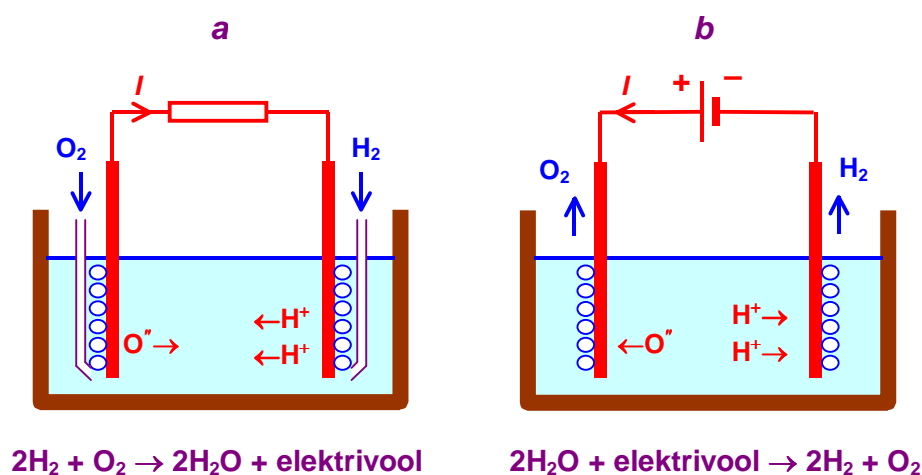


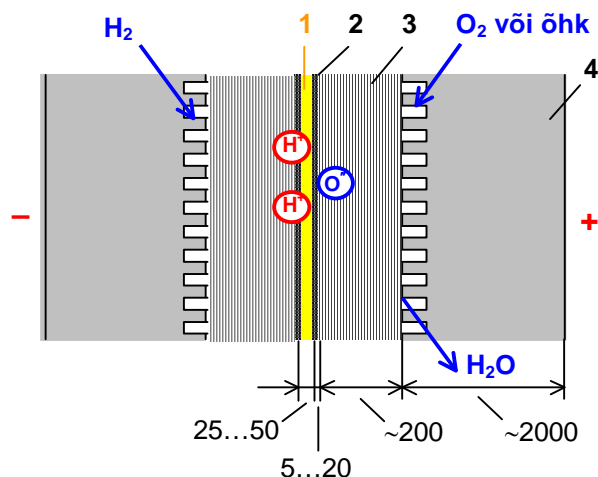
2.6 KÜTUSEELEMENDID

Kütuseelemendiks nimetatakse galvaanielementi, mis muundab omavahel reageerivate ainete keemilise energia elektrienergiaks, kuid mis erineb primaar-galvaanielemendist selle poolest, et reagente antakse sellesse pidevalt juurde. Lihtsaim kütuseelement põhineb vesiniku ja hapniku elektrolüütilisel ühinemisel pärast nende ioniseerimist sellekohasest materjalist valmistatud elektroodidel (joonis 2.6.1,a). Sellist reaktsiooni võib nimetada vee elektrolüüsi (joonis 2.6.1,b) pöördnähtuseks. Mõlemad reaktsiooniseadmed erinevad teineteisest selle poolest, et vee elektrolüüs võib toimuda elektroodide igasuguse materjali korral, kütuseelemendis on aga vaja katalüsaatori omadustega (nt platinast, poorsetest erisulamitest või muudest erimaterjalidest) elektroode. Kütuseelemendi klemmipinge on enamasti 0,8...1 V, mistõttu kütuseelementide patareis ühendatakse jadades vastavalt nõutavale väljundpingele mõni kuni mõnisada elementi.

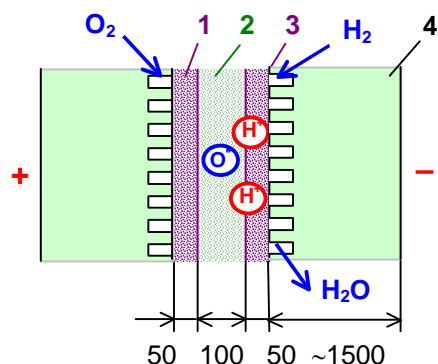


Joonis 2.6.1. Lihtsaima vesinik-hapnik-kütuseelemendi (a) ja vee elektrolüüsiseadme (b) talitluspõhimõte

Kütuseelement võib olla, nagu näidatud joonisel 2.6.1, vedela elektrolüüdiga. On kasutatud nt kaaliumhüdrosiidi KOH ja fosforhappe H₃PO₄ lahuseid. Sagedamini kasutatakse aga elektrolüüdi asemel tahkeid ionivahetusmembraane, mis lasevad läbi kas vesiniku- või hapnikuioone. Nii membraan kui ka elektroodid on sel juhul väga õhukesed (kokku mitte enam kui mõni kümnendik millimeetrit), mistõttu elemendi ehitus võib kujuneda lehtaoliseks. Joonisel 2.6.2 on kujutatud madalatemperatuurilise polümeermembraaniga, joonisel 2.6.3 aga kõrgetemperatuurilise tsirkooniumoksiidmembraaniga kütuseelemendi ehituspõhimõte.



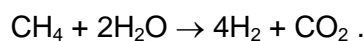
Joonis 2.6.2. Protonivahetus-polümeermembraaniga kütuseelemendi ehituspõhimõte. 1 polümeermembraan, nt veega immutatud poorne tetrafluoreteen (*naflion*), 2 katalüsaatorelektrood (plaatina-nanopartikleid sisaldav poorne süsinik), 3 ülipoorne süsinikpaber, 4 gaasiuuretega varustatud grafiitplaat. Mõõtmed on esitatud mikromeetrites



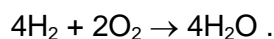
Joonis 2.6.3. Kõrgetemperatuurilise oksiidmembraaniga kütuseelemendi ehituspõhimõte. 1 poorne keraamiline (nt strontsiumilisandiga LaMnO_3 -) katood, 2 hapnikuioone läbilaskev tsirkooniumoksiidmembraan, 3 poorne keraamiline (nt nikli- ja tsingilisandiga ZrO_2 -) anood, 4 kroomisulamist, gaasiuuretega varustatud plaat. Mõõtmed on esitatud mikromeetrites

Polümeermembraaniga kütuseelemendid talitlevad membraani ja elektrodide temperatuuril 70...90 °C, kuid mõningad uuemad polümeerid lubavad temperatuuri kuni 220 °C. Nende elektriline kasutegur on tavaliselt ligikaudu 60 %, kuid kui saab kasutada eralduvat soojust, võib resulteeruv kasutegur olla ligikaudu 90 %. Selliste kütuseelementide patareisid saab valmistada väga mitmesuguse nimivõimsusega – mõnest kümnendikust vatist kuni mõnesaja kilovatini, mistõttu nad on leidnud eelistatud kasutamist nii kantavate elektroonikaseadmete (arvutite, mobiiltelefonide) kui ka liiklusvahendite, allveelaevade ja väikehoonete toiteallikaina. Valmistatakse ka kütuseelemente, mis talitlevad mitte vesinikul, vaid metanoolil (metüülalkoholil CH_3OH). Selliste kütuseelementide kasutegur on väiksem (20...30 %) ja hind kõrgem, kuid neid puudusi kompenseerib vedelkütuse lihtne salvestamine ja edastamine. Polümeermembraani ja seega ka kogu kütuseelemendi tööiga on tavaliselt kuni 5000 tundi.

Oksiidmembraaniga kütuseelemendid talitlevad temperatuuril 800...1000 °C ja võivad kütusena kasutada vesinikku või maagaasi, mis sellel temperatuuril reageerib veeauruga ja annab reaktsiooni tulemusel vesiniku ja süsinikdioksiidi:



Selles reaktsioonis saab kasutada osa sellest veeaurust, mis tekib kütuseelemendis metaani lagundamisel tekkiva vesiniku ja juurdeantava hapniku ühinemisel:

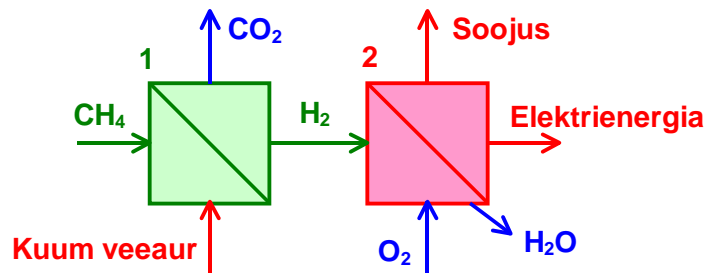


Kõrgel temperatuuril eralduvat soojust saab kasutada aga ka lisa-veeauru tootmiseks, mida omakorda saab anda soojusvahetisse või auruturbiini. Oksiidmembraaniga kütuseelemendi elektriline kasutegur on 60...70 %, kuid elektrienergia ja soojuse koostootmisel võib saavutada kasuteguri isegi üle 90 %, mistõttu nad sobivad kasutamiseks hoonete ja muude rajatiste kohalikes elektrijaamades. Selliste elementide patareisid valmistatakse seeriaviisiliselt võimsusega mõni kuni mõnisada kilovatti. Kütuseelemendi eluiga on tavaliselt 20 000 kuni 30 000 tundi ja see sobib pikaajaliseks kestevaltitudeks. Väljalülitamise korral tuleb kütuseelemendipatareid sellekohase kütteseadme abil hoida normaalsel talitlustemperatuuril, sest käivitamine külmast olekust võib kesta mitu päeva.

Mõnevõrra odavamatel materjalidel põhineb teine kõrgetemperatuuriline kütuseelement, mille elektrolüüdiks on sula kaalium- või liitiumkarbonaat (K_2CO_3 või Li_2CO_3) LiAlO_2 -maatriksis ja mille töötemperatuur on 600...660 °C (**sulakarbonaat-kütuseelement**). Elektrolüüt laseb läbi karbonaadiiooni CO_3^- , mis tekitab katoodipoolel süsinikdioksiidi ja hapniku ühinemisel. Ka selles elemendis saab kütusena kasutada maagaasi, peale selle aga ka söe- ja biogaasi, mistõttu nad sobivad kasutamiseks kohalikes väikeelektri jaamades võimsusega 10 kW kuni 1 MW, samuti aga ka laevadel ja rööbassõidukitel. Selliste kütuseelementide elektriline kasutegur on väiksem kui oksiidmembraaniga elementidel (60...65 %), eluiga aga pikem (30 000 kuni 40 000 tundi) ja oma hinnalt on nad võistlusvõimelisemad muude kohalike energiaallikatega.

Klassikalist **aluselise (kaaliumhüdroksiid-) elektrolüüdiga** kütuseelemendi iseloomustab suur töökindlus, madal töötemperatuur (alla 100 °C) ja kõrge kasutegur (ligikaudu 70 %), kuid selles tuleb kasutada suure väärismetalli- (plaatina-) või erisolamisisaldusega elektroode, mistõttu seda rakendatakse vastutusrikastel juhtudel, nt kosmoseaparaatides, sõjaväeseadmetes ja energiasalvestites võimsusega 5...150 kW. Kütusena kasutatakse vesinikku või hüdrasiini (N_2H_4).

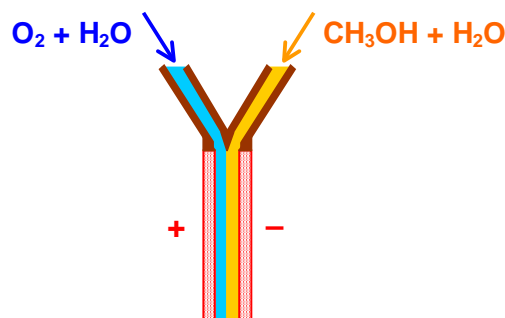
Happelise (fosforhappe-) elektrolüüdiga kütuseelementide töötemperatuur on 160...220 °C, mida võib lugeda ideaalseks, kui kütuseelemente tahetakse kasutada kohalikes elektrienergia ja soojuse koostootmisjaamades. Hape on imbutatud poorsesse ränikarbiid-teflonmembraani, väärismetallivajadus on väiksem kui aluselise elektrolüüdiga elementides, elektriline kasutegur on aga tunduvalt madalam (ligikaudu 55 %). Kütuseks on puhas vesinik, mida võidakse saada ka maa- või söegaasist kütuseelementide patarei ette lülitatava **reformer**i abil (joonis 2.6.4). Selliste kütuseelementide patareisid on valmistatud võimsusega kuni 11 MW.



Joonis 2.6.4. Reformeri (1) kasutamise näide vesiniku tootmiseks kütuseelementide patareile (2)

Protsessid reformeris on tegelikult keerukamad kui joonisel 2.6.4 kujutatud ja toimuvad mitmeastmeliselt. Peale süsinikdioksiidi tekib reformeri algastmes ka süsinikoksiid, mille sattumist kütuseelemendi tuleb kõigiti vältida, sest see võib plaatinal või erimetallisulamitel põhineva katalüsaatori rivist välja viia. Enne reformerit tuleb gaas puhastada väävlist, mis samuti võiks kütuseelemente kahjustada.

Peale eelnimetatud viie põhiliigi on teisigi kütuseelementide süsteeme. Nende hulgas väärib nimetamist aastal 2006 väljatöötatud membraanivaba mikro-kütuseelement, milles metanooli vesilahus ja hapnikuga rikastatud vesi voolavad kapillaartorus laminaarselt teineteise kõrval. Kummagi vedelikukihi paksus on mõni mikromeeter ja OH⁻-ioonid liiguvad takistamatult anoodile (joonis 2.6.5).

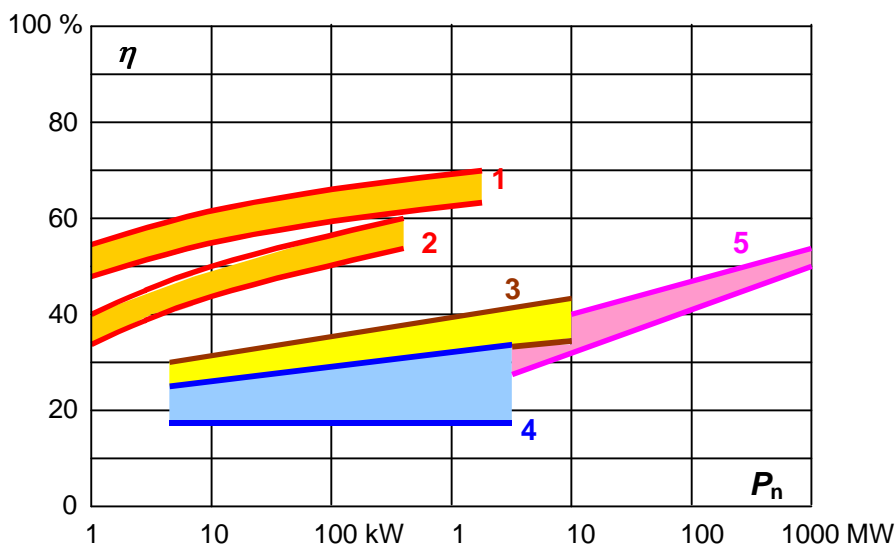


Joonis 2.6.5. Membraani- ja elektrolüüdivaba kütuseelemendi ehituspõhimõte

Kütuseelementide eelised otto- ja diiselmootorite ning auru- ja gaasiturbiinide ees seisnevad

- kõrgemas kasuteguris (vt joonis 2.6.6),
- pikemas hooldusvabas talitluses (10 000 kuni 40 000 tundi)
- liikuvate osade puudumises (väljaarvatult pumbad ja ventilaatorid),
- kahjulike heitgaaside puudumises,
- elektrienergia ja soojuse lihtsamas koostootmisvõimaluses,
- müra- ja vibratsioonivabas talitluses.

Vaatamata sellele, et kütuseelemendid on võimsusühiku kohta 2 kuni 3 korda kallimad kui eelnimetatud teised energiamuundurid ja et ka nende ruumivajadus on mitu korda suurem kui nt diiselmootorist ja generaatorist koosnevatel agregaatidel, on nende kasutusala 21. sajandi esimestel aastatel hakanud kiiresti laienema ja pärast aastat 2010 prognoositakse nii kohtkindlates paigaldistes kui ka liiklusvahendites kasutatavate kütuseelementide masstootmist ning sellega seoses ka nende hinna tunduvalt vähenemist.



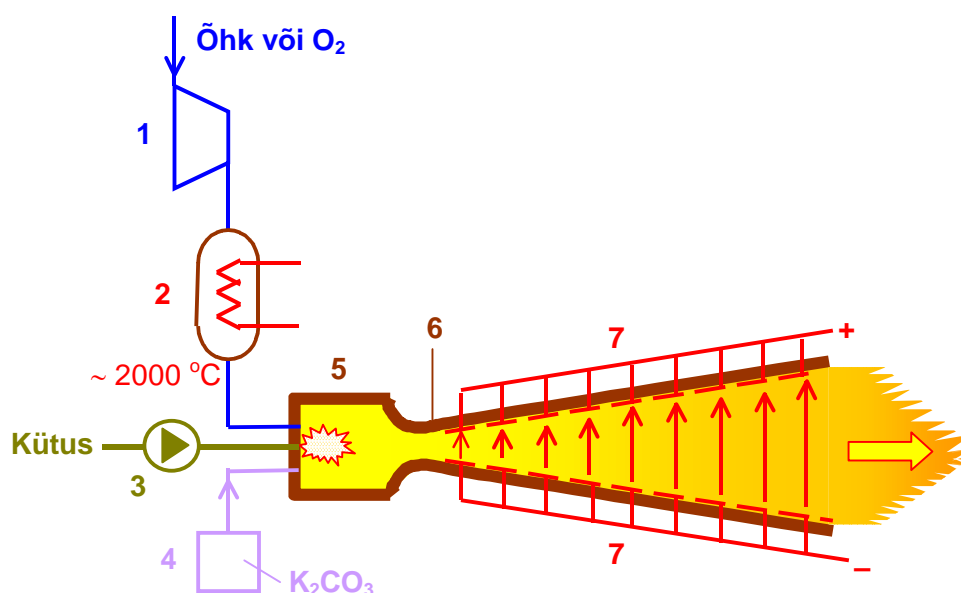
Joonis 2.6.6. Mõningate energiamuundurite kasuteguri (η) olenevus nimivõimsusest (P_n) (tugevasti lihtsustatult). 1 kõrgetemperatuurilised ja aluselise elektrolüüdiga kütuseelemendid, 2 madalatemperatuurilised kütuseelemendid, 3 diiselmootorid, 4 ottomootorid, 5 auru- ja gaasiturbiinid

Vesiniku ja hapniku elektrolüütilise (leegita) ühinemist märkas esimesena aastal 1838 Baseli ülikooli keemiaprofessor Christian Friedrich Schönbein (1799–1868), kes selle nähtuse edasiuurimisel avastas aastal 1839 **osooni**. Tema seda nähtust kirjeldava artikli põhjal alustas aastal 1839 vesiniku elektrolüütilise hapendumise uurimist inglise advokaat ja füüsik William Robert Grove (1811–1896), kellel õnnestus valmistada plaatina- ja kuldelektroodidega elektrienergiaallikas, mille ta nimetas *gaasipatareiks*. Väga väikese võimsuse tõttu ei leidnud see tehnilist rakendamist, kuid huvi kütuse otsese muundamise vastu elektrienergiaks säilis ja aastal 1889 valmistasid inglise füüsikud Ludwig Mond ja Charles Langer tõhusama muundusseadme, mille nad nimetasid **kütuseelemendiks** (*fuel cell*) [2.18]. Kütuseelementide teooria esitas aastal 1894 Leipzigi ülikooli elektrokeemiaprofessor, Tartu Ülikooli lõpetanud Wilhelm Friedrich Ostwald (1853–1932), näidates ühtlasi, et nende kasutegur võib teoreetiliselt olla isegi üle 90 %. Kütuseelementide tegelik rakendamine algas 1950ndail aastail, mil Braunschweigi tehnikaülikooli tehnilise füüsika professor Eduard Justi (1904–1986) ja *King's College*'i (Cambridge, Suurbritannia) teadur Francis Thomas Bacon (1904–1992) võtsid KOH-elektrolüüdiga kütuseelemendis teineteisest sõltumatult kasutusele plaatina asemel odavamad poorsest karbonüülniklist elektroodid. Justi saavutas aastal 1955 oma laboratoorsel patareil kasuteguri 76 %, Bacon valmistas aastal 1959 mõnevõrra väiksema kasuteguriga patarei võimsusega 6 kW. Samal aastal rakendas USA firma *Allis-Chalmers* 15-kW kütuseelementide patareid traktoril, firmad *Pratt & Whitney Aircraft* ja *General Electric* töötasid aga välja polümeermembraaniga kütuseelemendi, mis võeti aastal 1965 kasutusele kosmoselaeval *Gemini 5*. Aastal 1968 kasutati kosmoselaeval *Apollo* Baconi KOH-elektrolüüdiga kütuseelemente, millest peale elektrienergia saadi ka joogivett. ZrO₂-membraaniga kütuseelemendi töötas välja aastal 1958 USA firma *Westinghouse*. 1970ndail aastail algas kütuseelementide rakendamine väikeelektrijaamades ja aastal 1983 ehitas USA firma *United Technologies Corp.* kaks H₃PO₄-elektrolüüdil põhinevat elektrijaama (New Yorgis ja Tokios). Esimesed seeriatootmiseks sobivad kütuseelementidega sõiduautod valmistas aastal 1994 ja autobussid aastal 1997 firma *Mercedes-Benz*. Kütusena kasutatakse neis vesinikku, sõiduautodes ka metanooli. Aastal 2006 valmistati Jaapanis ka esimesed kütuseelementidega vedurid ja Saksamaal esimesed väikelaevad (allveelaevades kasutati kütuseelemente juba 1980ndail aastail).

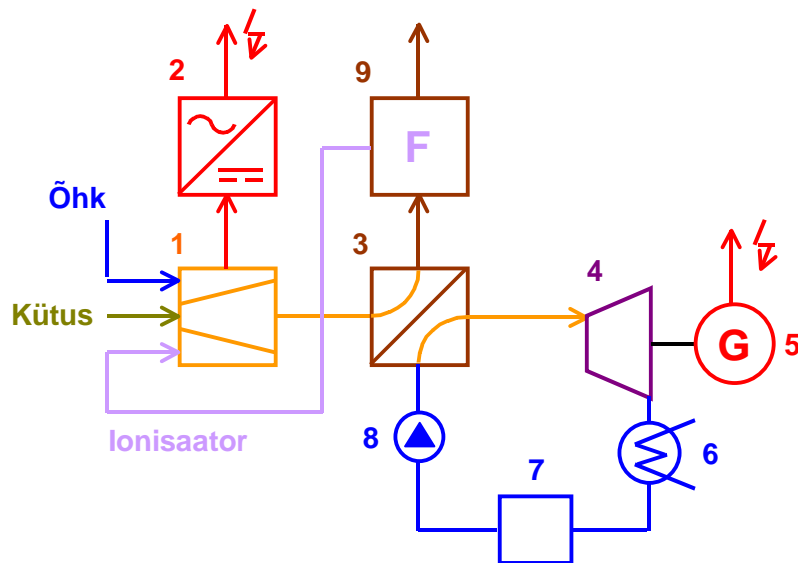
2.7 MAGNETOHÜDRODÜNAAMILISED GENERAATORID

1970ndail ja 1980ndail aastail uuriti ja katsetati maailmas (eeskätt USAs ja NSV Liidus) intensiivselt kütuste põletamisel tekkiva energia vahetu muundamise võimalusi elektrienergiaks magnetohüdrodünaamiliste generaatorite abil, mis põhinevad elektromotoorjõu tekkes ioniseeritud gaasivoolus, kui see läbib tugevat magnetvälja. Sellise seadme ehitus- ja talitluspõhimõte on esitatud joonisel 2.7.1.

Põlemiskambri väljundis tekitatav rõhk (nt 0,3 MPa) ja kõrge temperatuur (nt 3000 °C) tekitavad suure kiirusega (kuni 1000 m/s) leviva põlemisgaasivoo, milles tugeva magnetvälja (ferromagnetilise magnetsüsteemi kasutamisel kuni 2 T, ülijuhtivate mähiste kasutamisel kuni 8 T) toimel indutseerub kõrge alalis-elektromotoorjõud (kuni ligikaudu 20 kV). Kuna gaasi kiirus ja temperatuur on ka gaasikanalist väljumisel veel vägagi kõrged, on joonisel kujutatud magnetohüdrodünaamilise generaatori kasutegur suhteliselt väike (10...15 %). Väljuva gaasi energia ärakasutamiseks võib selle suunata aga aurukatlasse, mis toidab auruturbiini (joonis 2.7.2). Sellise kombineeritud süsteemi korral, milles magnetohüdrodünaamilise generaatori osa elektrienergia tootmises on 40...50 %, auruturbiinigeneraatori osa aga ülejäävad 60...50 %, võib saavutada kasuteguri kuni ligikaudu 60 %. Veel suurema kasuteguri võib saavutada elektrienergia ja soojuse koostootmisel.



Joonis 2.7.1. Magnetohüdrodünaamilise generaatori ehitus- ja talitluspõhimõte. 1 õhu- või hapnikukompressor, 2 elektriline või muu eelkuumuti, 3 kütuse sissepritsimispump (gaaskütuse korral kompressor), 4 ionisaatori (nt kaaliumi) sisestusseadis, 5 põlemiskamber, 6 magnetpooluste vahel paiknev gaasikanal, 7 elektroodid. Magnetväli on joonise pinnaga risti, joonise kohal on põhjapoolus. Elektroodidevahelised nooled näitavad voolu suunda



Joonis 2.7.2. Magnetohüdrodünaamilisest generaatorist, aurukatlast ja auruturbiinist koosneva energiaploki põhimõtteskeem. 1 magnetohüdrodünaamiline generaator, 2 vaheldi, 3 aurukatel, 4 auruturbiin, 5 elektrimasinageneraator, 6 kondensaator, 7 veepaak, 8 aurugeneraatori toitepump, 9 ionisaatorifilter

Magnetohüdrodünaamiliste generaatorite põhieelisteks tuleb lugeda kompaktsust ja kiiret käivitumist (2...5 s), mistõttu nende põhikasutusosalaks prognoositi elektrijaamade varutoiteagregaate. Neid on ehitatud võimsusega kuni 25 MW, kusjuures aga nende kuumade gaasidega kokkupuutuvate osade (kanali vooderduse, elektroodide jms) tööiga on osutunud liiga lühikeseks (seni mitte üle 1000 h). Nende puudusteks on ka

- suure kuumuskindlusega materjalide (nt kanali vooderduseks kasutatava ütrium- või tsirkooniumoksiidi) kallidus,
- ülijuhtivate mähistega magnetsüsteemi kallidus,
- generaatori kui terviku liiga väike töökindlus.

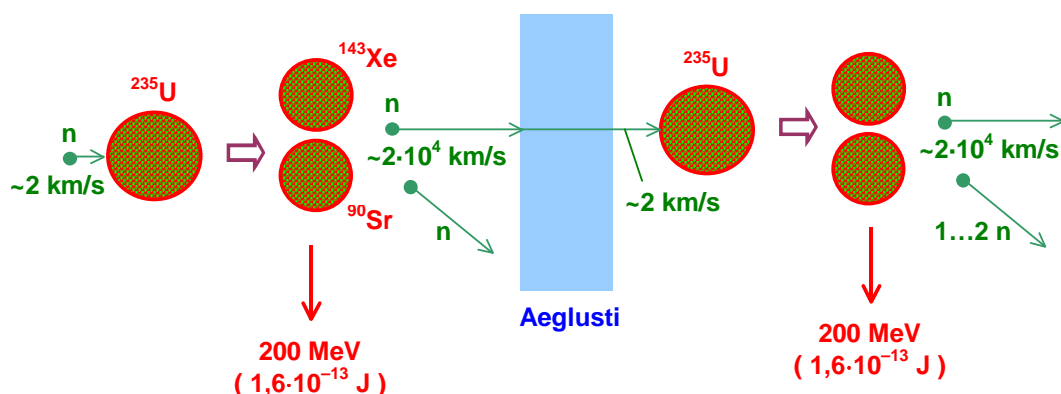
Kõige selle tõttu on kütuste põletamisel põhinevate magnetohüdrodünaamiliste generaatorite edasisest arendamisest loobutud. On valmistatud ka vedelmetallil (nt naatriumil) põhinevaid generaatoreid (vastavaid uurimusi on tehtud ka Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika instituudis), kuid ka need ei ole osutunud võistlusvõimelisteks teiste elektrienergiaallikatega.

Magnetohüdrodünaamilise generaatori idee pärineb Michael Faradaylt, kes aastal 1832 väitis isegi, et Maa magnetväljas voolava Thamesi jõe kallaste vahel peaks tekkima elektromotoorjõud. Selle mõõtmise katse tal ei õnnestunud, mis on seletatav selleaegsete mõõteriistade liiga väikese tundlikkusega, sest jõe kallastevaheline elektromotoorjõud on umbes 30 mV. Aastal 1959 valmistati USAs esimene katseline magnetohüdrodünaamiline generaator võimsusega 10 kW, mis talitles 10 sekundit. Esimene elektrijaama paigaldatud generaator (30 kW) valmis aastal 1967 Moskvast ja aastal 1976 algasid NSV Liidu ja USA ühisuuringud võimsate magnetohüdrodünaamiliste generaatorite loomiseks. Nende tulemusena oli kavandatud paigaldada Rjazani soojuselektrijaama energiablokk, mis oleks koosnenud neljast magnetohüdrodünaamilisest generaatorist koguvõimsusega 270 MW ja auruturbiinageneraatorist võimsusega 310 MW. Selle ploki auruturbiinosa sai valmis, kuid magnetohüdrodünaamiline osa jäi uurimuste katkestamise tõttu ehitamata.

2.8 TUUMAREAKTORID

Kui vähesed erandid välja arvata, põhinevad maailmas praegu kasutusel olevad tuumareaktorid uraani isotoobi ^{235}U lõhestumise ahelreaktsiooni tulemusel tekkiaval soojusel. Enamasti kulgeb ahelreaktsioon selliselt, et uraaniaatomi tuumaga põrkub aeglustatud (*soojuslik*, kiirusega ligikaudu 2 km/s liikuv) neutron, mille toimele aatom lõheneb kaheks kergemaks aatomiks, kusjuures vabaneb keskmiselt 2,5 uut *kiiret* (kiirusega ligikaudu $2 \cdot 10^4$ km/s liikuvat) neutronit. Reaktori stabiilsel talitlusel aeglustatakse osa kiiretest neutronitest sobiva kiiruseni aeglusti ehk *moderaatori* (nt vee, raske vee või grafiidi) abil, misjärel üks neutronitest lõhestab uue uraanituuma. Ülejäänud neutronid neelduvad kütusevarrastes, aeglustis ja reaktori muudes osades, andes neile ära oma energia, mis muundub soojuseks. Aeglustamine põhineb neutroni mitmekordsel (tavaliselt 8- kuni 10-kordsel) põrkumisel aeglusti aatomituumadega ja on vajalik selleks, et suurendada neutroni ja uraaniaatomi tuuma põrkumise tõenäosust. Et ahelreaktsioon oleks stabiilne, peab uraani ^{235}U suhteline kogus tuumkütuses olema teatavates kindlates piirides (tavaliselt 2...5 %) ja protsessi peab saama neutroneid neelavate ainetega (nt boori, kaadmiumi või hafniumiga) tõhusalt reguleerida. Piltlikult ning tugevasti lihtsustatult on sellises tuumareaktoris toimuv ahelreaktsioon kujutatud joonisel **2.8.1**.

Neutronite neeldumisel uraani ^{238}U tuumas ja sellega kaasnevate muude tuumaprotsesside tulemusel muundub mingi osa uraanist plutooniumiks ^{239}Pu , mida saab kasutada tuumkütusena muud tüüpi tuumareaktorites ja tuumarelvade valmistamiseks.

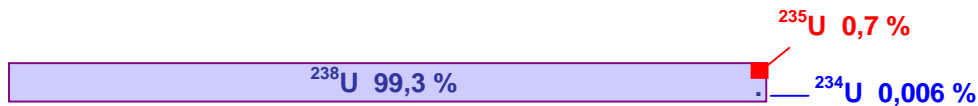


Joonis 2.8.1. Ahelreaktsioon soojuslikel neutronitel põhinevas tuumareaktoris. Ksenooni ja strontsiumi asemel (mis on esitatud näitena) võivad uraaniaatomi lõhenemisel tekkida ka mitmesugused muud aatomid tsingist gadoliiniumini

Uraaniaatomi ^{235}U lõhestumisel vabanev, soojuseks muunduv energia on 200 MeV ehk $1,6 \cdot 10^{-13}$ J. Kuna 1 g uraani sisaldab $2,6 \cdot 10^{21}$ aatomit, on eelnimetatud ahelreaktsioonil saadav energia massiühiku kohta $8,3 \cdot 10^{10}$ J (830 GJ) ehk 23 MWh ehk ligikaudu 1 MWd. Võrdluseks võib mainida, et 1 g tingkütuse (1 gce) põletamisel kasuteguriga 1 saadakse 8,14 Wh soojust.

Looduslik uraan kujutab endast raskemetalli tihedusega $18,95 \text{ t/m}^3$, mis sisaldab

- 99,3 % isotoopi ^{238}U ,
- 0,7 % isotoopi ^{235}U ,
- 0,006 % isotoopi ^{234}U (vt joonis **2.8.2**).



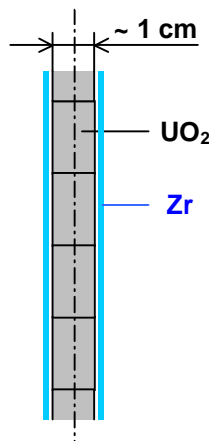
Joonis 2.8.2. Loodusliku uraani isotoopkoostis

Kuna soojuslikel neutronitel põhinevates tuumareaktorites peab isotoobi ^{235}U suhteline kogus sõltuvalt reaktori liigist, nagu juba öeldud, olema 2...5 %, tuleb looduslikku uraani selle isotoobiga rikastada. Sellekohastes rikastamisvabrikutes toimub see enamasti madala keemistäpiga uraanheksafluoriidi UF_6 aurustamise ja sellele järgneva difusioonmenetluse või tsentrifugimise teel.

Uraani saadakse uraanimaagist oksiidina U_3O_8 . Maaki loetakse käitluskõlblikuks, kui selle iga tonn sisaldab vähemalt 2...2,5 kg uraani. On ka maake, mis sisaldavad uraani isegi ligi 100 kg/t (nt Austraalias). Uraani on aga toodetud aastail 1945–1952 Sillamäel ka Eesti diktüoneema-argiliidist, mille uraanisisaldus on ainult 0,265 kg/t. Uraani sisaldavad ka paljud kivimid ja nt graniidis on seda ligikaudu 1,5 g/t.

Tuumkütus (rikastatud uraan) viiakse tuumareaktorisse enamasti uraandioksiidina UO_2 , kuna selle ühendi kõrge sulamistäpp ($2850\text{ }^\circ\text{C}$) suurendab reaktori töökindlust (uraani enda sulamistäpp on $1132\text{ }^\circ\text{C}$). Selle aine pulbrist paagutatakse pulbermetallurgilisel menetlusel keraamilised tabletid läbimõõduga ligikaudu 1 cm ja kõrgusega 2...3 cm, mis lükitakse tsirkooniumist või tsirkooniumisulamist valmistatud torudesse pikkusega tavaliselt 3,5...4,5 m. Sel viisil saadud **kütusevardad** (joonis 2.8.3) ühendatakse 70 kuni 300 kaupa ruudukujulise ristlõikega kimpudeks, mis paigutatakse reaktorisse enamasti püstasendis üksteisega rööbiti.

Tsirkoonium on hõbevalge plastne metall tihedusega $6,5\text{ Mg/m}^3$ ja sulamistäpiga $1855\text{ }^\circ\text{C}$. Tsirkoonium ei neela aeglasi neutroneid.



Joonis 2.8.3. Soojuslikel neutronitel põhineva tuumareaktori kütusevarda ehituspõhimõte

Kütusevarraste ja vardakimpude vahele jääb aeglusti (moderaator), milleks enamasti on **vesi**. Reaktori seda osa, milles paiknevad kütusevardad ja milles toimub energeetiline ahelreaktsioon, nimetatakse **aktiivtsooniks**. Vesi on seda liiki reaktorites ühtlasi soojuskandja, mille abil edastatakse soojus reaktorist aurugeneraatorisse või, kui vesi reaktoris aurustub, auruturbiini. Peale kütusevarraste paiknevad aktiivtsoonis boori (harvemini kaadmiumi või hafniumi)

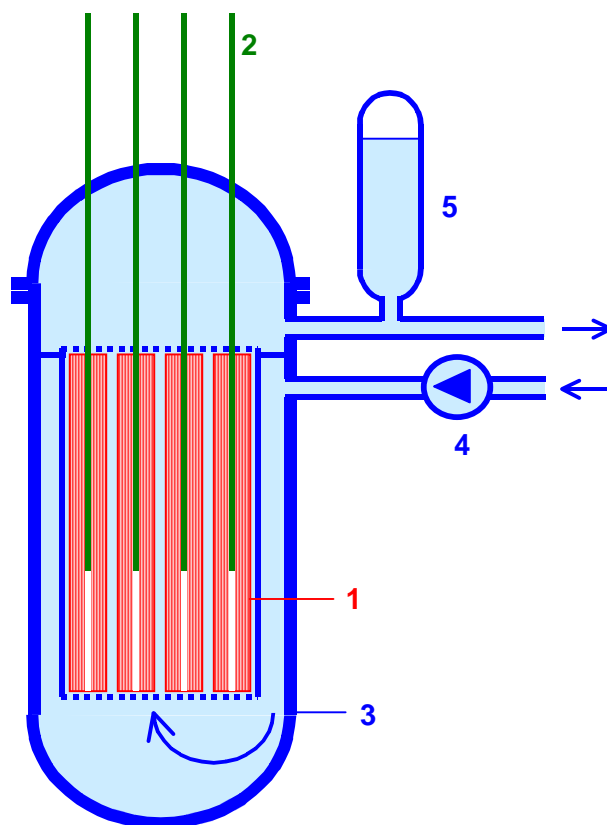
kõrge sulamistäpiga ühendeid sisaldavad *pidurdus-* ehk *juhtvardad*, mis tõhusalt neelavad neutroneid ja võimaldavad seega osaliselt või täielikult aktiivsooni viimise või sellest eemaldamise teel reaktori võimsust muuta ning tarbe korral reaktoris toimuvat ahelreaktsiooni peatada. Vesireaktorites jätkuvad aga ka pärast reaktori peatamist tuumalagunemisprotsessid, mis võivad tekitada soojust kuni ligikaudu 7 % reaktori nimi-soojust võimsusest (see on muide üks nende reaktorite puudustest). Et vältida aktiivsooni liigkuumenemist (mis halvimal juhul võib viia kütusevarraste sulamiseni), on reaktori jahutamine ka pärast selle peatamist väga oluline. Kuigi tuumkütuse sulamine on sellekohaste automaatsete kaitsemeetmete tõttu äärmiselt ebatõenäoline, nähakse vesireaktoriye ja nende juurde kuuluvate aurugeneraatorite (kui need olemas on) ümber alati ette tugevad metall- ja betoonkaitseümbrised, mis võimaliku õnnetuse korral välistavad radioaktiivsete ainete pääsu väliskeskkonda.

Tuumareaktorite võimsust väljendab kõige paremini reaktorist soojuskandja abil ära viidav soojusvõimsus. Kuna aga soojust seejärel kasutatakse enamasti lõpptulemusena auruturbiin-generaator-agregaadi käitamiseks, on energeetikas tavaks kujunenud iseloomustada reaktorit elektrigeneraatori nimivõimsusega, nimetades seda (küllaltki tinglikult) reaktori **elektriliseks võimsuseks**.

Survevesireaktorites (joonis 2.8.4) koosnevad kütusevardakimbud maatriksitaoliselt paigutatud 14×14 kuni 17×17 kütusevardast. Suurtes reaktorites soojusliku väljundvõimsusega 4...6 GW (elektrilise võimsusega 900...1600 MW) on selliseid kimbusid tavaliselt 150 kuni 250 ja need sisaldavad kokku 80...100 t uraani. Juhtvarraste jaoks, mis viiakse reaktorisse läbi reaktori kaane, on iga kimbu keskel vastav kanal. Reaktori võimsust saab reguleerida ka boorhappe H_3BO_3 lisamisega veele ning selle kontsentratsiooni muutmisega, kusjuures vee vooluhulk on tuumaelektrijaamades reaktorites enamasti konstantne. Vee rõhk reaktoris võib olla kuni 16 MPa ja reaktorist väljuva vee temperatuur ligikaudu 315 °C. Aurugeneraatoris võimaldab selliste parameetritega soojuskandja tekitada enamikel juhtudel auru rõhuga ligikaudu 6 MPa ja temperatuuriga 275 °C. Auru parameetrid on seega tunduvalt madalamad kui kütuse põletamisel põhinevates aurukateldes (vt jaotis 2.2), mistõttu soojuse muundamine elektrienergiaks toimub sellises tuumaenergiaplokis märgatavalt madalama kasuteguriga – 25...30 %.

Kui arvestada, et tuumaelektrijaamas muundub elektrienergiaks vähemalt 25 % soojusest, on 1 MWd saamiseks vaja ligikaudu 4 g uraani ^{235}U ehk 0,6 kg looduslikku uraani. Põletuskütuselektrijaamades tuleb sama koguse elektrienergia saamiseks põletada umbes 8 t kivisütt ehk umbes 16 t head põlevkivi.

Survevesireaktor on levinuim tuumareaktori liik. Selliseid reaktoreid on maailma tuumaelektrijaamades ligi 300, allvee- ja pealveelaevades peale selle veel ligikaudu 220. Nende eeliseks on stabiilse talitluse lihtne tagamine, kuna reaktori võimsuse juhuslikul suurenemisel vesi kuumeneb, selle tihedus ning koos sellega neutroneid aeglustav toime väheneb, mistõttu ka reaktori võimsus väheneb (*negatiivne temperatuuri-tagasiside*). Samasugune nähtus tekib ka vee juhuslikul keemaminekul (*negatiivne mulliefekt*). Eeliseks saab lugeda ka seda, et reaktori jahutusvesi, mis on nõrgalt radioaktiivne, ringleb suletud kontuuris ja aurugeneraatorist väljuv aur on radioaktiivsusvaba.



Joonis 2.8.4. Survevesireaktori ehituspõhimõte. 1 kütusevardad, 2 juhtvardad, 3 reaktori kest, 4 toitepump, 5 rõhuregulaator. Juhtvarraste ajamid on näitamata

Firmade *Areva NP* (Prantsusmaa) ja *Siemens AG* (Saksamaa) koostöös töötati aastail 2000...2004 välja ülitöökindel *Euroopa survevesireaktor* elektrilise võimsusega 1600 MW, mille kaitsemeetmete hulgas on

- neli iseseisvalt talitlevat jahutussüsteemi, millest igaüks on võimeline reaktorit pärast väljalülitamist jahutama,
- reaktorit ümbritsev lekkekihi lisakest,
- erisüvend ja jahutussüsteem sulametalli vastuvõtmiseks reaktori kütusevarraste sulamise korral,
- kahekordne eelpingestatud betoonist kaitseümbris seinte kogupaksusega 2,6 m.

Esimese sellise reaktori paigaldamine algas aastal 2005 Olkiluoto tuumaelektrijaamas Soomes. Energiaplokk tervikuna peaks valmima aastal 2009.

Esimene survevesireaktor valmis USA-s aastal 1953 ja oli ette nähtud kasutamiseks allveelaeval. Pärast mitmekülgseid katsetusi paigaldatigi see aastal 1955 maailma esimesele tuumaallveelaevale *Nautilus*. Tuumaelektrijaamades algas nende kasutamine aastal 1957 (Shippingport, USA, 90 MW).

Käesolevas raamatus käsitletakse ainult **tuumaelektrijaamades** kasutatavaid tuumareaktoreid. Allvee- ja pealveelaevade ajameid toitvad tuumareaktorid erinevad neist teistsuguste nõuete tõttu väga oluliselt. Tähtsamateks erinevusteks on muuhulgas

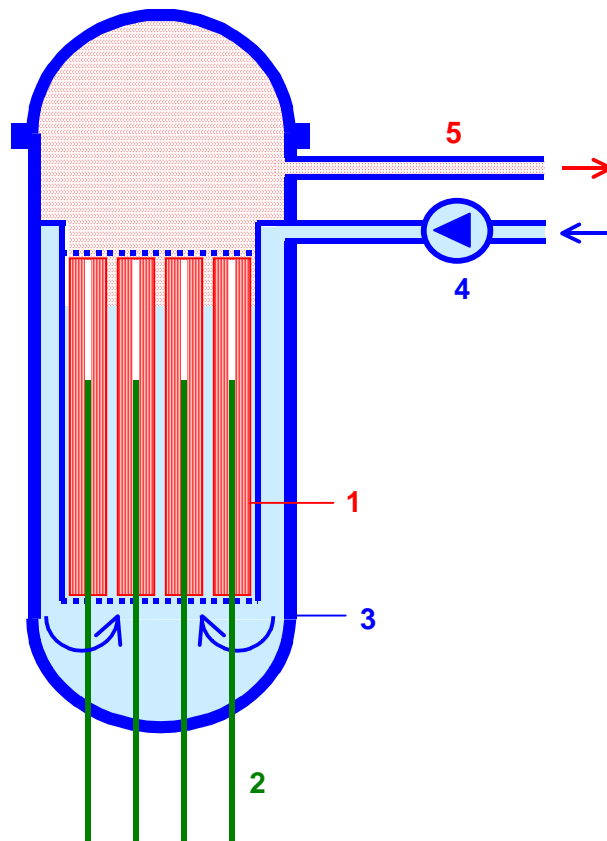
- väiksem soojusvõimsus (20...200 MW);
- uraani suhteliselt suurem kogus ja kõrgem rikastamisaste (^{235}U suhteline osatähtsus 20...96 %), mis võib tagada reaktori talitluse laeva kogu kasutusaja kestel, ilma et tuumkütust oleks vaja vahetada;
- uraani kasutamine reaktoris mitte uraandioksiidi, vaid uraani ja tsirkooniumi sulami kujul;
- vesisoojuskandja muudetav vooluhulk.

Keevvesireaktorite (joonis **2.8.5**) kütusevardakimbud koosnevad 74...100 kütusevardast. Võimsates reaktorites (energiaploki elektrilise nimivõimsusega 1000...1300 MW) on neid kimpusid kuni 800 ja need sisaldavad kokku kuni 140 t uraani. Soojuskandjaks on puhas (boorhappelisandita) vesi, mis reaktoris aurustub ja juhitakse pärast ülekuumendamist auruturbiini. Seega jääb ära survevesireaktorite korral kasutatav aurugeneraator, mis lihtsustab energiaploki ehitust ja tõhustab tuumaenergia muundamist soojuseks. Ühtlasi on aga turbiini minev aur mingil määral (peamiselt hapnikust tekkinud lämmastiku ^{16}N sisalduse tõttu) radioaktiivne, mis nõuab turbiini ümbritsemist kiirguskaitsevarjega. Kuna radioaktiivse isotoobi ^{16}N poolestusaeg on väga väike (7 s), on turbiin praktiliselt kohe pärast väljalülitamist radioaktiivsuvaba.

Rõhk reaktoris on enamasti ligikaudu 7,5 MPa ja vee keemistäpp seega ligikaudu 285 °C. Veetase aktiivsoonis on tavaliselt 12...15 % kütusevarraste ülemistest otstest allpool, mistõttu aktiivsooni ülemises osas tekib vähem aeglast neutroneid ja ahelreaktsiooni intensiivsus on seal väiksem kui alumises osas. Nagu survevesireaktoris, nii ka siin mõjuvad soojuskandja temperatuuri tõus ja mullide teke negatiivse stabiliseeriva tagasisidena. Reaktori võimsuse reguleerimiseks vahemikus 70...100 % kasutatakse soojuskandja vooluhulga muutmist, allpool seda aga juhtvarraste sisestamist aktiivsooni. Reaktori võimsuse reguleerimine on seega lihtsam ja kergem kui survevesireaktorite puhul, kuid rõhu stabiliseerimine nõuab mõnevõrra keerukamaid juhtarvutiprogramme.

Keevvesireaktoreid oli 2007. aasta alguses maailma tuumaelektrijaamades kokku 73 (neist 28 Jaapanis), seega märgatavalt vähem kui survevesireaktoreid. Nende puuduseks on reaktori väiksem võimsustihedus ja suuremad mõõtmed kui sama võimsusega survevesireaktoril, põhieeliseks aga parem reguleeritavus. Ohutusmeetmed aktiivsooni sulamise vastu on samasugused nagu survevesireaktorite korral.

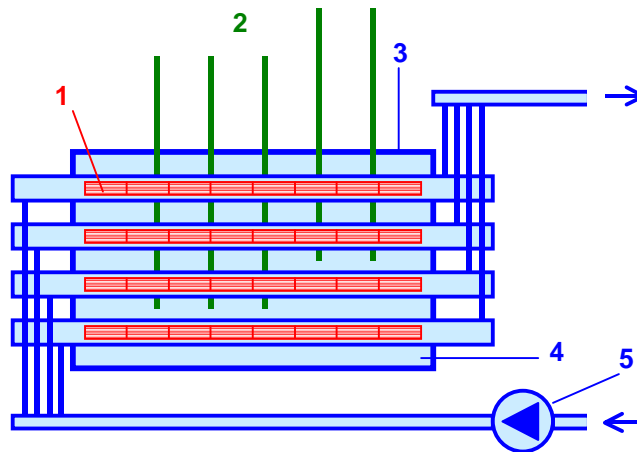
Maailma esimene katseline keevvesireaktor elektrilise võimsusega 5 MW valmis aastal 1956 Argonne'i tuumauuringulaboratooriumis (USA). Esimene tööstuslik seda liiki reaktor elektrilise võimsusega 200 MW alustas talitlust Dresdeni tuumaelektrijaamas (Illinois, USA) aastal 1960.



Joonis 2.8.5. Keevvesireaktori ehituspõhimõte. 1 kütusevardad, 2 juhtvardad, 3 reaktori kest, 4 toitepump 5 auruväljund. Sisseehitatud ringluspumbad, auruseparaator, auru ülekuumendussüsteem ja juhtvarraste ajamid on näitamata

Peale surve- ja keevvesireaktorite on maailma eri riikide tuumaelektrijaamades kasutusel või väljatöötamisel ka teisi reaktoriliike. Alljärgnevalt on loetletud mõned levinuimad liigid.

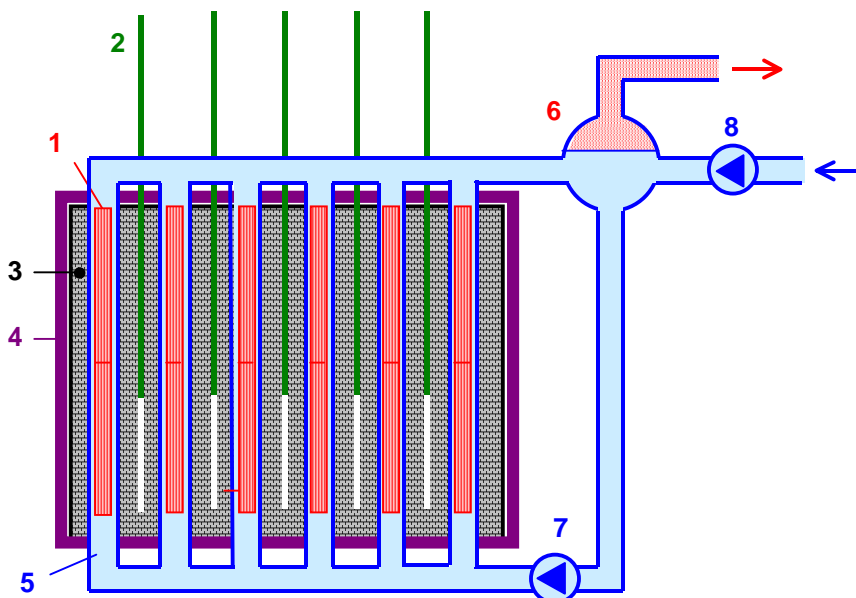
Raskevesiaeglustiga ja -soojuskandjaga survevesireaktoreid (CANDU-reaktoreid) oli maailmas 2006. aasta keskel 29. Need reaktorid on välja töötatud Kanadas (nimetus *CANDU* tuleb sõnadest *Canada Deuterium Uranium*) ja võimaldavad raske vee D_2O paremate aeglustusomaduste tõttu kasutada tuumkütusena looduslikku (rikastamata) uraani. Reaktori iga kütusevardakimp läbimõõduga 10 cm sisaldab, olenevalt reaktori tüübist, 28...43 varrast, on pikisuunas jaotatud 12 lõiguks pikkusega 0,5 m ja paikneb omaette tsirkooniumsulamist torus, mida läbib soojuskandja rõhu all 7,5...10 MPa. Torud paiknevad rõhtsalt ühises paagis, mis on täidetud madalrõhulise aeglustiga (joonis 2.8.6). Soojuskandja väljub reaktorist temperatuuriga 280...290 °C ja suunatakse, nagu teistegi survevesireaktorite puhul, aurugeneraatorisse. Reaktorit iseloomustab kõrge töökindlus, odavam tuumkütus, kütusevardakimpude lihtsa vahetamise võimalus reaktorit peatamata ja loodusliku uraani mitu korda parem ära kasutamine.



Joonis 2.8.6. CANDU-reaktori ehituspõhimõte. 1 kütusevardad, 2 juhtvardad, 3 reaktori paak, 4 aeglusti (raske vesi), 5 soojuskandja (raske vee) toitepump. Juhtvarraste ajamid on näitamata

Esimene (katseline) CANDU-reaktor elektrilise võimsusega 22 MW valmis Kanadas aastal 1962. Praegugi (aastal 2007) põhinevad kõik Kanada tuumaelektrijaamad seda liiki reaktoreil võimsusega enamasti 540...935 MW. CANDU-reaktoris tekib muuhulgas tritiumi (ülirasket vesinikku), mille poolestusaeg on 12,6 a ja mida kasutatakse eeskätt tuumarelvades, kuid ka meditsiinis ja bioloogias ning pikaealiste radioluminestsentslampide valmistamiseks.

Grafiitaeglustiga kanaltüüpi keevvesireaktorid töötati välja NSV Liidus ja olid esialgu ette nähtud kasutamiseks laevadel. Esimene seda liiki reaktor AM-1 (*atomnõi morskoj*) elektrilise võimsusega 5 MW paigaldati aga aastal 1954 maailma esimesse tuumaelektrijaama Obninskis. Aastal 1973 alustas Sosnovõi Bori tuumaelektrijaamas (Peterburi lähedal Venemaal) talitlust esimene suur seda tüüpi reaktor RBMK (*reaktor bolšoi moštšnosti kanalnõi*) elektrilise võimsusega 1000 MW (joonis 2.8.7).



Joonis 2.8.7. Reaktori RBMK ehituspõhimõte. 1 kütusevardad, 2 juhtvardad, 3 grafiitaeglusti, 4 reaktori kest, 5 kütusevarraste ja soojuskandja (vee) kanalid, 6 aurutrummel, 7 ringluspump, 8 toitepump. Kanalite kaaned ja sulgemisventiilid ning juhtvarraste ajamid on näitamata

Reaktor RBMK-1000 kujutab endast silindrikujulist teraskestaga ümbritsetud grafiitplokkide kogumit kõrgusega 7 m ja läbimõõduga 11,8 m; grafiidi üldmass on 1850 t. Läbi grafiidi kulgeb 1693 kütusekanalit, milles igaühes paikneb järjestikku kaks 18-wardalist kütusevardakimpu pikkusega 3,5 m; kokku on reaktoris 192 t uraani, mille rikastusaste on 2 %. Iga kanalit saab eraldi avada ja kütusevardakimpusid seega reaktorit peatamata vahetada. Kanalit läbib soojuskandja (vesi) rõhu all 6,5 MPa, mis reaktoris aurustub; väljuva auru temperatuur on 280 °C. Reaktori soojusvahetussüsteem sarnaneb trummel-aurukatla omaga – selles on 4 aurutrumlit ja 8 ringluspumpa (igaüks võimsusega 5,6 MW); vastavalt sellele on kanalid jaotatud rühmadesse ja alarühmadesse. Reaktori võimsust saab reguleerida 211 juhtvardaga.

Võrreldes vesireaktoritega on grafiitaeglustiga RBMK-reaktoritel rida omapärasusi, millest olulisimad on

- uraani ^{238}U intensiivsem muundamine plutooniumiks, mida saab äratöötanud kütusevarrastest eraldada ja kasutada nt tuumarelvade tootmiseks;
- soojuskandja (vee) toimimine liigsete neutronite neelajana; sellest järeldub, et vee liigkuumenemisel või ülemäärasel keemaminekul soojuslike neutronite kogus ning koos sellega reaktori võimsus suureneb (*positiivne termiline ja mulliefekt*); reaktori ebastabiilsuse teket peab välistama juhtvarraste sisseviimisel põhinev automaatne kaitsesüsteem, kusjuures osa juhtvarrastest (ligikaudu 10 %) peab olema pidevalt üleni reaktori aktiivsoonis;
- kaitsesüsteemi sätete tahtliku muutmise ja isegi selle tahtliku väljalülitamise võimalus reaktori talitluse ajal;
- vesireaktorite korral kasutatava tugeva (enamasti, nagu eelpool mainitud, kahekordse) kaitseümbrise puudumine, mis tähendab, et reaktori kesta lekke või lõhkemise korral pääsevad radioaktiivsed ained takistamatult väliskeskkonda.

Õöl vastu 26. aprilli 1986 tehti Ukrainas asuva Tšornobili tuumaelektrijaama 4. reaktoril siirdeprotsesside katsetusi, luues seejuures ebakompetentselt reaktori ohtlikke talitlusviise ja lülitades välja reaktori automaatkaitselahelaid [2.19]. Selle tagajärjel algas katsetuste ajal reaktori võimsuse laviinitaoline kasv, kütusevarraste sulamine, vee lagunemine vesinikuks ja hapnikuks ning lõpptagajärjena tekkis paukgaasi plahvatus. Tulekahju ajal paiskus reaktorist keskkonda ligikaudu 120 t aurustunud radioaktiivseid aineid ja ligikaudu 700 t radioaktiivset grafiiti, kusjuures radioaktiivse saaste üldkogus (50 MCi) oli ligikaudu 50 korda suurem kui Hiroshimale aastal 1945 heidetud tuumapommi plahvatusel. Eri hinnanguil arvatakse olevat radioaktiivse kiirituse tagajärjel katastroofile järgnenud 20 aasta jooksul hukkunud 10 000 kuni 30 000 inimest. Pärast katastroofi kaeti Tšornobili tuumaelektrijaama hävinud reaktor betoonsarkofaagiga, katkestati kahe ehituseloleva reaktori rajamine, lülitati välja kõik 3 säilinud reaktorit, lõpetati selliste reaktorite tootmine ja täiustati Venemaal allesjäänud 12 reaktori kaitsesüsteeme. Leedus paiknevas Ignalina tuumajaamas, kus aastail 1977...1987 oli rajatud kaks seda liiki reaktorit elektrilise projektvõimsusega 1500 MW (tegeliku nimivõimsusega 1300 MW) lülitati esimene reaktor mittevastavuse tõttu Euroopa tuumaohutusnõuetele välja detsembris 2004, teine tuleb välja lülitada aastal 2009.

Kürii (Ci) on radioaktiivse ainekogumi aktiivsuse mõõtühik. Ainekogumi aktiivsus on 1 Ci, kui selles 1 s jooksul laguneb $3,700 \cdot 10^{10}$ aatomituuma.

Grafiitaeglustiga, kuid süsinikdioksiidsoojuskandjaga reaktorid töötati välja tuumaenergeetika arengu algaastail Suurbritannias ja on seal praegugi kasutusel. Kütusevardatorud on nendes reaktorites magneesiumisulamist, mistõttu neid nimetatakse *magnox*-reaktoriteks (sõnadest *magnesium non-oxidising*). Ka nendes reaktorites saab tõhusalt toota plutooniumi. Kuna radioaktiivse kiirituse risk on nende käidus osutunud liiga suureks, on nende talitus kavas lõpetada hiljemalt aastal 2010.

Maailma esimeses kommers-tuumaelektrijaamas *Calder Hall*, mis avati 27. augustil 1956, olid kasutusel magnoksreaktorid elektrilise võimsusega 60,5 MW. Nende põhiülesanne nii selles kui ka hiljem teistes Suurbritannia sama tüüpi tuumaelektrijaamades oli sel ajal aga mitte elektrienergia, vaid plutooniumi tootmine.

Paljundusreaktorid ehk **brüiderid** erinevad kõigist eelkäsitletuist selle poolest, et nad põhinevad kiiretel neutronitel ja et neis tekib plutooniumi näol uut tuumkütust enam kui seda reaktoris kulutatakse (sellest ka nimi *breeder*, ingl 'kasvataja, aretaja'). Tekkivast tuumkütusest ja reaktoris kasutatud tuumkütusest saadava energia suhet nimetatakse *paljundusteguriks*, mille väärtus on enamasti piirides 1,2...1,4. Paljundusteguri ülempiiriks peetakse teadaolevate reaktoriliikide korral 1,8.

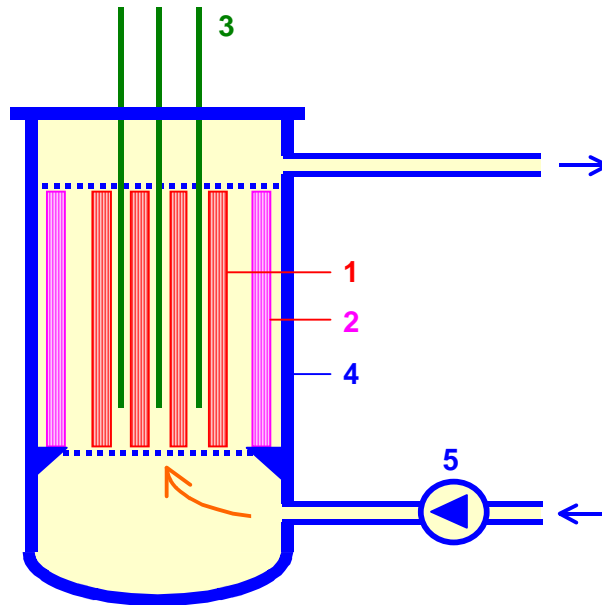
Nagu juba öeldud, tekib plutoonium ka mittepaljundusreaktorites. Vesiaeglustiga reaktorites on paljundustegur tavaliselt vahemikus 0,4...0,5 ja grafiitaeglustiga reaktorites kuni 0,8.

Enamasti kasutatakse paljundusreaktoris tuumkütusena uraan- ja plutooniumoksiidi segu (kuni 20 % PuO_2 ja vähemalt 80 % UO_2). Peale kütusevarraste on reaktoris paljundusvardad, mis paiknevad kas reaktori aktiivsoonis või seda ümbritsevas *mantlis* või mõlemas. Paljundusvardad sisaldavad looduslikku või vaesustatud uraani (viimane tekib tootmisjärgina uraani rikastamisel) ja kiirete neutronite ning muude tuumaprotsesside (eeskätt *beetamiinuslagunemise*) toimel muundub neis uraan ^{238}U plutooniumiks ^{239}U . Kuna reaktor põhineb kiiretel neutronitel, ei saa selles soojuskandjana kasutada vett, sest see toimiks neutronite aeglustajana. Enamasti on soojuskandjaks vedel naatrium, mille temperatuur reaktorist väljumisel on tavaliselt 500...600 °C. Väiksemates katselistes reaktorites on kasutatud ka elavhõbedat ja naatrium-kaalium-eutektikumi, kuna need on vedelad ka toatemperatuuril. Reaktorist väljuva soojuskandja kõrge temperatuur võimaldab reaktori juurde kuuluvas aurugeneraatoris tekitada kõrgrõhulist ülekuumendatud auru (nt 14 MPa, 510 °C) ja suurendada seega tuumaelektrijaama kasutegurit.

Paljundusreaktori üks võimalikest ehituspõhimõtetest on esitatud joonisel **2.8.8**. Väljuv soojuskandja on suhteliselt tugevasti radioaktiivne (sisaldab naatriumi isotoopi ^{24}Na) ja suunatakse seetõttu soojusvahetisse, milles soojus edastatakse teise kontuuri naatrium-soojuskandjale ja alles sellelt aurugeneraatorile.

Reaktor ja esimese kontuuri soojusvaheti võivad paikneda ka ühises paagis. On ka teisi mitmesuguseid ehituspõhimõtteid (sealhulgas nt heeliumi kasutamine soojuskandjana ja tooriumi kasutamine paljunduse lähteainena). Kiiretel neutronitel põhinevate paljundusreaktorite korral on kõrge töökindluse saavutamine osutunud tunduvalt raskemaks kui tavapäraste surve- ja keevvesireaktorite korral. Pealegi on neist saadav plutoonium-tuumkütus kallim kui tavapärane rikastatud uraan ja selle tootmine on kaotanud aktuaalsuse, kuna plutooniumi võib suurel hulgal saada likvideeritavatest tuumarelvadest. Seetõttu oli maailma avalikes tuumaelektrijaamades 2007. aasta alguses talitluses ainult 4 seda liiki reaktorit (Jaapanis, Kasahstanis, Prantsusmaal ja Venemaal). Maailma suurim selline reaktor *Super Phénix* (Creys-Malville, Prantsusmaa) elektrilise võimsusega 1200 MW lülitati talitlusest välja aastal 1997 liiga suurte käidukulude tõttu ning poliitilistel tuumaohutuse kaalutlustel.

Esimene kiiretel neutronitel põhinev katseline paljundusreaktor valmis aastal 1951 USAs ja 20. detsembril 1951 kasutati seda esmakordselt maailmas elektrienergia tootmiseks tuumaenergiast. Esimesel päeval oli toidetava elektrienergia (4 hõõglambi) võimsus 800 W, järgmisel päeval saavutati täisvõimsus 100 kW.



Joonis 2.8.8. Paljundusreaktori ehituspõhimõte (näide). 1 kütusevardad, 2 paljundusvardad, 3 juhtvardad, 4 reaktori kest, 5 naatriumpump

On mitmesuguseid teisigi tuumareaktorite liike, mis aga ei ole veel leidnud tegelikku majanduslikult õigustatud rakendamist energeetikas.

Tuumareaktorite kütusevarrastes tekib uraani lagunemise tulemusel hulgaliselt mitmesuguseid radioaktiivseid ja mitteradioaktiivseid aineid. Näitena on tabelis **2.8.1** esitatud selliste ainete kogused (kokku 45 kg) pärast seda, kui 1 tonnist rikastatud uraanist (3,3 % ^{235}U) on reaktoris võetud 34 GWd energiat [2.20].

Uraanist tekkinud ainete hulgas on nii inimestele kui ka loomadele eriti ohtlikud

- plutoonium, mille kõik ühendid on mürgised,
- tseesium ^{137}Cs , mis käitub organismis nagu kaalium ja osaleb kõigi keharakkude ainevahetuses,
- strontsium ^{90}Sr , mis käitub organismis nagu kaltsium ja salvestub luudes, jäädes sinna elu lõpuni,
- jood ^{131}I , mis koguneb kilpnäärmesse ja võib põhjustada selle vähki.

Tabel 2.8.1. 1 tonnis rikastatud uraanis (3,3 % ²³⁵U) tekkivad laguained energiavõtul 34 GWd

Aine	Poolestusaeg	Kogus kg	Keemiline analoog	Ohtlikkus
Plutoonium ²³⁹ Pu	2,46·10 ⁴ a	~ 10		••••
Kergemad radioaktiivsed isotoobid:				
tseesium ¹³⁷ Cs	33 a	1,768	K	•••
tehneetsium ⁹⁷ Tc	26·10 ⁶ a	0,865	Mn	•••
tsirkoonium ⁹⁵ Zr	65 d	0,796		•••
strontsium ⁹⁰ Sr	28 a	0,533	Ca	••••
rubiidium ⁸⁷ Rb	5·10 ¹⁰ a	0,246	K	•••
jood ¹³¹ I	8,04 d	0,237		•••
euroopium ¹⁵² Eu	9,3 h	0,045		•••
samaarium ¹⁵¹ Sm	90 a	0,042		•••
krüptoon ⁸⁵ Kr	10,6 a	0,026		•
ruteenium ¹⁰⁶ Ru	1,0 a	0,022	Rh	••
Mitterradioaktiivsed isotoobid:				
Xe, Nd, Mo, Zr, Ru		21,18		
Ba, Pd, La, Pr, Cs		6,66		
Sm, Te, Y, Rh, Sr		2,605		
Kr, Eu, Gd, Rb, I		0,745		
Kokku		~ 45		

Tuumajaamade normaalsel talitlusel ja äratöötanud kütusevarraste normaalsel transpordil ja ladustamisel need ained keskkonda ei pääse. Lühiealised radioaktiivsed isotoobid lagunevad kütusevarraste ajutisel salvestamisel tuumajaamade säilitusbasseinides, plutoonium eraldatakse taaskäitlemistehases, pikemaalised isotoobid ladustatakse pärast seda konteinerites või valatuna tehiskivisse nn lõpplattu, mis ehitatakse kaljusesse pinnasesse 1...2 km sügavusse. On ehitatud ka maapealseid lõppladusid, mille eeliseks loetakse olevat lihtne järelevalve. Varemadel aegadel on tuumajäätmeid ja isegi terveid äratöötanud reaktoreid heidetud merre (eriti palju Barentsi merre).

Uraanituuma lõhestumise neutronitega pommitamisel avastasid 22. detsembril 1938 Berliini *Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie* direktor Otto Hahn (1879–1968) ja sama instituudi keemiateadlane Fritz Straßmann (1902–1980). Aastal 1939 tuvastas O. Hahni endine kaastöötaja, Rootsi põgenenud füüsik Lise Meitner (1878–1968), et tegemist on tuumareaktsiooniga, mille tulemusena vabaneb **tuumaenergia**. Pärast seda algas Saksamaal, USA-s ja mujal tuumareaktsioonide intensiivne uurimine eeskätt tuumareaktsiooni loomise lootuses. Esimene katseline grafiitaeglustiga, Itaalia-USA füüsiku Enrico Fermi (1901–1954) ja Ungari-USA füüsiku Leo Szilardi (1898–1964) patendi järgi valminud tuumareaktor käivitus 2. detsembril 1942 Chicago ülikoolis.

Eestis on NSV Liidu mereväe Paldiski õppekeskuses talitlenud 2 allveelaeva-tuumareaktorit soojusvõimsusega 70 ja 90 MW, mis pärast NSV Liidu vägede lahkumist peatati. Tuumakütus on reaktoritest kõrvaldatud, kuid nende lammutamine võib alata alles mõnekümne aasta pärast.

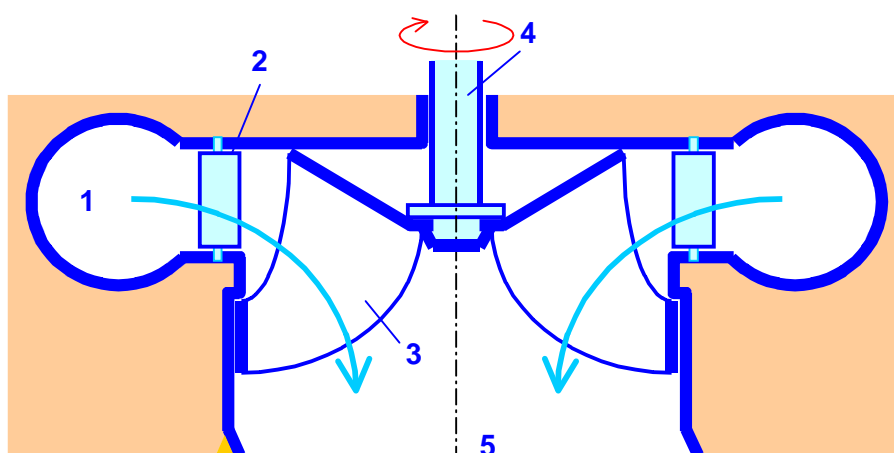
2.9 HÜDROTURBIINID

Hüdroturbiin muundab vee kineetilise energia mehaaniliseks pöörlemisenergiaks. Nüüdisaja hüdroelektrijaamades kasutatakse peamiselt kolme liiki hüdroturbiine:

- radiaal-aksaalseid ehk Francise turbiine,
- pöördlabalisi ehk Kaplani turbiine,
- kopp- ehk Peltoni turbiine.

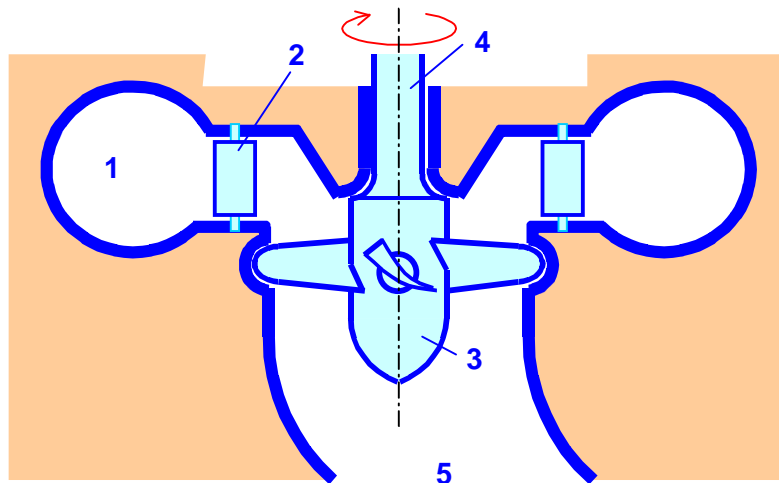
Esimesed kaks kuuluvad reaktiivturbiinide, viimane aktiivturbiinide hulka.

Radiaal-aksaalturbiini (joonis 2.9.1) välmis aastal 1849 ühest varasemast (aastal 1838 Samuel B. Howdile antud) patentist lähtudes *Locks and Canal Company of Lowell* (Massachusetts, USA) peainsener James Bicheno Francis (1815–1892). Turbiin on enamasti püstse võlliga ja selle tööratas labad on võlliga jäigalt ühendatud. Väiksemate turbiinide võll võib olla ka rõhtne. Vesi siseneb turbiini hüdroelektrijaama paisjärvest *spiraalkanali* kaudu, mis tagab vee ühtlase sissevoolu tööratas kogu ümbermõdul, läbides seejuures pööratavatest labadest (16...32 labast) koosnevat *juhtaparaati*. Viimane reguleerib vee vooluhulka ja suunab selle tööratas labadele (neid on tavaliselt 9 kuni 19). Vesi väljub turbiinist telje suunas *imitorusse*. Turbiin on väga lihtsa ning töökindla ehitusega ja sobib kasutamiseks vee rõhukõrgusel 30...650 m (neid on aga olemas ka väiksemale rõhukõrgusele, nt isegi 3 m). Valmistatakse selliseid turbiine enamasti võimsusega 1...800 MW ja rakendatakse kiire langusega (nt mäestiku-) jõgedel, millele saab ehitada kõrgeid paisusid. Turbiini pöörlemissagedus oleneb rõhukõrgusest ja on tavaliselt vahemikus 80...200 1/min.



Joonis 2.9.1. Francise turbiini ehituspõhimõte. 1 spiraalkamber, 2 juhtaparaat, 3 tööratas, 4 võll, 5 imitoru

Eelmise madalamal rõhul talitleva **pöördlabalise turbiini** (joonis 2.9.2) konstrueeris laevakruvi eeskujul lausmaajõgede hüdroelektrijaamade jaoks aastal 1912 Brno tehnikaülikooli assistent Viktor Kaplan (1876–1934). Ka see turbiin on lihtsa ja töökindla ehitusega ja seda kasutatakse vee rõhukõrgusel 2...45 m. Selliseid turbiine saab valmistada väga mitmesuguse nimivõimsusega – 10 kW kuni 150 MW. Suuremate turbiinide telg on püstne, väiksemad turbiinid võivad olla ka rõht- või kaldteljega. Töölabasid on tavaliselt 4 või 6, suurte turbiinide tööratas läbimõõt võib olla kuni 10 m. Turbiinide pöörlemissagedus on üldiselt väiksem kui sama võimsusega Francise turbiinidel ja jääb tavaliselt alla 100 1/min.

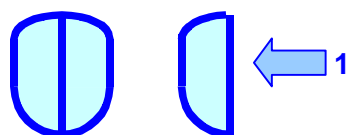


Joonis 2.9.2. Kaplani turbiini ehituspõhimõte. 1 spiraalkamber, 2 juhtparaat, 3 tööratas, 4 võll, 5 imitoru

Kaplani turbiiniga väga sarnane on **propellerturbiin**. Erinevus seisneb selles, et propellerturbiini labad on jäigalt ühendatud tööratte võlliga, mis teeb selle ehituse lihtsamaks. Selliseid turbiine valmistatakse samasuguses nimivõimsus- ja nimikiirusvahemikus nagu Kaplani turbiinegi.

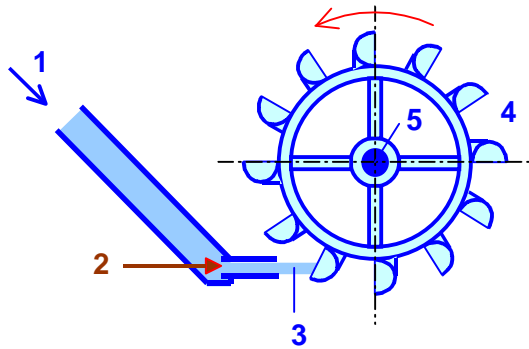
Eesti pishüdroelektrijaamades on peaaegu eranditult kasutusel Kaplani turbiinid. Seda liiki turbiinid võimsusega 40 MW on paigaldatud ka Narva hüdroelektrijaama.

Kopp- ehk **Peltoni turbiin** kujutab endast vesiratta edasiarendust, mis seisneb selles et tööratte lamedad labad on asendatud kaheosaliste koppadega (joonis 2.9.3), millele suunatakse vaba veejuga (joonis 2.9.4). Juga jaguneb kaheks (kopa mõlemale poolele) ja paneb tööratte pöörlema. Kopa optimaalne joonkiirus on ligikaudu pool kopale suunatud vee kiirusest.



Joonis 2.9.3. Peltoni turbiini kopa kujunduspõhimõte (eest- ja külgsuuna). 1 veejoa suund

Esimese kopturbiini valmistas aastal 1878 vesiratta talitlusel tehtud tähelepanekute alusel California ühe kullaleiukoha puusepp Lester Allan Pelton (1829–1908) ja sai sellele aastal 1889 USA patendi.



Joonis 2.9.4. Peltoni turbiini ehituspõhimõte. 1 vee juurdeviigitoru, 2 vooluhulga reguleerimisseadis, 3 veejuga, 4 tööratas, 5 võll

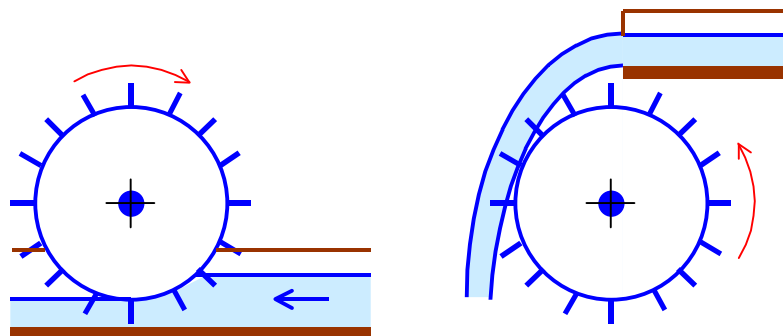
Peltoni turbiin on enamasti rõhtsa võlliga, kuid valmistatakse ka püstvõlliga turbiine. Töörattale toimivaid veejugasid on enamasti 2, kuid võib olla ka rohkem. Sellised turbiinid sobivad kasutamiseks rõhukõrgustel 100...1800 m ja nende nimivõimsus võib olla kuni 450 MW. Vee suurema suhtelise energiasisalduse tõttu on nende mõõtmed väiksemad, pöörlemissagedus aga suurem kui Francise ja Kaplani turbiinidel (tavaliselt 500...1500 1/min). Peltoni turbiine kasutatakse eeskätt mägijõgedel, kui hüdroelektrijaama veehoidla saab paikneda palju kõrgemal kui turbiinihoone.

Hüdroturbiine iseloomustab kõrge kasutegur, mis tavaliselt on piirides 90...96 %. Võimsus turbiini võllil avaldub väga lihtsa valemiga

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

P võimsus turbiini võllil W
 η turbiini kasutegur
 ρ vee tihedus kg/m^3
 g raskuskiirendus m/s^2
 H rõhukõrgus m ,
 Q vee vooluhulk m^3/s

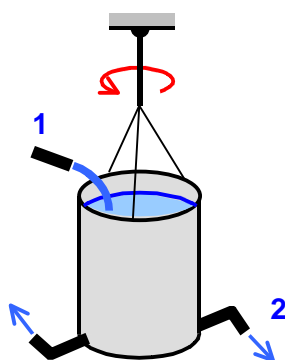
Hüdroturbiini eelkäija on **vesiratas**, mille kohta on kirjalikke teateid Kreeka Väike-Aasia kolooniatest alates aastast 230 eKr. Esimesed, altvoolu-vesirattad paiknesid lihtsalt jõe veevoolus, kuid peagi hakati neid paigutama erikanalitesse (joonis 2.9.5), millega nende kasuteguriks saadi ligikaudu 30 %. Täiuslikum, ülaltvoolu-vesiratas, milles kasutati nii vee kineetilist energiat kui ka vee raskustoimet, tuli kasutusele keskaja Euroopas ja selle kasutegur oli juba ligikaudu 70 %.



Joonis 2.9.5. Altvoolu- (vasakul) ja ülaltvoolu-vesiratas

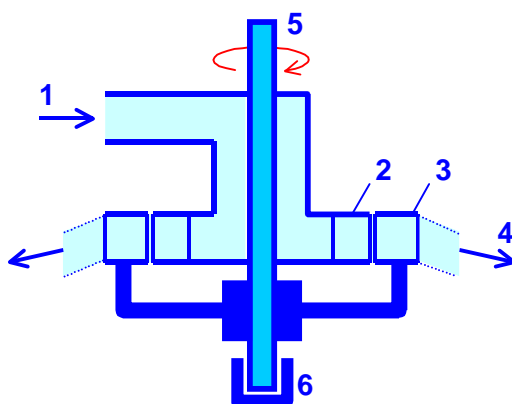
Maailma 17. sajandi võimsaim vesirattasüsteem ehitati aastal 1685 vee pumpamiseks Verailles' lossi ja see koosnes 14 vesirattast läbimõõduga 12 m. Süsteemi koguvõimsus oli ligikaudu 80 hj. Maailma kaks suurimat vesirattast (kumbki 500 hj) paigaldati aga aastal 1858 Kreenholmi Manufaktuuri.

Hüdroturbiini põhimõtte visandas umbes aastal 1500 Leonardo da Vinci, kuid esimese turbiinitaolise seadme – tangentsiaalsete väljavoolutorudega varustatud veeanuma, mis reaktiivjõudude mõjul veevooluga vastupidises suunas pöörlema pandi (joonis 2.9.6), valmistas aastal 1750 saksa füüsik Johann Andreas von Segner (1707–1777).



Joonis 2.9.6. Segneri ratas. 1 juurdevoolu-, 2 äravoolutoru

Aastal 1760 leidis *Segneri ratas* esimest tegelikku rakendust ühes jahuveskis ja pärast seda leidis šveitsi matemaatik Leonhard Euler (1707–1783), kes aastal 1756 oli matemaatiliselt uurinud tuuleturbiine, vajaliku olevat välja töötada ka reaktiiv-hüdroturbiinide matemaatiline teooria. 1820ndate aastate alguses hakati Prantsusmaal otsima veejõu parema rakendamise võimalusi ja aastal 1826 pandi seal välja 6000-frangine auhind sellele, kellel õnnestub välja töötada tööstusele sobiv piisavalt võimas ja vesirattast tõhusam jõumasin. Juba enne seda olid sellesuunalisi uuringuid alustanud Saint-Étienne'i mäekõrgkooli (*École des Mines de Saint-Étienne*) professor Claude Burdin (1790–1873) ja tema õpilane Benoît Fourneyron (1802–1867), kusjuures masin, millele Burdin andis nime **turbiin**, oli valminud aastal 1824. See aga ei rahuldanud veel auhinnatingimusi ja aastal 1827 esitas Fourneyron selle täiustatud, tegelikult kasutamiseks sobiva versiooni võimsusega 6 hj ja selle aja kohta vägagi kõrge kasuteguriga 80...85 %. Fourneyron saigi väljakuulutatud auhinna [1.15]. Burdini ja Fourneyroni ühistöös valminud turbiini (joonis 2.9.7) põhimõte on samasugune nagu Francise turbiinil, ehitus aga vastupidine: vesi suunatakse turbiini aksiaalselt ja väljub radiaalselt, läbi välise töörata.



Joonis 2.9.7. Burdini-Fourneyroni turbiini ehituspõhimõte. 1 vee sissevool, 2 juhtlabad, 3 paljulabaline tööratas, 4 vee väljavool, 5 võll, 6 tugilaager

Aastal 1838 lõi prantsuse matemaatik ja sõjaväeinsener Jean Victor Poncelet (1788–1867) hüdroturbiinide matemaatilise arvutuse alused ja pärast seda hakati tootma mitmesuguseid teisigi turbiiniliike. Hüdroturbiinid jõudsid suhteliselt kiiresti ka Eestisse. Nii näiteks asendati Kreenholmi Manufaktuuris aastal 1860 eelmainitud võimsad vesirattad 500-hobujõuliste turbiinidega ja aastal 1868 paigaldati sinna maailma selle aja võimsaim turbiin – 1300 hj. Aastal 1890 oli Kreenholmi turbiinide koguvõimsus 6880 hj ja see manufaktuur kuulus maailma suurimate veejõudu kasutavate ettevõtete hulka [2.21].

Hüdroturbiinide kasutamine elektrienergia saamiseks algas aastal 1878 (vt jaotis 5.4).

2.10 TUULETURBIINID

Tuuleturbiin muundab tuule kineetilise energia mehaaniliseks pöörlemisenergiaks. Nüüdisaja tuuleelektrijaamades kasutatakse peamiselt kahte liiki tuuleturbiine:

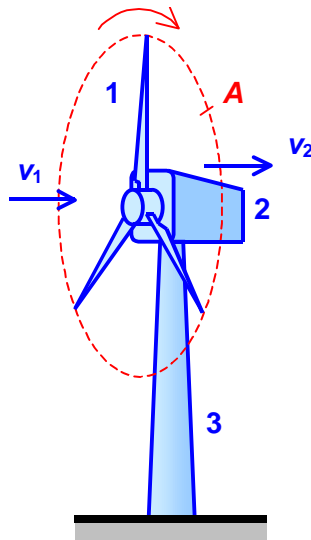
- rõhtsa võlliga propellerturbiine,
- püstvõlliga Darrieus' turbiine

Üle 99 % kõigist tuuleturbiinidest kuulub esimesse liiki. Käesoleval ajal valmistatakse neid võimsusega mõnekümnest vatist kuni mõne megavatini; tuuleelektrijaamades on kasutusel enamasti turbiinid võimsusega 0,1...6 MW.

Tuuleturbiini nimivõimsust ei väljendata enamasti võimsusena võllil nagu nt auru-, gaasi- ja hüdroturbiinide puhul (kuigi see on võimalik), vaid turbiiniga ühendatud elektrigeneraatori nimivõimsuse kaudu.

Võimsad (tuuleelektrijaamade) turbiinid koosnevad järgmistest osadest (vt joonis 2.10.1):

- tiivik, mis omakorda koosneb tiibadest, nabast, võllist ja sageli ka tiibade pöörämehhanismist;
- gondel, mille koosseisu kuuluvad tiiviku võlli laagerdus ja gondli pöörämehhanism; gondlis asuvad ka reduktor (kui see olemas on) ja elektrigeneraator koos oma abiseadmetega;
- mast, mis enamasti on torutaoline ja valmistatakse terasest või terasbetoonist; masti sisemuses nähakse ette trepp või redel; väiksemate turbiinide korral (võimsusega kuni umbes 100 kW) võidakse kasutada ka sõrestikmaste.



Joonis 2.10.1. Propellertüüpi tuuleturbiini ehituspõhimõte. 1 tiivik, 2 gondel, 3 mast. A tiiviku pöörlemispindala, v_1 tuule kiirus tiiviku ees, v_2 tuule kiirus tiiviku taga

Tiivikus on enamasti 3 tiiba, kuid on valmistatud ka kahe- ja (väga harva) ühettiivalisi tiivikuid. Tiiva tipu liikumiskiirus on nüüdisaegsetel võimsatel tuuleturbiinidel 6...8 korda suurem kui tuule kiirus, mistõttu propellerturbiine nimetatakse *kiirekäigulisteks*. Turbiini nimi-pöörlemissagedus on tavaliselt vahemikus 20...40 1/min.

Kui tiivikust mõjutamata tuule kiirus tiiviku ees on v_1 , on tuule võimsus tiiviku pöörlemispindalal enne tiivikut

$$P_1 = \frac{1}{2} m v_1^2 / t = \frac{1}{2} \gamma A v_1^3$$

P_1 õhuvoolu võimsus W

$m = \gamma A v_1 t$ pöörlemispindalale suunduva õhu mass kg

γ õhu tihedus (ligikaudu 1,2 kg/m³)

A tiiviku pöörlemispindala m²

v_1 õhu kiirus m/s

t aeg s

Tuule võimsus tiiviku pöörlemispindalal on seega võrdeline tuule kiiruse kuubiga. Tuule kiiruse vähenemisel väheneb see võimsus kiiresti ja allpool teatavat kiirust ei ole tuuleturbiini kasutamine otstarbekas. Enamasti kasutataksegi tuuleturbiine kohtades, kus aasta keskmine tuulekiirus on vähemalt 5 m/s. Enamik tuuleturbiine nähakse ette tuule kiirusele nimitalitlusel 12...16 m/s, kusjuures turbiin käivitub, kui tuule kiirus on 2...4 m/s, ja lülitub välja, kui tuule kiirus tõuseb üle 25...35 m/s.

Kui tiiviku järel on tuule kiirus v_2 ja kui tiivikut läbinud õhuvoolust äravõetud võimsus muundub täielikult tiiviku pöörlemisvõimsuseks, avaldub see teoreetilise valemiga

$$P_2 = \frac{1}{2} \gamma (v_1^2 - v_2^2) \times \frac{1}{2} (v_1 + v_2) A$$

P_2 tiivikule antav võimsus W

v_2 õhu kiirus tiiviku taga m/s

Kui kasutada lühitähist

$$v_2 / v_1 = x ,$$

saame pärast muundusi avaldada turbiini teoreetilise võimsussuhte valemiga

$$c_{\text{teor}} = P_2 / P_1 = \frac{1}{2} (1 + x) (1 - x^2)$$

c_{teor} teoreetiline võimsussuhe

Suhet P_2 / P_1 ei saa käesoleval juhul nimetada *kasuteguriks*, sest osa õhuvoolust võimsusega P_1 läheb turbiini tiivikust paramatult mööda ega saa muunduda tiiviku pöörlemisvõimsuseks.

On lihtne tõestada, et selliselt avalduval suurusel on maksimum suhte x väärtusel

$$x = 1 / 3$$

ja nimelt

$$c_{\text{teor}} = 16 / 27 \approx 0,593 .$$

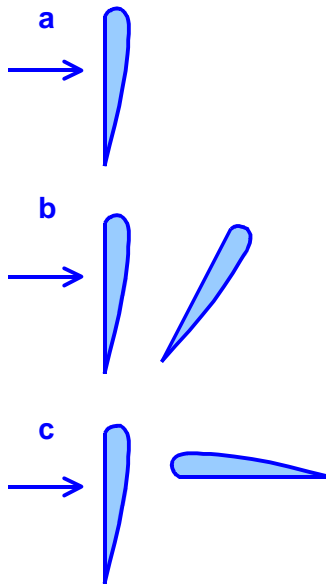
Tuuleturbiini suurim teoreetiliselt võimalik võimsussuhe on seega ligikaudu 59 %, tegelik võimsussuhe aga enamasti vahemikus 40...50 %.

Tuuleturbiini võimsussuhte (sks *Leistungsbeiwert*, ingl *coefficient of power*) mõiste võttis kasutusele ja suurima teoreetiliselt võimaliku võimsussuhte valemi tuletas aastal 1919 Göttingeni (Saksamaa) aerodünaamikainstituudi direktor Albert Betz (1885–1968), mistõttu seda nimetatakse ka *Betzi valemiks*.

Et tiivik pöörleks konstantse (või ligikaudu konstantse) kiirusega, tuleb tiibadele toimivat jõudu olenevalt tuule kiirusest reguleerida. Väiksematel turbiinidel (võimsusega kuni ligikaudu 500 kW) võivad tiiviku tiivad olla nabaga jäigalt ühendatud, kusjuures aga tiibade ristlõige on sellise kujuga, et tuule kiiruse suurenemisel üle teatava väärtuse tekib aerodünaamiline *vääratusnähtus* ja tiibadele toimiv jõud väheneb. Selline isetoimiv reguleering on väga lihtne, kuid võib tekitada turbiiniga ühendatud elektrigeneraatori võimsuse ja pinge lubamatult suuri kõikumisi ja seetõttu on selle kasutamine harvenenud. Enamasti, eriti aga suuremate turbiinide puhul, kasutatakse reguleerimiseks

- aktiivset vääratusmeetodit, muutes vääratuse tekketingimusi tiibade teatava pööramisega pärituult,
- kaldemeetodit, muutes tiibade pöördnurka tuule suhtes tiibade pööramise teel vastutuult.

Kõik kolm reguleerimisviisi on lihtsustatult kujutatud joonisel **2.10.2**.



Joonis 2.10.2. Tiiviku tiibadele mõjuva pöörlemapaneva jõu reguleerimisviisid. a väärtusnähtuse abil, b aktiivse väärtusmeetodiga, c kaldemeetodiga. Nooled näitavad tuule suunda

Tiibade pöörämismehhanism asub tiiviku nabas. Gondli ja tiiviku pööramine vastavalt tuule suunale toimub automaatselt sellekohase servoajami abil.

Nagu eelpool öeldud, on tuuleturbiini võimsus võrdeline tiiviku pöörlemispindalaga. Seetõttu on võimsate tuuleturbiinide mõõtmed suhteliselt suured. Ettekujutuse saamiseks on mõningad sellekohased ligikaudsed andmed esitatud tabelis **2.10.1**.

Tabel 2.10.1. Propeller-tuuleturbiinide mõõtmeid

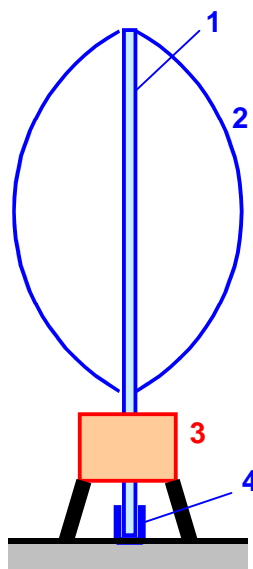
Turbiini nimivõimsus MW	Tiiviku läbimõõt m	Tiiviku naba kõrgus m
0,5...0,6	~ 40	40...65
1,5...2	~ 70	65...115
4,5...6	112...126	120...130

Et turbiini tiivad oleksid mehaaniliselt piisavalt tugevad, kasutatakse nende materjalina enamasti klaaskiududega (uueal ajal ka süsinikkiududega) armeeritud valuvaiku.

Tuuleturbiini eelkäija on puritiibadega tuulik, mille tekkelugu on vaadeldud jaotises **1.4**. Selle võimsussuhe on aga suhteliselt madal (ligikaudu 0,2) ja pöörlemiskiirus väike, mistõttu see ei sobi energeetiliseks kasutamiseks. Veski või turbiini tiiva liikumise aerodünaamilisi seaduspärasusi uuris juba aastal 1738 Baseli ülikooli füüsikaproffessor Daniel Bernoulli (1700–1782), tiiva otstarbekaima kuju valikut aga aastal 1756 Leonhard Euler. Aastal 1903 töötas taani meteoroloog Poul La Cour (1846–1908) nendele uurimustele toetudes ja oma teoreetiliste ja katseliste uurimustulemuste põhjal välja kiirekäigulise kolmetiivalise turbiini, mille sobivalt valitud ristlõikekujuga tiivad olid jäigalt kinnitatud tiiviku nabale. Sellised *taani tüüpi* turbiinid võimsusega mõni kuni mõnikümmend kilovatti tulid nii Taanis kui ka mujal kohe

kasutusele elektrienergia saamiseks kohtades, kuhu energiasüsteemide võrgud ei ulatunud. Tuuleturbiinide kasutamine energia andmiseks energiasüsteemidesse algas pärast energiakriisi puhkemist aastal 1973, mil paljud riigid leidsid olevat vajaliku hakata tuuleenergeetikat mitmesuguste soodustuste ja toetustega stimuleerima. Ühtlasi tõi see kaasa turbiinide nimivõimsuse kasvu, töökindluse suurenemise ja nii maksumuse kui ka käidukulude vähenemise, mistõttu tuuleelektrijaamade tähtsus elektroenergeetikas on viimastel aastatel kiiresti kasvanud (vt jaotis 5.6).

Püstvõlliga turbiinidest on sagedaimini kasutusel kahe või kolme kaarekujulise (täpsemalt – *aheljoonekujulise*) tiivaga turbiin (joonis 2.10.3), mille patenteeris aastal 1931 prantsuse elektriinsener Georges Darrieus (1888–1979).



Joonis 2.10.3. Darrieus' tuuleturbiini ehituspõhimõte. 1 võll, 2 tiib, 3 elektrigeneraator, 4 tugilaager

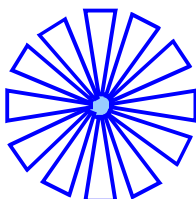
Turbiini eelisteks loetakse masti äralangemist, elektrigeneraatori paiknemist maapinna lähedal ja seda, et turbiin talitleb ühessamas asendis tuule igasuguse suuna korral. Ka on selle tormikindlus parem kui propellerturbiinidel. Ühtlasi on Darrieus' turbiinil mitmeid olulisi puudusi, sealhulgas

- tiivikule toimiva tuule väiksem kiirus, sest tiivik on maapinnale ligemal kui masti otsas paiknev propellertiivik,
- väiksem võimsussuhe (piirväärtus ligikaudu 0,4),
- väiksem kiirekäigulisus (enimalt ligikaudu 5),
- kiiruse mittereguleeritavus,
- keerukam toetus (eriti käib see suurte nimivõimsuste kohta),
- suurem materjalimahukus ja erimaksumus.

Nimetatud puuduste tõttu ei ole need turbiinid kuigi laialt kasutusel, olgugi et neid on valmistatud nimivõimsusega kuni 4 MW. Üldse on maailma tuuleelektrijaamades seni paigaldatud ainult ligikaudu 20 seda liiki turbiini, mõned neist on aga hiljem asendatud propellerturbiinidega. Paremini sobivad nad kasutamiseks kohalike energiaallikatena võimsusega mõni kuni mõnikümmend kilovatti.

On olemas ka teisi tuuleturbiinide liike, mille tehnilised näitajad on aga enamasti tagasihoidlikumad kui eelvaadeldud kahel liigil. Nende hulgas väärib siiski mainimist paljutiivaline (õigem oleks sel puhul öelda *paljulabaline*) aeglasekäiguline turbiin (joonis 2.10.4), mille leiutas aastal 1854 USA mehaanik Daniel Hallady. Selliseid turbiine valmistati

võimsusega 0,5...6 kW ja kasutati vee pumpamiseks ameerika farmides. 1887/88. aasta talvel ehitas USA leidur ja ettevõtja Charles Francis Brush (1849–1929) sellisel turbiinil põhineva maailma esimese tuuleelektrijaama võimsusega 12 kW.



Joonis 2.10.4. Hallady tuuleturbiini tiiviku ehituspõhimõte

Eestis tulid väikese (mõni kümnendiku kuni mõne kilovati) võimsusega taani tüüpi tuuleturbiinid koos külgeehitatud alalisvoolugeneraatoritega (*tuulegeneraatorid*) kasutusele 1920ndail aastail kohalike väikeste elektriteallikatena (valgustuseks, akude laadimiseks jms). Esimene suurem tuuleturbiin (150 kW) koos elektrigeneraatoriga ja kõige muu juurdekuuluvaga paigaldati aastal 1997 Tahkuna poolsaarele Hiiumaal.

2.11 FOTOELEKTRILISED MUUNDURID

Fotoelektriliste muundurite hulka kuuluvad

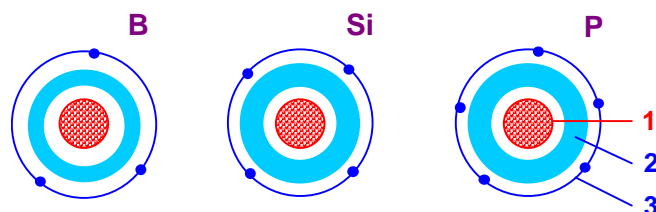
- ventiilfotoelemendid,
- vaakum- ja gaastäitega (lampdiod-) fotoelemendid,
- fototransistorid ja -türistorid,
- elektrokeemilised vedelikelemendid.

Energiatehnikas kasutatakse nendest ainult esimesi, sest ülejäänutel on muundamise kasutegur energeetika seisukohast liiga madal; küll aga leiavad nad kasutamist mõõtetehnikas ja automaatikaseadmes. Ventiilfotoelementide tähtsaim kasutusala on päikesekiirguse muundamine elektrienergiaks; peale selle saab neid aga edukalt kasutada ka valgusmõõtetehnikas, valgusele reageerivais automaatikaseadmes ja infotehnikas.

Energeetikas võivad osutada vastuvõetavateks ka elektrokeemilised fotoelemendid, kuid nende arendamine on alles algusjärgus.

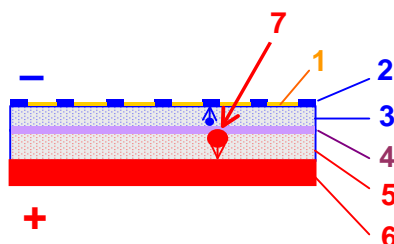
Ventiilfotoelementides kasutatakse kõige sagedamini **räni**. Räni on pooljuht, mille aatom koosneb tuumast ja kolmest elektronihist, kusjuures välimises kihis on neli elektroni (vt joonis **2.11.1**). Kui räni kristallvõresse viia fosforiaatomeid, mille välimises elektronihis on viis elektroni (kui räni *doteerida* fosforiga), võib sellises pooljuhikihis (*n-pooljuhikihis*), mida nimetatakse ka *emitteriks*, tekkida teatud tingimustel vabu elektrone. Räni doteerimisel booriaatomitega, mille välimises elektronihis on kolm elektroni, saadakse aga *p-pooljuht*, mille kihti nimetatakse ka fotoelemendi *baasiks*. Kahe õhukese (mõne mikromeetri paksuse) p- ja n-pooljuhikihivi vahel moodustub **p-n-siire** ehk ruumilaengutsoon. Kui sellesse tsooni läbi kiirguspoolse (enamasti ribalise) elektroodi satuvad piisavalt energiarikkad footonid, põhjustavad need erimärgiliste laengute eraldumist ja laengukandjate (elektronide ja *aukude*) liikumist vastaselektrioonidele. Selle tulemusel tekib elektromotoorjõud (vooluta

olekus enamasti ligikaudu 0,6 V) ja, kui väline vooluahel on suletud, elektrivool. Normaaltalitusel on fotoelemendi pinge enamasti ligikaudu 0,5 V.



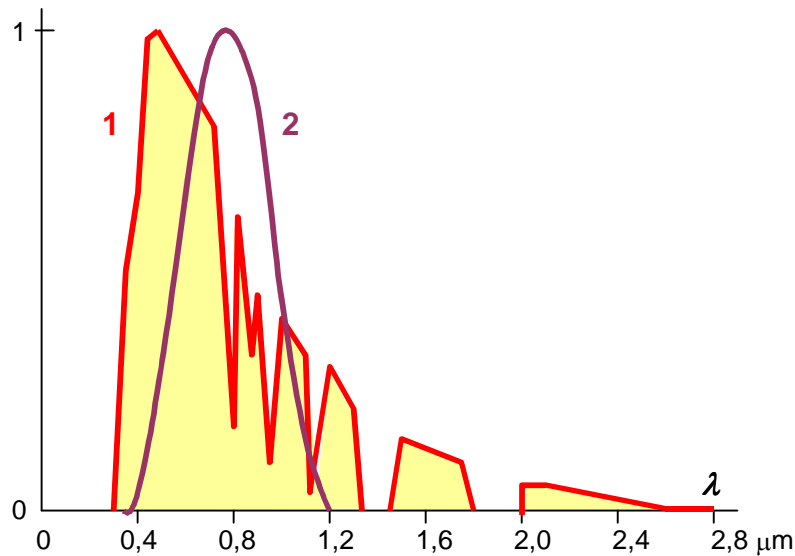
Joonis 2.11.1. Boori, räni ja fosfori aatomite põhimõtteline ehitus. 1 tuum, 2 sisemised elektronkihid, 3 välimine elektronkiht

Joonisel 2.11.2 on kujutatud levinuima ränifotoelemendi ehituspõhimõte. Et vältida kiirguse soovimatut peegeldumist fotoelemendi pinnalt, on see kaetud peegeldusvastase (*antirefleks*-) kihiga, milles enamasti kasutatakse titaanoksiidi (TiO_2). Fotoelemendi kogupaksus on nüüdisajal 0,2...0,3 mm ja pindala kuni $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$. Sobiva pinge ja voolu saamiseks ühendatakse fotoelemendid jada- ja rööpühenduse kombineerimise teel mooduliteks, need aga omakorda patareideks või patareisektsioonideks.



Joonis 2.11.2. Ränifotoelemendi ehituspõhimõte. 1 peegeldusvastane kiht, 2 ribaline NiCr-elektrood, 3 n-pooljuht (nt fosfordoteeringuga räni) paksusega ligikaudu $2 \mu\text{m}$, 4 p-n-siire, 5 p-pooljuht (nt boordoteeringuga räni), 6 metallelektrood, 7 footon ja selle toimel tekkivate laengukandjate paar

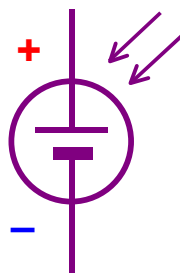
Kuna räni-fotoelemendi muundustegur oleneb vastuvõetava kiirguse lainepikkusest, kusjuures spektraalse muundusteguri maksimum ei lange kokku päikesekiirguse spektraaljaotuse maksimumiga (joonis 2.11.3), neeldub osa footone fotoelemendis ilma laengukandja paare tekitamata (muundudes soojuseks). Kuna tekib ka muid energiakadusid, on monokristall-ränifotoelemendi elektrilise kasuteguri teoreetiline piirväärtus ligikaudu 28 %. Tegelikult on laboratoorsesetel katseeksemplaridel saavutatud kasutegur kuni 24 %, tööstuslikult toodetavatel fotoelementidel aga 14...17 %. Vastavalt sellele on kiiritustiheduse 1 kW/m^2 korral voolutihedus elektroodidel ligikaudu $300\text{...}400 \text{ A/m}^2$.



Joonis 2.11.3. Päikesekiirguse suhteline spektraaljaotus Maa pinnal (1, lihtsustatult) ja tüüpilise ränifotoelemendi suhteline spektraalne muundustegur (2). λ lainepikkus. Neeldumisribad kiirgusspektris on tingitud Maa atmosfääris sisalduvast veeaurust ja süsinikdioksiidist

Kui monokristallilise räni asemel kasutada odavamast polükristallilist räni, tekivad lisaks kristallvõre defektidel ja tööstuslike fotoelementide kasutegur on sel juhul enamasti piirides 13...15 %. Veel väiksem on kasutegur amorfse räni kasutamisel (5...7 %), kuid sel juhul saab fotoelemendi valmistada räni sadestamise teel klaasile väga õhukese kihina (alla 1 μm), mis tugevasti vähendab materjalikulu ja fotoelemendi maksumust. Elektroodidena kasutatakse sel juhul metalloksiidkihtesid, mis on piisava juhtivuse saavutamiseks doteeritud sobivate elementidega (nt tinaoksiidiga $\text{SnO}_2:\text{F}$ või tsinkoksiidiga $\text{ZnO}:\text{Al}$). Kuna nii elektrood- kui ka pooljuhtkihid on väga õhukesed, vähendavad need klaasi läbipaistvust suhteliselt vähe, mis võimaldab sellist klaasi kasutada nt laekendes.

Fotoelemendi tingmärk [2.1] on esitatud joonisel 2.11.4.



Joonis 2.11.4. Fotoelemendi tingmärk

Peale räni kasutatakse fotoelementides ka teisi pooljuhtmaterjale, millest levinuimad on galliumarseniid GaAs , kaadmiumtelluriid CdTe ja vask-indium-diseleniid CuInSe_2 . Igal materjalil on kiirguse spektraalne muundustegur erisugune ja kui luua fotoelement, milles on jadamisi ühendatud kaks või kolm spektri eri osadele tundlikku osaelementi, on nende resulteeruv tundlikkusriiba tugevasti laiem kui igal

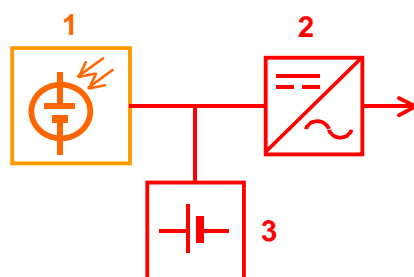
üksikelemendil ja kasutegur vastavalt kõrgem. Selliseid fotomuundureid nimetatakse **tandemfotoelementideks** ja nende kasutegur võib olla kuni 40 %.

Kalli pooljuhtmaterjali kogust fotoelementides ja seega ka nende maksumust saab vähendada kiirguskontsentraatorite (enamasti läätssüsteemide) abil, mis suurendavad fotoelemendi kiirustihedust kuni mõnikümmend korda. Kontsentraatoritega varustatud tandemfotoelemendipatareide reaalne kasutegur on nüüdisajal ligikaudu 35 %. Kontsentraatori kasutamisel tuleb aga fotoelementide moodul või patarei varustada automaatse ajamiga, mis pöörab selle alati risti päikesekiirtega.

Fotoelementide mooduleid valmistatakse võimsusega mõnest millivatist kuni mõnesaja vatini. Väiksemaid kasutatakse pisitarvitite (kellade, taskuarvutite jms) toiteks, suuremaid valgustusseadmete, valgus-liiklusmärkide ja signalisatsioonisüsteemide toiteallikaina; et tagada toite pidevust, kombineeritakse nad enamasti akudega. Moodulid võidakse ühendada ka patareideks võimsusega kuni mõnikümmend, harvemini ka kuni mõnisada kilovatti ja kasutada kohalike, elektrivõrguga ühendatud elektritoiteallikaina, mis võidakse kinnitada hoonete katustele või lõunapoolsetele seintele. Päikesepatareidega on varustatud ka kõik Maa tehiskaaslased ja kosmosejaamad. Fotoelektrilistes päikeseelektrijaamades võib omavahel kokkuühendatud patareide koguvõimsus olla kuni 10 MW ja enamgi (vt jaotis 5.7). Katseliselt kasutatakse päikesepatareisid ka elektriautode ja -paatide toiteallikana.

Fotoelementide eelised energiaallikana seisnevad liikuvate osade puudumises, keskkonnasõbralikkuses, hooldamise lihtsuses ja kõrges töökindluses. Nende eluiga on tavaliselt 30...40 aastat. Puuduseks on suhteliselt suur erimaksumus (2000...5000 \$/kW), tippvõimsuse väike kasutustegur (päikesepaistelistes regioonides toodab päikesepatarei 1 kW tippvõimsuse kohta 1000...2400 kWh elektrienergiat aastas) ja neil põhjustel elektrienergia kõrge omahind (enamasti 10...50 eurotsenti 1 kWh kohta).

Kuna päikesekiirguse tihedus Maa pinnal on ligikaudu 1 kW/m², on elektrienergia tootmiseks kasutatavate fotoelementmoodulite eripindala tippvõimsuse järgi kasuteguri 5...15 % korral ligikaudu 6...20 m²/kW. Seega kujutavad päikesepatareid endast suhteliselt suurepinnalisi paigaldisi. Kui soovitakse ühendada päikesepatareisid elektrivõrguga või toita neist vahelduvvoolutarviteid, tuleb patarei varustada vaheldiga. Autonoomselt talitlevad päikesepatareid varustatakse peale selle enamasti veel akumulaatoriga (joonis 2.11.5).



Joonis 2.11.5. Päikesepatareist (1), vaheldist (2) ja akumulaatorist (3) koosneva paigaldise põhimõtteskeem. Lülitus- ja muud abiparaadid on näitamata

Fotoelektrilise efekti avastas juhtivas lahuses aastal 1839 noor prantsuse füüsik Alexandre Edmond Becquerel (1820–1891). Aastal 1877 valmistasid inglise füüsikud William Grylls Adams (1836–1915) ja R. E. Day esimese (seleen-) ventiilfotoelemendi ja aastal 1883 saavutas USA leidur Charles Fritts selle kasuteguriks ligi 1 %. Aastal 1940 avastas USA uurimisinstituudi *Bell Laboratories* füüsik Russell Ohl räni pn-siirde ja sellel asetleidva fotoelektrilise efekti, kuid ka selle kasutegur oli alla 1 %. Aastal 1954 õnnestus samas instituudis räni sihipärase doteerimise teel valmistada tegelikult kasutamiseks sobiv fotoelement kasuteguriga ligikaudu 6 % ja 4. oktoobril 1955 valmis seal maailma esimene katseline päikesepatarei. Juulis 1962 varustati 3600-elementilise päikesepatareiga sidesatelliit *Telstar 1*, misjärel algas fotoelementide kasutamine nii Maa tehiskaaslastel kui ka mitmesuguste maapealsete seadmete toiteallikana. 2006. aasta lõpus oli maapealsete energeetiliste päikesepatareide koguvõimsus maailmas ligikaudu 8 GW ja aastane juurdekasv ligikaudu 60 %.

Täpsete filtritega varustatud räni-fotoelemente kasutatakse tõhusate valgustehniliste mõõtemuunduritena, nt luksmeetrites ja heledusmõõturites.