudus on kütuse ebatäielikum põlemine ja seetõttu kahjulike komponentide suurem kogus heitgaasides ning kütuse suurem kulu. Silindri sisepinna kattes ja rootori servades tuleb kasutada kulumiskindlaid erimaterjale, mis teeb mootori suhteliselt kalliks.

Kuna lihtsaid vankelmootoreid saab valmistada väga väikese nimivõimsusega, on neid hakatud kasutama elektrilistes pisitoiteallikates alates võimsusest 0,1 W.

Sisepõlemismootoreis muundub tavaliselt 60…80 % kütuse keemilisest energiast soojuseks. Kuigi suurem osa kaosoojusest eraldub heitgaasidega, vajavad nad intensiivset õhk- või vesijahutust. Ühtlasi saab aga statsionaarsete mootorite jahutusõhku ja -vett kasutada nt ruumide kütteks, tööstusettevõtetes mõnikord aga ka tehnoloogilistes protsessides vajaliku auru tootmiseks. Viimasel juhtumil võib nt diisel-koostootmis-elektrijaama kasutegur tõusta ligi 90 protsendini.

Aastal 1998 ehitas firma *Siemens* Saksamaa riigipäevahoonele diisel-koostootmiselektrijaama, mille elektriline võimsus on 1600 ja soojusvõimsus 1840 kW ja mille juurde kuulub kogukas maa-alune suvist soojuse ülejääki vastuvõttev soojussalvesti. Jaama aastane kasutegur on ligikaudu 90 % [2.15].

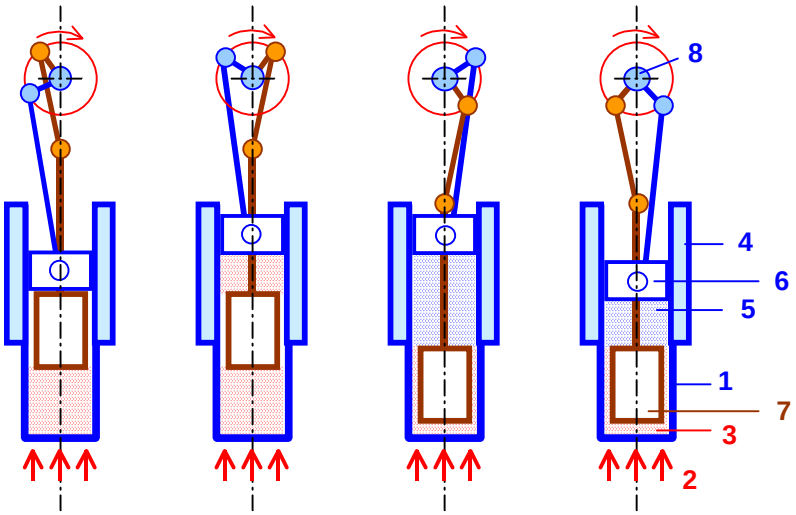
Nii bensiini- kui ka diiselmootorite üks suurimaid puudusi on **heitgaasid**. Kuna kummagi mootoriliigi kütuses on ligikaudu 85 % süsinikku ja 15 % vesinikku, on selle loomulikeks põlemissaadusteks süsinikdioksiid CO_2 ja veeaur H_2O, mis mõlemad kujutavad endast *kasvuhoonegaase* (vt jaotis **7.2**). Peale selle sisaldavad heitgaasid aga ka keskkonna- ja terviseohtlikumaid komponente, mille hulgas on

- süsinikoksiid (vingugaas) CO kütuse mittetäieliku põlemise tõttu,
- vääveldioksiid SO_2 kütuste väävlisisalduse tõttu,
- lämmastikoksiidid NO_x õhulämmastiku reageerimise tõttu kõrgel temperatuuril hapnikuga,
- bensool C_6H_6 , mis tekib mittetäielikul põlemisel ja mis võib põhjustada vähki ning tuua kaasa vere- ja pärilikkuskahjustusi,
- mitmesugused muud põlemata jäänud lenduvad süsivesinikud,
- diiselmootorite puhul peale selle veel *diislinõgi* – ülipeenteralised põlemata kõrgmolekulaarsed polütsüklilised osakesed, mis tekivad peaasjalikult õhuvaegusest sõidukite kiirendamisel ja mis kuuluvad eriti ohtlike kantserogeensete ainete hulka.

Lähemalt käsitletakse nii neid kui ka teisi saasteaineid ning nende emissiooni vähendamise võimalusi käesoleva raamatu jaotises **7.4**.

Välise küttega kolbmootorite hulgas on levinuim inglise vaimuliku Robert Stirlingi (1790–1878) aastal 1817 leiutatud ***stirlingmootor***, mis põhineb kinnises silindris oleva gaasi (õhu, vesiniku, heeliumi vm) perioodilisel kuumutamisel ja jahutamisel koos selle juhtimisega vaheldumisi kuuma ja külma ruumi (joonis **2.5.5**).

Joonisel kujutatud stirlingmootori silindris on kaks omavahel kooskõlastatult liikuvat kolbi – töökolb, mis annab kuumutatava gaasi paisumistöö edasi väntvõllile või muule mehhanismile, ja väljatõrjekolb, mis suunab kuuma paisunud gaasi seejärel jahutatavasse külma ruumi. Pärast gaasi mahajahutamist suunatakse see väljatõrjekolvi abil uuesti kuumutatavasse ruumi. Joonisel kujutatud väntvõlli asemel on kasutusel ka teisi mehhanisme, nt paarishammasrattaid, mis samuti tagavad mõlema kolvi sünkroniseeritud liikumise. Valmistatakse ka stirlingmootoreid, mille kuum ja külm ruum paiknevad eraldi, omavahel toruga ühendatud silindreis.



Joonis 2.5.5. Lihtsaima stirlingmootori ehitus- ja talitluspõhimõte. *1* silinder, *2* kuumuti, *3* kuum ruum, *4* jahuti (nt veesärk), *5* külm ruum, *6* töökolb, *7* väljatõrjekolb, *8* väntvõll

Stirlingmootor talitleb seda tõhusamalt, mida suurem on silindri kuuma ja külma ruumi temperatuuride vahe. Seetõttu kasutatakse jahutamiseks mõnikord eriti madalatemperatuurilisi *krüovedelikke*. Silindri kuumutamine võib toimuda mingi kütuse leegiga, kuid võidakse kasutada ka nt kontsentreeritud päikesekiirgust, geotermaalsoojust ja radioaktiivseid isotoope (nt plutooniumi). Stirlingmootori silindris on gaasirõhk palju madalam kui sisepõlemismootorites, mistõttu selle ehitus on lihtsam, kuid mõõtmed enamasti mõnevõrra suuremad. Stirlingmootorite eeliste hulka kuulub ka vaikne käik, mistõttu nad on leidnud kasutamist allveelaevades. Neid valmistatakse nimivõimsusega kuni ligikaudu 100 kW ja kasutatakse paigaldistes, milles nõutakse võimalikult suurt lihtsust ja töökindlust. Ühtlasi võimaldavad nad kasutada kütuseid, mis sisepõlemismootoreis ei tule kõne alla (nt biogaasi).

Stirlingmootor, mis algselt oli kavandatud lõhkeohtlikeks osutunud aurumasinate asendamiseks, on viimaseil aastail leidnud järjest sagedamat rakendamist ka elektroenergeetikas. Nii näiteks hakkas aastal 2005 Lõuna-Saksamaal asuv ettevõte *Sunmachine Vertriebsgesellschaft* turustama üksikehitiste jaoks mõeldud, puidugraanulitega köetavatel stirlingmootoritel põhinevaid mini-koostootmisjaamu elektrilise võimsusega 5 kW, soojusvõimsusega 15 kW, kasuteguriga 90 % ja hinnaga 23 000 eurot, pidades neid seoses elektri- ja soojusvõrkudest saadava energia pideva kallinemisega täiesti konkurentsivõimelisteks suurte energiaettevõtetega [2.16]. Aastal 2006 teatas energiasüsteem *Southern California Edison* kavast rajada 500 MW võimsusega päikeseelektrijaam, milles päikesekiirgus keskendatakse paraboloidpeeglite abil 20 000 stirlingmootorile, mis käitavad generaatoreid võimsusega à 25 kW [2.17].

Nii sisepõlemis- kui ka välisküttega mootorid vajavad käivitamiseks lisajõuallikat, milleks enamasti on elektrimootor (starter), kuid kohtkindlates paigaldistes leiavad kasutamist ka suruõhumootorid. Väiksemaid, nt mootorratta- ja paadimootoreid saab käivitada ka inimjõul.