

Erőművek és erőműrendszerek

Az alábbiakban közölt dolgozat az első eleme annak a cikksorozatnak, melyet a Magyar Villamos Művek Rt. támogatásával adunk közre. A tanulmány részletesen ismerteti a villamos energia termelésének módjait, az egyes erőműtípusokat, valamint az erőművek működését összehangoló villamosenergia-rendszert, a rendszer irányítását. A további cikkekben bemutatjuk a magyar villamosenergia-rendszert, közreadjuk a Magyar Villamos Művek Rt. erőműépítési stratégiáját, mely részleteen ismerteti a magyar erőműparkot és annak tervezett bővítési, felújítási programját. Részletesen bemutatjuk azokat a technológiákat, amelyeknek az MVM Rt szerepet szán a jövő energiarendszerének kialakításában. Fentiekén kívül ismertetjük azokat a törekvéseket, melyek célja, hogy Magyarországon a villamosenergia-szolgáltatás a színvonal, megbízhatóság és a környezet védelme szempontjából megfeleljen azoknak a követelményeknek, melyeket egy demokratikus berendezkedésű társadalom és egy működő gazdaság joggal elvár.

Villamosenergia-termelés

A villamos energia napjainkban nagyon szorosan, szinte észrevétlenül hozzátartozik mindennapi életünkhöz. Munkahelyünkön, otthonunkban annyira természetes a jelenléte, felhasználása, hogy leginkább csak a hiánya, a villamosenergia-ellátás zavarai okozta kényelmetlenségek során kerül érdeklődésünk középpontjába.

A természetben a villamos energia közvetlenül felhasználható formában nem áll rendelkezésünkre. A villamos energiát a természet erőforrásainak igénybevételével, „elfogyasztásával” meg kell termelnünk és el kell juttatnunk a fogyasztókhoz. Ezt az ember alkotta létesítményt, amelynek feladata a villamos energia termelése, *erőműnek* nevezzük. Felépítését tekintve az erőmű bonyolult műszaki berendezések együttese, amely az ember irányítása és ellenőrzése alatt teljesíti feladatát: a biztonságos és gazdaságos villamosenergia-termelést. Az erőművekben megtermelt villamos energia villamos hálózaton keresztül jut a fogyasztókhoz.

A villamosenergia-termelésben legfontosabb a termelés és fogyasztás egyensúlyának állandó és folyamatos biztosítása, mivel a villamos energia számottevően nem tárolható. E szigorú követelmény teljesítése határozza meg mind az egyes erőművek, mind az erőművekből és a villamos hálózathoz álló villamosenergia-rendszer működtetését és fejlesztését.

Természeti erőforrások

Az erőművekben a villamos energia termeléséhez azok a természeti erőforrások használhatók fel, amelyekből közvetlenül vagy megfelelő átalakítással energia nyerhető. Néhány példa:

- a szél mozgási energiája közvetlenül alkalmas szélkerekek (szélturbinák) hajtására;
- a vízfolyások helyzeti energiájával vízturbinák működtethetők erőgépekként;
- a tüzelőanyagok elégetésével hasznosítható energia nyerhető;
- egyes atommagok hasításakor (vagy egyesítésekor) energia szabadítható fel.

Ebből következően az erőmű felépítését, működését alapvetően az határozza meg, hogy milyen természeti erőforrást használ fel.

A természeti erőforrások felhasználásának megítélésében lényeges szempont, hogy az adott erőforrás a természetben megújul-e vagy elfogy. A szél, a Nap, a természetes vízfolyások energiája, a tenger árapálymozgása (és ez a felsorolás korántsem teljes) az erőmű számára

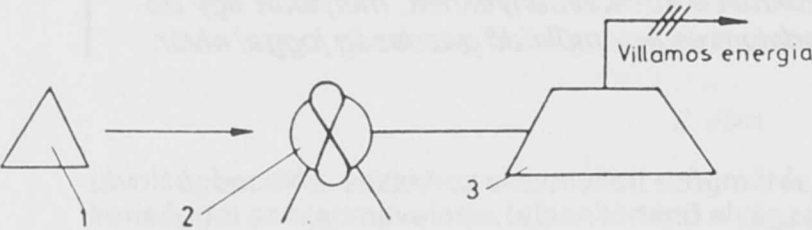
megújuló, azaz állandó energiaforrást jelent. Ugyanakkor a föld tüzelőanyag-vagyona (szén-, kőolaj- és földgázkészlete) mai ismerteink szerint fogyóban van, sőt elfogy, ha a tüzelőanyagok erőművi felhasználása a jövőben nem mérséklődik.

Az erőművek és a természet szoros kapcsolata nem lehet egyoldalú, vagyis működésükkel nem lehet mértéktelenül kifosztani a természeti erőforrásokat, sem pedig indokolatlanul és elfogadhatatlanul károsítani a környezetet.

Az energiaátalakítási folyamat

A villamos energia széles körű felhasználása szükségessé tette a szolgáltatás, és így közvetve a termelés jellemzőinek országos, sőt nemzetközi egységesítését. Ennek megfelelően a villamosenergia-termelés és -szolgáltatás általánosan elfogadott és alkalmazott formája a háromfázisú váltakozó áram. (A periódusszám országonként eltérő lehet, általában 50 vagy 60 Hz.)

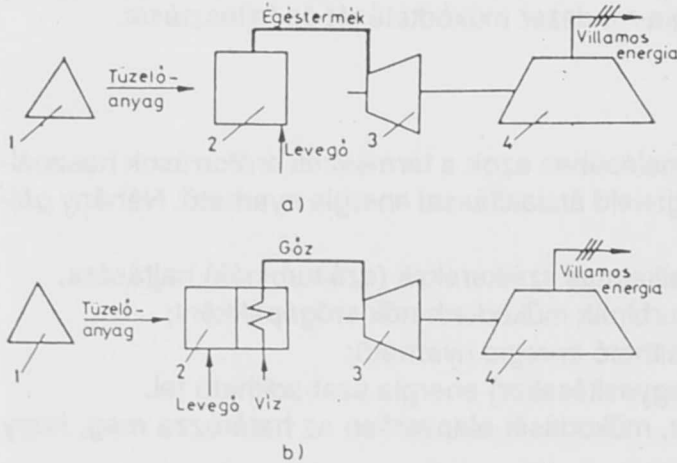
A háromfázisú, váltakozó áramú villamos energia előállítására alkalmas villamos gép a *generátor*, amely a mechanikai energiát villamos energiává alakítja. Ez a villamos gép szerkezetiileg két fő részből áll: az állórészből (sztátor) és a forgórészből (rotor). A forgórész forgatásakor az állórész tekercseiben feszültség indukálódik. A villamosenergia-termeléshez tehát olyan erőgépre van szükség, amely alkalmas a villamos generátor forgórészének forgatására.



1. ábra.
Közvetlenül hasznosítható természeti erőforrás
1. természeti erőforrás (pl. szél, vízfolyás stb.);
2. erőgép (pl. szélkerék, vízturbina);
3. villamos generátor

A legegyszerűbb megoldás (1. ábra), amikor az erőgép *természeti erőforrás* helyzeti vagy mozgási energiáját alakítja át a forgó tengelyén elvezethető mechanikai energiává. Ilyen természeti erőforrás pl. a szél, a vízfolyás stb., de ezek hasznosíthatósága villamos energia termelésére erősen korlátozott. A jól hasznosítható vízfolyásokra már túlnyomórészt kiépültek a vízerőművek, a szél energiájának hasznosítására pedig erőteljes fejlesztőmunka folyik, azonban jelentős szerepe a villamosenergia-termelésben valószínűleg nem lesz.

Lényegesen bonyolultabb, több szakaszból összetett az energiaátalakítási folyamat, ha a természeti erőforrás energiáját átalakítva, *hő formájában* kell bevezetni a villamos generátort hajtó hőerőgépbe. Tüzelőanyagok hasznosításakor (2. ábra) az energiaátalakítási folyamat első szakasza az *égés*. Itt a tüzelőanyag éghető részecskéi egyesülnek a levegő oxigénjével, és a kémiai reakció során felszabaduló energia hő formájában hasznosítható. Elvileg két változat lehetséges.



2. ábra.
Tüzelőanyagok hasznosítása villamosenergia-termelésre
1. természeti erőforrás; 2. égő;
3. hőerőgép (pl. belső égésű dugattyús motor, gázturbina);
4. villamos generátor;
1. természeti erőforrás;
2. tüzelőberendezés;
3. hőerőgép (pl. dugattyús gőzgép, gőzturbina); 4 villamos generátor

Az egyik megoldás szerint az égéskor felszabaduló hő csupán az égéstermékeket melegíti fel és ezek a forró gázok jutnak a hőerőgépbe, amely a gázok hőtartalmának egy részét me-

chanikai munkává alakítja (2. a. ábra). Ilyenkor a hőerőgép, amely a villamos generátort hajtja, belső égésű motor, általában dízelmotor vagy gázturbina. A másik megoldásban a hőt arra használják, hogy vízből nagynyomású és nagy hőmérsékletű gázt termeljenek. A gőz hőtartalmának egy részét mechanikai munkává alakító hőerőgép a dugattyús gőzgép vagy a gázturbina (2. b. ábra). Ezen lehetőségek közül messze a legáltalánosabb megoldás a gőzturbinás változat. A gázturbinák villamosenergia-termelésben való alkalmazása napjainkban erőteljesen fejlődik.

Nukleáris energia formájában rendelkezésre álló természeti erőforrás hasznosításakor az energiaátalakítási folyamat a hasadóképes atommagok hasításával kezdődik. A felszabaduló energia hő formájában kinyerhető, és hőerőgépbe vezetve – pl. vízből gőzt termelve és azt gőzturbinába vezetve – onnan mechanikai energiaként a villamos generátor hajtására hasznosítható. A tüzelőanyagok kémiai energiájából, ill. a nukleáris energiából villamos energiát termelő energiaátalakítási folyamat alapvetően csak az első szakaszban különbözik (égés, ill. atommaghasadás) egymástól. A folyamat további részén sok a hasonlóság.

Minden energiaátalakítási folyamatnak az a jellemzője, hogy a bevezetett energiából csak bizonyos hányad vezethető el a folyamatból mint átalakított hasznos energia. A bevezetett energia többi része veszteségként távozik a folyamatból. Ez a veszteség az energiaátalakítás elkerülhetetlen velejárója. A veszteség mértéke az energiaátalakító berendezések jobb műszaki kivitelezésével, gondosabb üzemeltetésével és karbantartásával befolyásolható. Nyilvánvalóan ugyanannyi villamos energia termeléséhez kevesebb természeti erőforrást kell igénybe venni, „elfogyasztani”, ha az energiaátalakítási folyamat veszteségei kisebbek. Emellett olcsóbb az erőműben termelt villamos energia, és csökken a környezet károsítása is.

A legnagyobb veszteség a fent vázolt folyamatokban akkor lép fel, amikor a hőenergiával rendelkező égéstermék, vagy nagynyomású gőz energiáját mechanikai energiává alakítjuk. Ez a veszteség nagymértékben csökkenhet, ha az égéstermék vagy gőz munkavégzés utáni maradék hőenergiáját is hasznosítjuk pl. távfűtésre, ipari üzemek gőzigényének kielégítésére. Az ezen az elven működő ún. kapcsolt villamosenergia-termelés révén a teljes átalakítási folyamatra vonatkozóan sokkal jobb hatásfok érhető el.

Az erőművek csoportosítása

Ahhoz, hogy az erőművek működését, felépítést, üzemeltetését tanulmányozhassuk, a sokféle erőművet jól megválasztott szempontok alapján szükséges és indokolt rendszerezni. A csoportba sorolás alapja lehet a felhasznált természeti erőforrás, az alkalmazott energiaátalakítási folyamat szerinti megkülönböztetésen túl az erőmű rendeltetési célja, pl. hogy a villamosenergia-termelés mellett szolgáltat-e hőt is a fogyasztói számára. Nagyon fontos csoportosítási elv az erőmű üzem módja, ideértve azt a jellemzőt is, hogy az erőmű az ún. együttműködő villamosenergia-rendszer tagjaként üzemel-e, vagy önállóan (pl. egy ipartelep lát el villamos energiával).

Erőműtípusok

Bármely erőmű típusának megjelölésére legalkalmasabb a felhasznált erőforrás megnevezése, esetleg kiegészítve az alkalmazott erőgép típusával. Az erőműtípusok ilyen rendszerezése fokozatosan alakult ki, követve az erőműépítés fejlődését. Az erőművi villamosenergia-termelés első évtizedeiben elegendő volt a *hőerőmű* és a *vízenergiaerőmű* elnevezés használata. A hőerőmű ekkor még egyértelműen a szénfelhasználó, tehát *széntüzelésű* és *gőzturbinás* (esetleg gőzgépes) erőművet jelentette.

Ez az erőműtípus ma is létezik, sőt nagyon széles körben elterjedt a világon (Magyarországon is), mégsem sajátíthatja ki a hőerőmű elnevezést, mivel elvileg minden olyan erőmű hőerőmű, amelynek energiaátalakítási folyamatában a hő szerepet kap. Amióta a hőerőművek a szénen kívül más tüzelőanyagokat, elsősorban olajat és földgázt (együttesen szénhidrogén alapú tüzelőanyagokat) is használnak, alkalmazható a *szénhidrogén-tüzelésű erőműtípus* jelölés. (Az olajerőmű, ill. gázerőmű elnevezés rövid, de pontatlan és nem szakszerű.)

Az ötvenes években jelentek meg a villamosenergia-termelésben az *atomerőművek*, az erőművek harmadik nagy csoportja. E csoporton belül számos típus különböztethető meg az energiaátalakítási folyamat jellemzői alapján (pl. nyomott vizes, forralóvizes stb.).

A gázturbinának mint erőgépnek a villamosenergia-termelésbe való bevonulásával létrejött a *gázturbinás erőműtípus*. A fejlődés egyik legutóbbi szakaszát képviselik azok az erőművek, amelyek az energiaátalakítási folyamatban egymással kapcsolatosan alkalmazzák a gázturbinát és a gőzturbinát. Ennek az erőműtípusnak a neve: *kombinált ciklusú*, vagy röviden „kombi” erőmű.

Az erőműtípusok megnevezése között találkozhatunk a gőzerőmű megjelöléssel, amely lényegében minden olyan erőműre alkalmazható, amelyben az erőgép gőzturbina. A hőerőművek, az atomerőművek és a vízerőművek csoportjába nem sorolható néhány erőműtípus:

- *geotermikus erőmű*: a föld mélyéből feltörő gőzt hasznosítja, gőzturbina alkalmazásával;
- *napenergia-erőmű*: a Napból érkező sugárzást tükrökkel összegyűjtve termel gőzt, ami gőzturbinába vezethető (lehetséges még a Nap sugárzásának közvetlen átalakítása villamos energiává);

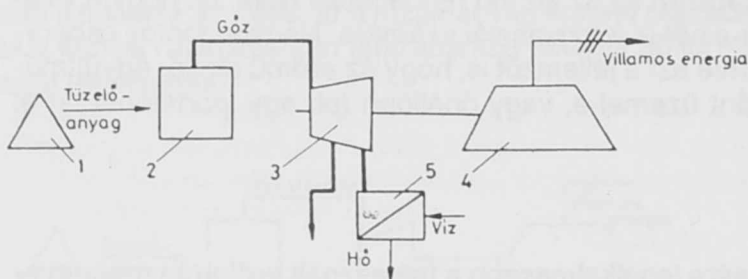
- *szél erőmű*: magas beton- vagy acélszerkezetű torony csúcsára szerelik a nagy átmérőjű, néhány lapátból álló szélkereket, amely közvetlenül forgatja a villamos generátort.

Ezeknek, valamint az itt nem említett új erőműtípusoknak az a közös jellemzője, hogy a villamosenergia-termelés új útjainak és lehetőségeinek keresésére irányuló fejlesztőmunka eredményeit képviselik.

Hőszolgáltató erőművek

Számos erőműtípus energiaátalakítási folyamatában a természeti erőforrás energiáját – mielőtt villamosenergia-termelésre hasznosítanánk – előbb hővé alakítjuk. Az erőműre is érvényes az energiamegmaradás általános természeti törvénye, amiből következően a villamos energiává át nem alakított energiát (hőt) a környezetbe kell vezetni, mint az energiaátalakítási folyamat elkerülhetetlen veszteségét. Ugyanakkor fogyasztói hőigények is vannak – elsősorban lakások, épületek fűtése, melegvíz-készítés, bizonyos ipari technológiai folyamatok (pl. konzervgyártás) hőigényei –, amelyek sok esetben célszerűen az erőműből odavezetett hővel kielégíthetők.

Ennek a lehetőségnek a kihasználására létesültek a *hőszolgáltató erőművek*, amelyek alapvető jellemzője, hogy a természeti erőforrások felhasználásával nemcsak villamos energiát, hanem hőt is termelnek és szolgáltatnak a fogyasztók részére (3. ábra). Abban az esetben, ha a hőszolgáltató erőműből szolgáltatott hő túlnyomó részét fűtési hőigények fedezésére fordítják, helyes a *fűtőerőmű* elnevezés használata. A hőszolgáltató erőművek elkülönítése, önálló csoportba sorolása azzal indokolható, hogy – eltérően a csak villamos energiát termelő erőművektől – ezekben az erőművekben elsődleges feladat a fogyasztói hőigényekhez való alkalmazkodás, és a villamos energia szinte csak melléktermék.

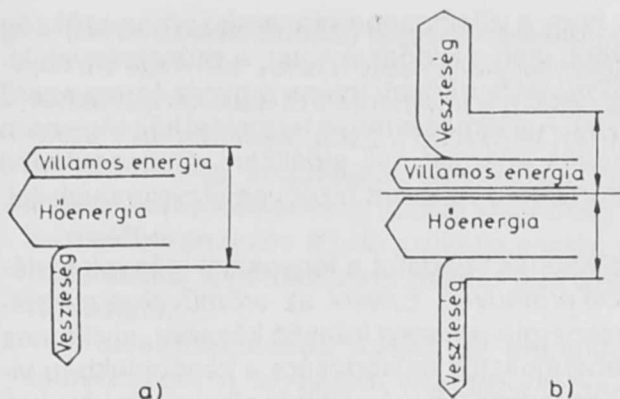


3. ábra.

Hőszolgáltató erőmű működési elve
 1. természeti erőforrás; 2. gőztermelő berendezés (pl. gőzkazán);
 3. gőzszolgáltatásra alkalmas erőgép (pl. ellennyomású, elvételes gőzturbina); 4. villamos generátor;
 5. hőcserélő forróvíz-termeléshez

A hőszolgáltató erőművekben megvalósítható kapcsolt (hő- és villamos) energiatermelés lényeges előnye az energiamegtakarítás. Ugyanakkora hő- és villamosenergia-igény kielégítéséhez ugyanis kevesebb természeti erőforrás felhasználására van szükség, ha a hő- és a villamos energia termelése egymással kapcsolt, mint abban az esetben, ha külön termelik a hőt (pl. egy kazántelegen) és külön a villamos energiát (4. ábra).

A hőszolgáltatás, valamint a kapcsolt energiatermelés követelményeinek teljesítése megfelelő berendezések (pl. ellennyomású, elvételes gőzturbinák, hőcserélők a szabályozott hőmérsékletű forró víz előállításához stb.) alkalmazását teszi szükségessé. Meg kell építeni az erőmű és a fogyasztók között a hő (gőz vagy forró víz formájában való) szállítására alkalmas csővezetékrendszert. A hőszolgáltató erőmű a fogyasztói számára központosított ellátást jelent, aminek előnyeit és hátrányait össze kell mérni a fogyasztók egyedi hőellátásának lehe-



4. ábra.
Egyszerűsített energiamérleg a hő-
és villamos energia kapcsolt (a) és
különválasztott (b) termelésékor

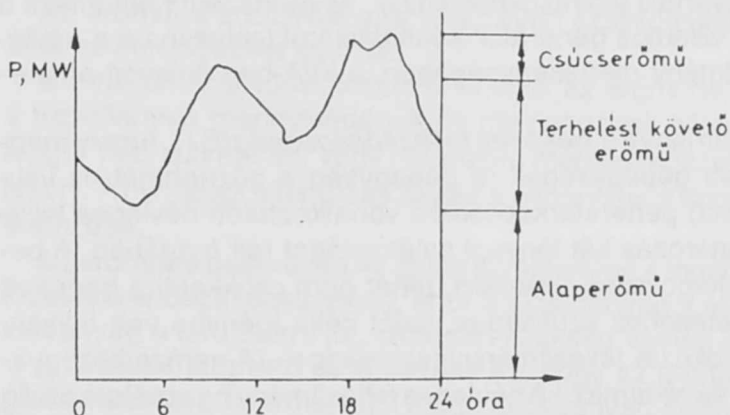
tősegeivel. Ez a bonyolult mérlegelés magyarázza az erőművi hőszolgáltatást támogató, ill. ellenző véleményeket.

A hőszolgáltató erőművekben azok kiegészítéseként, de különálló telephelyen is létesíthetők olyan berendezések (pl. kisnyomású gőzkazánok, forróvíz-kazánok), amelyek alkalmasak arra, hogy hőszolgáltatás céljából hőt termeljenek, de a termelt hő itt nem hasznosítható villamos energia termelésére. Ezeknek a berendezéseknek a szerepe a hőszolgáltató erőművekben a tartalék biztosítása, valamint a a rövid ideig tartó, nagy csúcshőigények kielégítése. Önálló telephelyen elhelyezve az ilyen berendezések alkotják a *fűtőmű* csoportba tartozó létesítményeket.

Az erőművek üzemmódja

Napjainkban szerte a világon, így Magyarországon is, a villamosenergia-termelés és -fogyasztás folyamatos egyensúlyát az együttműködő villamosenergia-rendszer keretében biztosítják. Az erőművek az általuk termelt villamos energiát az országos villamos hálózatba táplálják, és ebből a hálózatról vételezik a fogyasztók a számukra szükséges villamos energiát. Az együttműködő villamosenergia-rendszerben részt vevő erőműveknek együttesen kell pillanatról pillanatra annyi villamos energiát termelni, amennyi éppen elegendő a fogyasztók összesített igényének kielégítésére, mivel a villamos energia nem tárolható.

A fogyasztói igények viszont jelentősen változnak az idő függvényében. Magyarországon télen nagyobb a villamosenergia-igény, mint nyáron; hétköznapokon nagyobb, mint munkaszüneti napokon.



5. ábra.
A fogyasztói villamosenergia-igények
alakulása egy munkanapon a magyar
villamosenergia-rendszerben

A villamosenergia-igények napi alakulását egy munkanapon belül az 5. ábra mutatja. Jól megfigyelhető, hogy az igény éjjel a legkisebb, és a kora esti órákban a legnagyobb.

A villamosenergia-igények kielégítésére a villamosenergia-rendszerben vannak olyan erőművek, amelyek éjjel-nappal folyamatosan működnek azzal a céllal, hogy lehetőleg minél több villamos energiát termeljenek. Ezek az erőművek az *alaperőművek*. A velük szemben támasztott követelmény az alacsony termelési költség, valamint a magas szintű üzembiztonság. Alaperőművi üzem módra alkalmasak a nagy folyami vízerőművek, az atomerőművek és a hőerőművek közül az olcsó tüzelőanyagot jól hasznosító erőművek.

A fogyasztói igények alakulásából következik, hogy a villamosenergia rendszerben szükség van olyan erőművekre, amelyek csak a legnagyobb igények időszakában, a csúcsigények kielégítése miatt üzemelnek. Ezekben a *csúcserőművekben* követelmény a gyors és egyszerű indíthatóság, a gyors terhelésváltoztatási lehetőség. A villamos energia termelési költsége nem jelentős tényező a csúcserőművekbe, mivel kevés energiát kell előállítani. Csúcserőművi üzemmódra legalkalmasabbak a gázturbinás erőművek, valamint bizonyos vízerőművek (pl. szivattyús tározós vízerőművek).

Az alaperőművek és a csúcserőművek között kapnak feladatot a fogyasztói igények kielégítésére a *terheléskövető üzemmódban működő* erőművek. Ezeket az erőműveket menetrendtartóknak is nevezik, mert az egész villamosenergia-rendszert irányító központ, a villamos teherelosztó menetrendet ír elő számukra. (A teherelosztók működésére a későbbiekben visszatérünk.) Ezekben az erőművekben a mindenkor fogyasztói igényekhez alkalmazkodva kell változtatni, fokozni vagy csökkenteni a villamosenergia-termelést, esetenként leállítani, majd újból indítani a termelőberendezéseket. Az ilyen üzemeltetés nagy feladatot ró az üzemeltető személyzetre, a nagy igénybevétel miatt pedig csökken az erőmű berendezéseinek hasznos élettartama. Elvileg valamennyi erőműtípus alkalmas bizonyos mértékű terheléskövető üzemmódra, de az élettartam-rövidülés veszélye miatt atomerőművek ilyen üzemeltetése nem cél-szerű.

Nagyobb ipari üzemek villamosenergia-ellátására létesített saját erőművek általában nem vesznek részt az együttműködő villamosenergia-rendszer termelési feladataiban. Ezek az *ipari erőművek* a villamosenergia-termelésüket elsősorban a saját fogyasztójuk igényeihez igazítják. Ha van villamosenergia-feleslegük, azt felajánlják a villamosenergia-rendszer számára, hiány esetén pedig onnan vételeznek. A hőszolgáltató erőművek villamosenergia-termelését szintén nem, vagy csak korlátozott mértékben tudja befolyásolni a villamosenergia-rendszer igénye, mivel az ezekben az erőművekben vagy erőműrészekben termelt villamos energia mennyiségét a hőigények alakulása befolyásolja.

Az erőművek teljesítőképessége

Az erőmű egészének és az erőmű berendezéseinek legfontosabb jellemzője a teljesítőképesség, vagyis az a teljesítmény, aminek szolgáltatására tartósan képes. A névleges teljesítmény az a legnagyobb állandó teljesítmény, amire a berendezést tervezték, gyártották. A névleges teljesítmény értékét a hivatalos gyártási előírásokban közlik, és rendszerint feltüntetik a berendezés adattábláján. Például egy villamos generátor adattáblájáról leolvasható a névleges teljesítménye a látszólagos teljesítmény mértékegységében, a kVA-ben (kilovolt-ámpérben) megadva.

Az erőmű egészének névleges teljesítménye a *beépített teljesítőképesség* (BT), amely meghatározás szerint az erőműbe beépített gépegyesek (a gépegyes a gőzturbinát és vele összekapcsolt villamos generátort jelenti) generátorkapcsokra vonatkoztatott névleges teljesítményeinek az összege. Ez a meghatározás két lényegi sajátosságot rejt magában. A beépített teljesítőképességet a generátorkapcsokra értelmezi, tehát nem csökkenti a beépített teljesítőképességet az erőmű működtetéséhez szükséges, saját célra igénybe vett teljesítménnyel, valamint a transzformátorok okozta teljesítményvesztéssel. (A nemzetközi gyakorlat ettől eltérő értelmezést is elfogad és alkalmaz.) A névleges teljesítmény használata pedig azt jelenti, hogy ezt a teljesítményértéket az erőmű csak a névleges teljesítményhez tartozó feltételek megléte esetén tudja elérni.

Az erőmű beépített teljesítőképességét különböző *hiányok* csökkentik. (Hiány az a teljesítmény, amit az erőmű valamilyen ok miatt nem tud szolgáltatni.) A teljesítőképesség-hiány lehet állandó vagy változó jellegű. Állandó teljesítményhiány oka lehet a szükségesnél kisebb teljesítményű segédberendezés beépítése, vagy áttérés a tervezett helyett más tüzelőanyagra stb. Változó jellegű hiányt idézhet elő az időjárás (pl. a kondenzátor-hűtővíz melegebb), valamint a hő szolgáltató erőművekben a hőigények változása.

Külön figyelmet érdemel a teljesítőképesség-hiányok között a berendezések tervszerű karbantartása miatti teljesítőképesség-csökkenés. A berendezések karbantartás miatti leállításának időpontja ugyanis adott határok között tetszőlegesen választható.

Levonva a különböző teljesítőképesség-hiányokat a beépített teljesítőképességből, kapjuk azt az *igénybe vehető teljesítőképességet*, ami az erőműben villamosenergia-termeléshez rendelkezésre áll. Ennek értékét a tényleges üzemeltetés során növelheti a berendezések átmeneti túlterhelése, viszont csökkenti a berendezések meghibásodása, kényszerű leállítása. Az erőmű által szolgáltatott tényleges teljesítmény, tehát az *erőmű terhelése* és az igénybe vehető teljesítőképesség közötti különbség a *tartalék*. A tartalék lehet hidegtartalék, amikor a termelőberendezés áll, de szükség esetén indítható, mert üzemképes, és lehet forgótartalék, azaz amikor a termelőberendezése már üzemel, de névleges teljesítményének eléréséig még terhelhető.

A teljesítőképesség mellett az erőművek igen lényeges jellemzője a villamos energia mennyisége. A fogyasztó villamosenergia-ellátása szempontjából legfontosabb az a villamosenergia-mennyiség, ami az erőműből a villamos hálózatba jut. Ez a mennyiség az erőmű transzformátorainál jól mérhető, elnevezése: az erőműből *kiadott villamos energia*. Az erőműben megtermelt villamos energia egy részét az erőmű használja fel a működéséhez. Ez a villamosenergia-mennyiség az *önfogyasztás*, amely szintén jól mérhető. A kiadott villamos energia és az önfogyasztás összege adja a *termelt villamos energia* mennyiségét. (Bizonyos értelmezések szerint csak a kiadott villamos energia tekinthető villamosenergia-termelésnek, hiszen ez az erőmű terméke.)

A hőszolgáltató erőművekre hasonlóan érvényesek a teljesítmény- és energiafogalmak.

Hagyományos gőzerőművek

Magyarországon valamennyi jelentősebb erőmű – a Paksi Atomerőmű és néhány gázturbinás egység kivételével – olyan hőerőmű, amely valamilyen tüzelőanyagot használ fel, és a villamos generátort hajtó erőgép a gőzturbina. (A vízerőművek részesedése a villamosenergia-termelésben jelentéktelen, kisebb, mint 1%.) Ezen erőművek felépítésében, működésében sok a hasonlóság, ami a széles körben való alkalmazásukon túl szintén indokolja, hogy részletesebben megismerjük őket.

Tüzelőanyag-ellátás

Az erőműbe a tüzelőanyag valamilyen szállítóeszközzel érkezik, fogadása számos műveletet és berendezést igényel.

Bármilyen szállítóeszközzel is érkezik az erőműbe a tüzelőanyag, a fogadás fontos része a tüzelőanyag mennyiségének és minőségének ellenőrzése. A mennyiségmérés lehet mérleggel való súlymérés, vagy megfelelő mérőeszközzel való térfogatmérés (pl. földgáz átvételkor). A minőségi ellenőrzés alapja a mintavétel a tüzelőanyagból, majd a minta laboratóriumi elemzése.

Az erőműbe beérkezett és átvett tüzelőanyag a fogadóállomástól vagy közvetlenül az erőmű tüzelőberendezéséhez vezet, ahol a tüzelőanyagot elégetik, vagyis felhasználják, vagy a tüzelőanyag a tárolótérre jut, ahonnan szükség esetén a tüzelőberendezéshez továbbítható.

A tárolótér alapvető rendeltetése az, hogy az erőműbe érkező tüzelőanyag-mennyiség és a villamosenergia-termeléstől függő tüzelőanyag-igény közötti különbségeket kiegyenlítsen. Ez lehet napi jellegű, de legcélszerűbb – különösen a széntüzelésű erőművekben – a nyáron érkező szénfelesleg tárolása télre (tartós tárolás) olyan mennyiségben, amely az erőmű többnapos, ill. néhány hetes üzemeltetéséhez elegendő.

Az erőművekben felhasznált tüzelőanyagok legfontosabb jellemzője, hogy egységnyi mennyiségű (1 kg, 1 m³) tüzelőanyag elégetésekor mennyi hő szabadul fel. A tüzelőanyagnak ez a minőségi jellemzője befolyásolja azt, hogy mennyi tüzelőanyagot kell szállítani az erőműbe, milyen méretűek legyenek az erőművön belül a tüzelőanyagot kezelő berendezések, a tárolótér stb. Összehasonlításképpen: 1 kg olajjal a hőtermelést tekintve egyenértékű kb. 1,2 m³ földgáz és 4 kg olyan gyenge minőségű szén, amelyet a hazai széntüzelésű erőművek használnak. Ezekben a gyenge minőségű szénekben a nem éghető tartalom (hamu- és nedvességtartalom) meghaladja az 50%-ot.

Tüzelőberendezések

A tüzelőanyagok elégetése, az égés közben felszabaduló hővel a vízből való gőztermelés az erőművekben egyetlen berendezésben, a *gőzkazánban* történik, azonban a két szóban forgó folyamat (égés és gőztermelés) jellemzői annyira eltérőek, hogy célszerű különválasztani őket. Magának a tüzelőberendezésnek (ide értve a tüzelőanyag előkészítését is) a kialakítását és működését a tüzelőanyag határozza meg, a gőztermelés folyamata pedig már független attól, hogy milyen tüzelőanyag elégetésekor felszabaduló hőt használunk fel erre a célra.

A szén eltüzelésére három, jól megkülönböztethető tüzelési rendszer terjedt el a gyakorlatban.

Rostélytüzelés. A darabos, viszonylag kis portartalmú szenet a gőzkazánban elhelyezett rácsos, pálcás szerkezetre, a rostélyra adagolják, amelynek hézagain keresztül a levegő alulról fölfelé a rostélyon lévő szénhez jut, ahol a szén elég.

Szénporttüzelés. Aszenet elégetés előtt őrlőberendezésekben, ún. szénpormalmokban apró szemcséjű porrá őrlik, és levegővel keverve, a gőzkazánban levő szénporégőkbe szállítják. A jó égést a megfelelő őrlési finomság, és a levegővel való jó keveredés biztosítja.

Fluid ágyas (lebegő ágyas) tüzelés. A gőzkazánban a szénporrétegen (ágyon) levegőt fújnak keresztül, mégpedig olyan sebességgel, hogy az áthaladó levegő az ágyban levő szemcséket lebegő állapotban tartsa. Az égéshez a keveredés nagyon jó, és a lebegő szén szemcsék elégnének. A friss szenet a lebegő ágyra szórják.

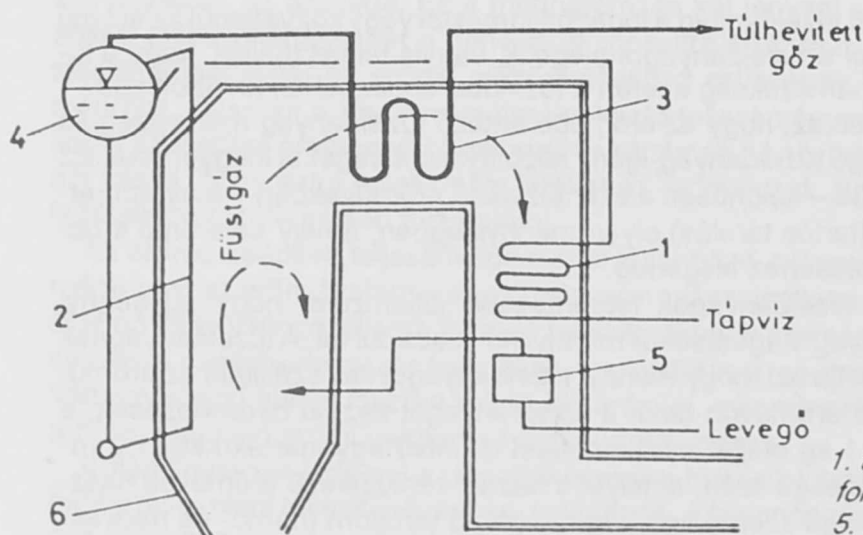
Olajtüzelés esetén a tüzelőberendezés lényege az égő, amelynek feladata az olaj apró cseppekre bontása, porlasztása. A porlasztás egyik bevált módja az olaj átréselése az égőben kialakított szűk nyílásokon. Az apró olajszemcsék már jól keverednek az égési levegővel. A felmelegített olaj jobban porlasztható.

Földgáz tüzelésekor a levegő és földgáz jó keveredése a földgázégő szerkezeti kialakításával oldható meg, mivel mind a két közeg légnemű.

Gőzkazánok

Gőzkazánokban a tüzelőanyag égése során felszabaduló hő a *fűtőfelületeken* átadódva gőztermelésre fordítódik. (Fűtőfelület a gőzkazánban minden olyan cső külső felülete, amelyben a hőt, „átvevő” víz vagy gőz, illetve az égési levegő felmelegítésekor pedig levegő áramlik.) A fűtőfelületek nagyságát, gőzkazánban belüli elhelyezését a gőztermelés három, jól elkülönített szakaszának (vízhevítés, elgőzöltötetés, túlhevítés) a hőigénye, valamint a hőátaszármaztatás módja (sugárzás, konvektív hőátadás) határozza meg.

Azokat a csöveket (fűtőfelületeket), amelyekben a gőzkazánba érkező viszonylag hideg tápvíz áramlik, elegendő a forró égéstermékek áramlási útvonalaiban elhelyezni (6. ábra). A legtöbb hő a tüztérben van, ahol a tüzelőanyag ég. Ezért azok a csövek, amelyekben a víz forr, elgőzölög, a tüztér veszik körül. Részben a tüztér felett, részben az innen kilépő forró égéstermékek (füstgázok) útjában vannak elhelyezve azok a csövek, amelyekben a gőz hőmérsékletét növelik, túlhevítik.



6. ábra.

Fűtőfelületek a gőzkazánban
1. tápvíz-előmelegítő; 2. elgőzöltötető forrcsővek; 3. túlhevítő; 4. kazándob; 5. levegő-előmelegítő; 6. kazánfalazat

Gőzturbinák és hűtőberendezéseik

A gőzkazánban termelt gőz a főgőzvezetéken (nagy hőmérséklet és nyomás okozta igénybevételt elviselő, kívülről hőszigetelt cső) a gőzturbinába jut, amelynek tengelye a tengelykapcsolóval már a villamos energiát termelő generátorhoz csatlakozik. Magában a gőzturbinában alakul át a hő mechanikai munkává, mégpedig két lépésben. A gőzturbina állórészében levő fúvókákban a gőz hőtartalma az áramló gőz mozgási energiájává alakul át, majd a gőzturbina forgórészén levő lapátozáson áthaladó gőz mozgási energiájának csökkenéséből adódó energia vezethető el a gőzturbina tengelyén a generátor hajtására.

A legegyszerűbb gőzturbina egy sor fúvókából és a tengelyre szerelt egy sor lapátozásból áll. Ez az egység a *turbinafokozat*. Az energiaátalakulásnak a fúvóka és a lapátozás közötti megosztása alapján megkülönböztetnek *akciós* és *reakciós* turbinafokozatot, azonban az összes gyakorlati szempontot mérlegelve a kétféle fokozat az erőművi gőzturbinák tekintetében egyenértékű. A korszerű, nagy teljesítményű gőzturbinák több, egymás után elhelyezett fokozatból állnak.

A gőzturbinák fordulatszámát a termelt váltakozó áram frekvenciája és a generátor szerkezeti kialakítása határozza meg. Az 50 Hz-es váltakozó áramot termelő generátorokhoz tartozó gőzturbinák percenkénti fordulatszáma 3000 vagy 1500 1/min. A fordulatszám állandó értéken tartásáról a turbinaszabályozás gondoskodik, amely mindig annyi gőzt enged a turbinába, amennyi a villamosenergia-termeléshez szükséges.

A gőzturbinából a gőz a kondenzátorba jut. A kondenzátor rendeltetése a hőtan második főtételéből következik: gőz hőtartalmának mechanikai munkává át nem alakítható részét elvezetni a környezetbe. A kondenzátorba bekövetkező állapotváltozás a forrás ellentéte, a gőz lecsapódik (kondenzálódik), azaz a gőzből víz keletkezik. Az állapotváltozás közben a lecsapódó gőzből hőt kell elvezetni, ezért a kondenzátorba hűtővizet kell bevezetni, amely a hőátvitel során felmelegszik. A lecsapódó gőz és a felmelegedő hűtővíz közötti hőátvitel megvalósítható:

- *keverőkondenzátorban*, ahol a hideg hűtővizet a gőzbe fecskendezik;
- *felületi kondenzátorban*, amelyben a gőz és a hűtővíz nem keveredik, mert a hűtővíz csövekben áramolva halad át a kondenzátoron, és a gőz a csövek külső felületére kondenzálódik.

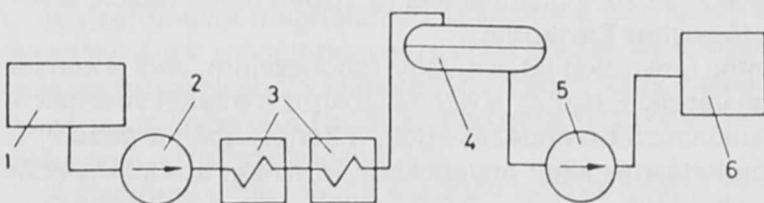
A kondenzátorban a gőz kondenzálódásához szükséges megfelelő mennyiségű és hőmérsékletű hűtővíz többféle módon biztosítható:

- *frissvíz-hűtés* esetén az erőmű közelében bőséges vízforrásra (folyó, tó, tenger) van szükség, amelyekből a friss hűtővíz kiemelhető, majd a felmelegedett hűtővíz visszavezethető,
- *hűtőtornyos hűtés* esetén lényegesen kevesebb friss vízre van szükség, mint frissvíz-hűtéseskor, viszont az erőműben hűtőtornyokat kell építeni és üzemeltetni. A kondenzátorban felmelegedett hűtővizet hűtőtornyba vezetnek, ahol lehűl, hőmérséklete csökken, és a kondenzátorba visszavezetve ismét alkalmas a hűtésre. A hűtőtornyban az apró cseppekre bontott víz a hűtőtornyon átáramló levegőnek adja át a kondenzátorban felvett hőt. A levegő áramlása lehet természetes huzat, vagy mesterséges, ventilátorral keltett áramlás;

- *a száraz hűtés* lényegében szintén hűtőtornyos hűtés, de a hűtőtornyban a víz bordás csövekben áramlik, nem érintkezik közvetlenül a levegővel, tehát nincs vízvesztés. A száraz hűtési rendszerekben általában keverőkondenzátorokat alkalmaznak.

A kondenzátorban lecsapódott gőzből képződő víz a kondenzátor alján gyűlik össze, ahonnan a csapadékvíz-szivattyú szívja el és továbbítja a megcsapolásos tápvíz-előmelegítőkön keresztül a táptartályba (7. ábra).

A hőszolgáltató erőművek gőzturbinái működési elvüket tekintve azonosak, kialakításukat illetően azonban lényegesen eltérnek az előzőekben ismertetett, ún. kondenzációs gőzturbináktól. Hőszolgáltatásra alkalmas az *ellennyomású gőzturbina*, amelyhez nem tartozik kon-



7. ábra.
A tápvíz útja a kondenzátortól a kazánig
1. kondenzátor;
2. csapadékvíz-szivattyú;
3. tápvíz-előmelegítők;
4. táptartály; 5. tápszivattyú;
6. gőzkazán

denzátor, így elmarad annak hűtési rendszere is. A turbina végén kiáramló gőzt a hőfogyasztókhoz vezetik, a fogyasztó által igényelt nyomáson. Ez a nyomás lényegesen nagyobb, mint a kondenzációs gőzturbinák kondenzátoraiban kialakuló nyomás, tehát az ellennyomású gőzturbina a turbinába érkező gőz hőtartalmának kisebb részét hasznosítja villamosenergia-termelésre, mint a kondenzációs turbina. Ez azonban nem hátrány, mivel a gőz maradék hőtartalmát a hőfogyasztó hasznosítja.

Lehetőség van arra, hogy a gőzturbinaházak közötti összekötő gőzvezetékből vezessünk el gőzt a fogyasztó számára, tehát az elvételi pont utáni gőzturbinarészen kevesebb gőz haladjon át, mint az elvétel előtti részen. Ez a megoldás az *elvételes gőzturbina*. Az elvételes gőzturbina lehet *elvételes ellennyomású* vagy *elvételes kondenzációs*.

A hőfogyasztóknak kiadott gőz részben vagy teljes egészében visszatér az erőműbe, mégpedig csapadékvíz formájában. A hiányzó vízmennyiséget az erőműnek kell pótolnia a folyamatos termelés, illetve hőszolgáltatás érdekében.

Kiegészítő folyamatok

A gőzerőművek alapvető termelési folyamatát – a tüzelőanyagok fogadásától kezdve a villamosenergia-termelésig – számos kiegészítő folyamat, tevékenység illetve berendezés teszi teljessé. Közülük a legfontosabbakat a következőkben ismertetjük.

Villamos üzem. A generátorkapcsokról a termelt villamos áram az erőmű villamos kapcsolóállomására jut, ahol a nagy teljesítményű transzformátorok a termelt villamos energia feszültség-szintjét olyan szintre emelik, hogy az betáplálható legyen az országos villamos hálózatba (400, 220 és 120 kV) a villamos távvezetéseken keresztül. A kapcsolóállomáson elhelyezett kapcsolókészülékek (megszakítók, szakaszolók) lehetővé teszik az erőmű villamos termelő-berendezéseinek és az erőműből induló villamos vezetékeknek az összekapcsolását, illetve szétválasztását.

Az erőműben számos olyan gép és berendezés működik, amelyet villamos motor hajt (szivattyúk, ventilátorok stb.). Ezeknek a motoroknak a villamosenergia-ellátása az erőmű saját termeléséből vagy a hálózatról vételezett energiával biztosítható.

Irányítástechnika. Az erőmű valamennyi berendezésének működését úgy kell irányítani, szabályozni, hogy az alapvető célt, a villamosenergia-termelést segítse. Ennek érdekében szerelik fel a berendezésre a kor műszaki színvonalának megfelelő mérő- és szabályozókészülékeket.

A szabályozókészülékek működési elve, szerkezeti felépítése, tevékenységének összetettsége rendkívül sokféle. A választék az egyszerű, mechanikus elven működő vízszintszabályozótól (egy tartályban érzékelve a vízszintet, több vagy kevesebb vizet enged a tartályba) a mikroprocesszoros folyamatirányító és adatgyűjtő rendszerekig terjed. A mérő- és szabályozókészülékek működését az ún. *védelmek* egészítik ki, amelyek a figyelt paraméterek jelzési határértékének túllépésekor vagy egyéb rendellenesség esetén a berendezés kezelőjének figyelmeztető jelzést adnak, illetve a veszélyes állapot megszüntetése érdekében a védelmi határértékek elérésekor beavatkoznak, és az üzemelő berendezést leállítják.

Víz- és vegyi üzem. Az erőmű számára rendelkezésre álló *nyersvízből* (folyóvíz, kútvíz stb.) a vízelőkészítő üzem állítja elő a megfelelő minőségű pótvizet. A nyersvíz tisztításának első lépése a vízben lebegő szennyező anyagok eltávolítása szűréssel, ülepitéssel. Ezt követi a vízben oldott anyagok (pl. sók) leválasztása. A víz keménységét okozó sók eltávolítását a víz lágyításának, az összes oldott só eltávolítását pedig a teljes sótelenítésnek nevezzük. A víz lágyításakor a vízhez olyan vegyületet adagolnak (pl. mészt), amely a keménységet okozó sókat a vízben nehezen oldódó vegyületté alakítja át, s ülepitéssel eltávolítható. A teljes sótelenítés során a vizet ioncserélő anyaggal töltött edényeken vezetik át, ahol az ioncserélő anyag megköti (pontosabban a víz minőségét nem befolyásoló vegyületre cseréli) a vízben oldott elemeket (ionokat). Az így módon előkészített víz a gáztalanítás (a vízben oldott gázok, első sorban az oxigén eltávolítása) után a tápvízhez keverhető.

Az erőművi vegyészet területén fontos funkciókat lát el a vegyi laboratórium, ahol a kémiai elemzéseket, vegyészeti vizsgálatokat végzik. Ezekhez a vizsgálatokhoz mintákat vesznek a tüzelőanyagból, a vízből (az erőmű különböző berendezéseinek), a kenőolajból, a gőzből, a füstgázból, valamint az erős korróziós hatásnak kitett anyagokból. A minták eredményeiből határozhatók meg a szükséges beavatkozások.

Salak- és pernyeeltávolítás. A szén felhasználó erőművekben a szén hamutartalmát mint nem éghető anyagot salak, illetve pernye formájában el kell távolítani a kazántól és a pernye-

leválasztóból. Az eltávolítás egyik általánosan elterjedt módja a salak és a pernye összekeverése vízzel, majd az így keletkező *zagy* (híg iszap) szivattyúval, csővezetékben való elszállítása az erőműből legfeljebb néhány km távolságban levő zagyterre. A zagyterren a víz szivárgóárkokba gyűjthető, és visszavezethető hasznosításra az erőműbe. A salak és a pernye a zagyterren felhalmozódik és kiszárad, ezért a zagyter feltöltése után a porzását pl. növényzettel való betelepítéssel (rekultiváció) meg kell akadályozni.

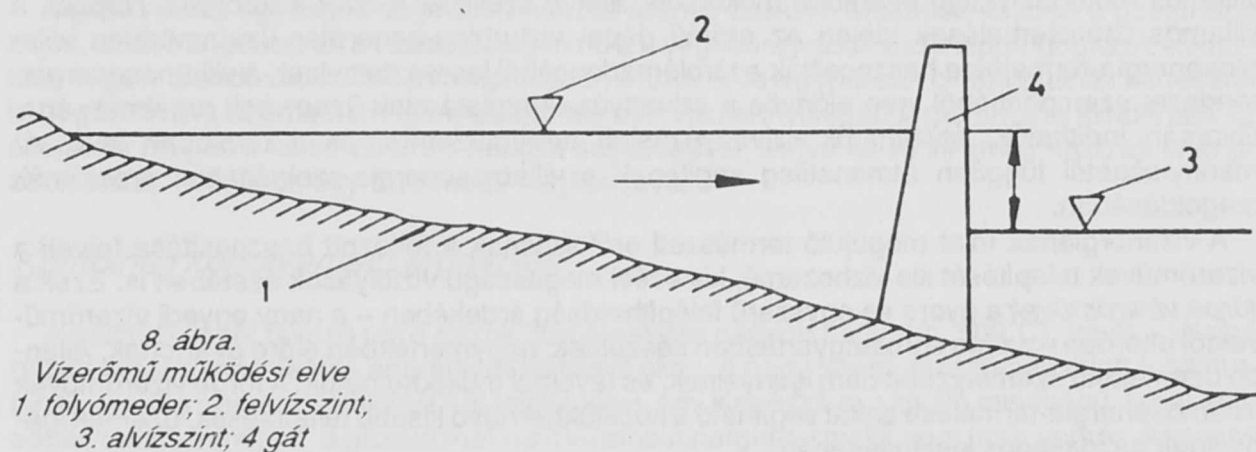
Az erőművi pernyék felhasználhatók építészeti nyersanyagként (pl. útépitéshez, épület-elem-gyártáshoz stb.). Ilyen hasznosítás esetén a pernyét az erőműben nem keverik vízzel, hanem gyűjtőtartályokba gyűjtik, ahonnan még száraz állapotban, cementszállító tehergépkocsikkal vagy vasúti kocsikkal a rendeltetési helyre továbbítják.

Vízerőművek

Magyarországon a vízerőművek szerepe a villamosenergia-termelésben nem jelentős. Új vízerőmű az elmúlt fél évszázadban mindössze kettő épült, mégpedig a második legnagyobb hazai folyóra, a Tiszára. Ezek együttes villamos teljesítőképessége együttesen is csupán néhány tíz MW.

A vízerőművek sajátosságai

A vízerőművekben termelhető villamos energia mennyiségét elvileg két tényező, a vízfolyásra jellemző vízhozam és az erőmű építési helyén kialakítható esésmagasság szorzata adja. A *vízhozam* a folyó valamely kiválasztott szelvényén időegység alatt áthaladó víz térfogata (m^3/s). Ez a jellemző időben változik. Az elmúlt években mért adatok statisztikai feldolgozásából következtetni lehet arra, hogy mikor kisebb és mikor nagyobb az adott vízfolyás vízhozama. Ugyancsak az elmúlt évek vízhozamadatai adnak alapot a vízerőmű nagyságának megállapításához. Az *esésmagasság* az erőműbe bevezetett vízfolyás tengerszint feletti magasságának – röviden a felvízszintnek – és az erőműből elvezetett vízfolyás tengerszint feletti magasságának – röviden az alvízszintnek – a különbsége, m-ben (8. ábra).



A két tényező (vízhozam és esésmagasság) szorzatából következően a legnagyobb vízerőművek a bőséges vízhozamú és nagy esésmagasságú (pl. zuhatagok) vízfolyásokra építhetők. Ilyen kedvező földrajzi helyzet kevés helyen adott, ezért a vízerőművek vagy hegyvidéken épültek, ahol a folyók viszonylag kisebb vízhozamúak, de nagy az esésmagasságuk (esetenként több száz méter), vagy síkvidéki folyókra, ahol a kis esésmagasság óriási vízhozammal párosul.

A vízerőművet meghatározó építmény a *gát*, amely a természetes vízfolyás útjába emelt akadály. A gát mögött duzzasztják fel a vizet, és tárolják a helyi lehetőségektől függően. Tárolásra felhasználható maga a folyómeder, vagy mesterségesen kialakított tároló, akár mesterséges tó (ilyen pl. a Tiszán Kiskörénél a Tisza-tó). A tárolóban levő víz befolyásolja a környék élővilágát, vízgazdálkodását stb.

A vízerőmű gátja mögött kialakuló vízszint kedvezően javíthatja a folyón a hajózási lehetőségeket. Folyami erőművek gátja mellett hajózsilipek építésével és működtetésével kell biztosítani a hajók áthaladását mindkét irányban. A tárolómedencében felduzzasztott víz a me-

zőgazdasági öntözőrendszerek vízellátását is megoldhatja. A folyókra épített duzzasztógátból tehát sokféle hasznosítási lehetőség adódik, a gáthoz telepített villamosenergia-termelő gépegységek csupán az egyik hasznosítási formát jelentik. Többcélú hasznosítás esetén a gát előnyeit és hátrányait sokan közösen élvezik, illetve viselik.

A vízerőművek működése

A vízerőművekben a villamosenergia-termelő generátort hajtó gép a *víz turbina*. A vízturbinához kapcsolt villamos generátor szerkezeti felépítése lényegesen eltér a gőzturbinák generátoraitól. Ennek oka, hogy a vízturbinák fordulatszáma a gőzturbinák fordulatszámának csak tizede vagy még kisebb, és így a villamos generátor sokpólusú villamos gép (hogy a kívánt frekvencia biztosítható legyen).

A vízturbinák jól szabályozható gépek, terhelésük gyorsan változtatható, indítási időszükségletük mindössze néhány perc. Egyszerű szabályozhatóságukból eredően a vízturbinák – és így a vízerőművek – alkalmasak távszabályozásra, távolból való irányításra.

A vízerőművek üzem módja lehet alaperőmű és csúcserőmű jellegű, mindig szem előtt tartva, hogy a rendelkezésre álló vízhozamból és esés magasságból a lehető legtöbb villamos energiát lehessen termelni. Kihasználva az erőműhöz tartozó tároló lehetőségeit is, kis vízhozam esetén a csúcserőművi üzem mód alkalmazása a célszerű. A villamosenergia-rendszer kis terhelésű időszakában a vízerőmű kevés villamos energiát termel, „gyűjti” a vizet a tárolóba. Amikor a villamosenergia-igények növekedése szükségessé teszi, a vízerőmű fokozza termelését, hasznosítva a tárolóban levő készletet is. A tárolótér a befogadóképességétől függően alkalmas lehet napi, heti vagy akár hosszabb időtartamú tárolási feladatokra is. Csúcserőművi üzem mód alkalmazásakor figyelembe kell venni a felvízszint- és az alvízszint-ingadozás kedvezőtlen hatását a hajózásra, a folyó partján levő létesítményekre.

Különleges vízerőműtípus a *szivattyús energiatároló*. Létrehozását a villamosenergia-rendszer fogyasztói igényének napi alakulása (nappal több, éjszaka kevesebb villamos energiára van szükség), valamint a nagy teljesítményű hőerőművek és atomerőművek csekély terhelésváltoztatási képessége indokolta. A szivattyús energiatároló működési elve a szivattyús (energiafogyasztó) és a vízturbinás (energiatermelő) szakasz egybekapcsolásán alapul, kellő földrajzi magasságban elhelyezett víztároló közbeiktatásával. Ennek az erőműnek a gépei éjszaka villamos motor-szivattyú üzemen működnek, illetve szállítják a vizet a tárolóba. Nappal, a villamos csúcsterhelések idején az erőmű gépei vízturbina-generátor üzem módban villamosenergia-termelésre hasznosítják a tárolómedencéből leeresztett vizet. A villamosenergia-rendszer szempontjából igen előnyös a szivattyús energiatárolók üzemviteli rugalmassága. Gyorsan indíthatók, átválthatók szivattyúzásból turbinaüzemre, és a tárolóban levő víz mennyiségétől függően átmenetileg segítenek a villamosenergia-szolgáltatási problémák megoldásában.

A vízenergia mint megújuló természeti erőforrásnak a fokozott hasznosítása felveti a vízerőművek telepítését kis vízhozamú, kis esési magasságú vízfolyások esetében is. Ezek a *törpe vízerőművek* a gyors és egyszerű felépíthetőség érdekében – a nagy egyedi vízerőművektől eltérően – szinte sorozatgyártásban készülnek, nagymértékben előre gyártottak. Állandó üzemeltető személyzetet nem igényelnek, és távolból működtethetők. A törpe vízerőművek villamosenergia-termelése sokat segíthet a közelükben levő kisebb települések, üzemek igényeinek gazdaságos kielégítésében.

Gázturbinás erőművek

A gázturbinák mint hőerőgépek felhasználása villamosenergia-termelésre csak az utóbbi években lett nagyobb jelentőségű. A gázturbina ugyanakkor már évtizedek óta egyeduralkodó a katonai és polgári repülés terén. A repülőgép-hajtóművekben használt gázturbinák fejlesztése során elért eredmények nagymértékben elősegítették az erőművi alkalmazásra szánt gázturbinás egységek létrehozását is.

Összehasonlítva a gőzerőműveket és a gázturbinás erőműveket, az utóbbiak sokkal egyszerűbbek. Ebből következik, hogy gyorsabban, kevés költséggel építhetők fel. A gázturbinát üzemviteli rugalmassága (gyors indíthatóság, terhelésváltoztatási képesség) különösen alkal-

masszá teszi a változó fogyasztói igények követésére, valamint a csúcserőművi feladatok ellátására a villamosenergia-rendszerben.

Napjainkban a magyarországi hőerőművekben összesen négy gázturbinás egység üzemel, de folyamatban van további egységek létesítésének előkészítése. A gázturbinák erőművi alkalmazása világszerte gyors ütemben terjed.

A gázturbina működése

A gázturbinás gépegyeség három fő részből áll: a kompresszorból, a gázturbinából és az égőkamrából. A *kompresszor* feladata, hogy a környezetből friss levegőt szívjon és annak nyomását sűrítéssel, összenyomással az előírt értékre növelje. Maga a kompresszor forgógép, amely a levegőt több fokozatban nyomja össze. A kompresszor hajtása jelentős energiát igényel.

A kompresszorból az összenyomás közben felmelegedett levegő az *égőkamrába* jut, ahol a beadagolt tüzelőanyag égését lehetővé teszi. A tüzelőanyag az ún. *gázturbinaolaj*, ami a dízelmotorokhoz használt üzemanyagnál valamivel tisztább tüzelőolaj vagy földgáz. Nagyon fontos a tüzelőanyag minősége és tisztasága, mivel az égéstermékek az égőkamrából közvetlenül a *gázturbinába* jutnak. A kompresszor által szállított levegő mindig több, mint amennyi a tüzelőanyag tökéletes eléégéséhez elméletileg szükséges azért, hogy az égésben részt nem vevő levegővel az égőkamrából kilépő forró gázok hőmérséklete csökkenthető legyen.

A gázturbina a forró gázokban levő hő egy részét alakítja át a tengelyén elvezethető mechanikai munkává. Az energiaátalakítás folyamata a gázturbinában lényegében ugyanolyan, mint a gőzturbinában, de a gázturbinákban elegendő csupán néhány turbinafokozat. A legnagyobb igénybevételnek kitett elem a gázturbina forgórészének első lapátsora. Ezt a lapátsort érik el forró gázok, a nagy hőmérséklethez pedig még hozzáadódik a működésből eredő erők okozta terhelés. A forgórészből odavezetett levegővel a lapátok belső hűtése megoldható, és bár a lapátokat speciális ötvöztött anyagokból készítik, mégis, ezen lapátok élettartama szabja meg a gázturbina felújítás nélküli üzemeltethetőségének időtartamát.

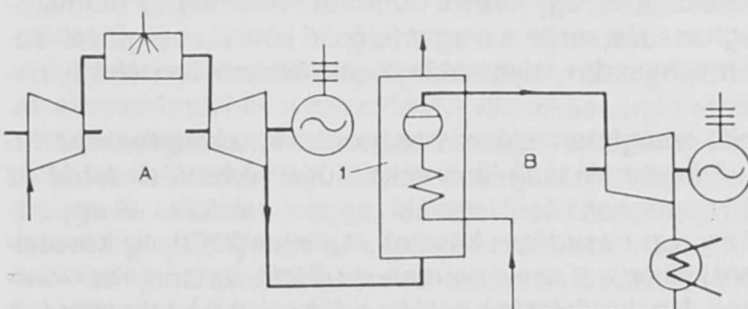
A gázturbina tengelye már közvetlenül a villamos generátor tengelyéhez kapcsolódik. Ugyancsak a gázturbina forgatja a levegőt sűrítő kompresszor tengelyét. A kompresszor nagyon jelentős fogyasztó, a turbina teljesítményének több mint a felét felemésztí.

A gázturbinás egységek segédberendezés-igénye csekély. Működés közben a gázturbina zajos, ezért hangtompítóra van szükség mind a levegőbeszívás, mind a kipufogógázok elvezetése végett. Gondoskodni kell a kompresszor, a turbina és a generátor csapágypainak kenéséről is. A gázturbina üzeme nem igényel jelentős hűtővízmennyiséget. A gázturbina elindítható az általában meglévő külső villamos hálózat segítségével, illetve külső villamos hálózati energiabetáplálás nélkül, pl. egy dízelmotor segítségével.

Kombinált körfolyamatú erőművek

A gázturbinából távozó forró gázok hőmérséklete nagyon nagy (kb. 500°C), tehát a távozó gázok hőtartalma jelentős energiaveszteséget okoz. A nagy energiaveszteség miatt a gázturbinás egység energiaátalakítási hatásfoka kicsi, ami kiegészítve a kiváló minőségű, tehát költséges tüzelőanyaggal, a gázturbinát mint villamosenergia-termelőt nem teszi versenyképesé a hőerőművekkel az alaperőművi üzemmódban. Megindult a fejlesztés a gázturbinából távozó gázok hasznosítására, és létrejött a kombinált körfolyamatú erőmű, amelynek elvi kapcsolását a 9. ábra mutatja.

A kombinált körfolyamatú erőmű két részből áll. Az egyik rész gázturbinás erőmű, a szokásos kiépítésben. A gázturbinás egységből a forró gázok nem a környezetbe, hanem a *hőhasz-*



9. ábra.
Kombinált körfolyamatú erőmű
A. gázturbinás erőműrész;
B. gőzturbinás erőműrész;
1. hőhasznosító kazán

nosító kazánba jutnak. A hőhasznosító kazánban nincs égés, a gázturbinából érkező forró gázok a fűtőfelületek mellett elhaladva hőtartalmukat átadják a csövekben áramló víznek gőz, illetve túlhevített gőz termelése céljából. (Szükség esetén a hőhasznosító kazán kiegészíthető póttüzeléssel, de ekkor az égéshez tüzelőanyagról, levegőről stb. kell gondoskodni.)

A hőhasznosító kazánból a lehűlt kipufogógázok a környezetbe távoznak. A termelt gőz hasznosításának általános módja: kondenzációs gőzturbinába vezetve a villamosenergia-termelés. Így jön létre a kombinált körfolyamatú erőmű második része, egy olyan gőzerőmű, amelyben a gőzkazán szerepét a hőhasznosító kazán veszi át.

A gázturbinás és a gőzturbinás villamosenergia-termelés összekapcsolásának javító hatása az energiaátalakítási folyamatra nyilvánvaló. A gőzturbináknak ugyanis további természeti erőforrás felhasználása nélkül, a gázturbinák üzeméből eredő energiavesztéséből termeli a villamos energiát. Ez az erőműtípus már alkalmas alaperőművi üzemmódra is. A gőzturbinás erőmű rész felépítése pedig lényegesen egyszerűbb, mint a hagyományos gőzerőműveké, hiszen elhagyható a teljes tüzelőanyag-ellátás, valamint a gőzkazán az összes segédberendezésével együtt.

A kombinált körfolyamatú erőmű új telephelyen való építése a gázturbinás egységgel kezdődik, érvényesítve a gázturbinák egyszerűségéből adódó előnyöket. Az elkészült gázturbinás egység már a gőzturbinás rész elkészülte előtt, önállóan bekapcsolódik a villamosenergia-termelésbe. Régi gőzerőművek korszerűsítésekor első ütemben elkészül az új gázturbinák, és üzembe helyezése után már növeli az erőműből szolgáltatható villamos energia mennyiségét. Amikor a hőhasznosító kazán elkészül, a régi erőmű összekapcsolható a gázturbinával, és a régi gőzkazán, valamint a felesleges segédberendezések selejtezhetők.

A hőhasznosító kazánban termelt gőz nemcsak kondenzációs gőzturbinákhoz, de hőszolgáltatási célokra is alkalmas, akár a hőhasznosító kazánból közvetlenül a fogyasztókhoz vezetve, akár oly módon, hogy áthalad hőszolgáltató gőzturbinán és onnan jut a fogyasztókhoz.

Atomerőművek

Az atomenergia villamosenergia-termelésben való hasznosítása a század ötvenes éveiben kezdődött. Ekkor épültek és kezdték meg a termelést az első atomerőművek. A fejlődés gyors ütemű volt, egyrészt a sokféle atomerőmű-típus kifejlesztése és ipari méretű kipróbálása, másrészt a minél nagyobb teljesítményű atomerőművek és országos atomerőmű-építési programok megvalósítása felé.

Bár a biztonság kérdése az atomerőművek építése és üzemeltetése során mindig is kiemelt fontosságú volt, a csernobili atomerőműben bekövetkezett súlyos baleset és más atomerőművek kisebb balesetei az atomerőművek létkérdésévé tették a biztonsági megfontolásokat. Az atomerőmű-berendezéseket gyártó cégek rendkívüli erőfeszítéseket tesznek az egyre biztonságosabb atomerőművek kifejlesztésére.

Magyarországon az atomerőmű-építés gondolata már az ötvenes években felmerült, azonban az építés csak a hetvenes évek közepén indult meg. Az első atomerőmű-egység 1982. december 28-án kezdte meg a villamosenergia-termelést. Azóta jelentősebb üzemzavar nélkül működik, és részesedése a hazai villamosenergia-termelésben meghaladja a 40%-ot. A nemzetközi szakértők és a szakmai testületek ezt az atomerőművet a világ legjobb atomerőművei közé sorolják.

Energiatermelés atommag-reakciókból

A hagyományos tüzelőanyagok égésétől, azaz egy kémiai reakciótól eltérően az atomerőművek alapja atommag-reakció. A meghasadás során a magot felépítő kötési energia felszabadul és hő formájában kinyerhető. A maghasadás folyamatának mellékterméke néhány neutron, valamint a radioaktív sugárzás.

Ahhoz, hogy a maghasadási reakciót energiatermelésre hasznosítsuk, a magreakciót folyamatossá és ellenőrzötté kell tenni. A folyamatosság láncreakció útján érhető el, tehát az egyik atommag hasadásakor keletkező neutronok közül legalább egynek találnia kell egy hasadóképes atommagot, amellyel ütközve azt hasadásra készíti. Az ellenőrzöttség követelménye pedig azt jelenti, hogy biztosítani kell éppen annyi neutron meglétét, amennyi az energiatermelés adott szintjéhez szükséges. Neutronfelesleg esetén a láncreakció felgyorsul, a

neutronhiány pedig a láncreakció leállításához vezet. A felesleges neutronok elnyelő anyagok atommagjaiban foghatók be.

Hasadásra képes atommagjai vannak a természetben található uránium U-235 jelű izotóp-jának. Előfordulási aránya nagyon kicsi, a természetes urániumban az U-235 részaránya mindössze 0,7%. Ennek ellenére az uránium az atomerőművek üzemanyaga. Megfelelő eljárásokkal az uránium természetes izotóp-összetétele módosítható, az U-235 izotóp részaránya növelhető. Az izotópdúsítás ipari méretekben nagyon költséges és energiaigényes, csupán néhány ilyen üzem épült, illetve működik. Ezek az urándúsító művek 2–5% U-235-tartalmú urániumot szállítanak atomerőművi felhasználásra. A mesterséges úton előállított hasadóképes atommagok között külön figyelmet érdemel a plutónium Pu-239 jelű izotópja, mivel atomerőművekben is keletkezik az uránium üzemanyag nem hasadó atommagjaiból.

Az energiatermelési folyamat közben az üzemanyagban fokozatosan csökken a hasadóképes atommagok száma, az üzemanyag „kiég”. Tapasztalati adatok szerint 1 kg urán üzemanyagból (kb. 3% U-235-tartalom) kb. 30 MWnap-nyi energia nyerhető ki a kiegészi szakaszban. A kiégett üzemanyag nagyon erős radioaktív sugárzó, ezért kezelése, elszállítása az atomerőműből, feldolgozása, végső tárolása gondot jelent.

Atomerőművi reaktorok

A maghasadáson alapuló energiatermelés megvalósítására kifejlesztett atomerőművi berendezés a *reaktor*. Szerkezetileg a legáltalánosabban alkalmazott megoldás a tartályban kialakított reaktorzóna. A tartály vastag falú, a gyárthatóság, a szállíthatóság által korlátozott átmérőjű, hosszú hengeres edény, alul féldomború fenékkal és a tetején ugyancsak féldomború, leszerelhető fedéllel. A tartályon csőcsatlakozások vannak a reaktort hűtő közeg be- és kivezetésére, mivel a reaktorból a hűtőközeg szállítja el a felszabaduló energiát.

Az üzemanyag légmentesen zárt burkolatban, az üzemanyagelemekben van elhelyezve. Az üzemanyagelemek alakja rendszerint vékony, hosszú rúd, amelynek kellő merevségét több elem egybefogásával oldják meg (kazetták). Nagyon fontos az üzemanyagelemek mellett a szükséges hűtőközeg-áramlás, mert kellő hűtés hiányában az üzemanyagelemek megolvadnak és a reaktor tönkremegy.

Az atomreaktorban a láncreakció fenntartásához előfeltétele a *lassító közeg*, idegen szóval *moderátor*. A moderátoranyag atommagjai a maghasadáskor keletkező neutronok sebességét ütközéssel csökkentik, hogy a hasadásra vezető magreakció az üzemanyagban nagyobb valószínűséggel bekövetkezzen. Reaktor-hűtőközeggént és moderátorként több anyag használható, és sokféle reaktor építhető.

A gyakorlatban jól bevált, elterjedt reaktortípusok:

- *víz-víz reaktor*: a hűtőközeg és a moderátor egyaránt víz. A forralóreaktorokban hűtés közben a víz elgőzölög, a nyomott vizes reaktorban a víz nyomása elegendően nagy ahhoz, hogy elgőzölgése, illetve forrás ne következzen be. Ezekben a reaktorokban csak dúsított uránium használható.

- *víz-grafit reaktor*: a hűtőközeg víz, a moderátor grafit. Ez a reaktortípus nem tartályos kivitelben épül, a víz csövekben áramlik. Sokat ígérő atomerőművi reaktortípus volt, de napjainkban megkérdőjelezett.

- *gáz-grafit reaktor*: a hűtőközeg nyomás alatti gáz (pl. CO₂: szén-dioxid), a moderátor grafit. Méreteinek bővítése korlátozott.

- *nehésvíz-nehésvíz reaktor*: a hűtőközeg és a moderátor is nehésvíz. Ennek a reaktornak az a nagy előnye, hogy természetes urán üzemanyaggal működik. Kizárólag Kanadában gyártják.

A felsorolt reaktortípusok közül a legelterjedtebbek a víz-víz reaktorok. Elfogadott típusjelzésük az angol elnevezésből: *PWR*(nyomott vizes reaktor) és *BWR*(forralóreaktor). A magyar atomerőmű reaktorai is nyomott vizes típusúak.

A forralóreaktorból kilépő gőz közvetlenül a gőzturbinába vezethető, és innen kezdődően az atomerőművi és a gőzerőművi villamosenergia-termelésben sok a hasonlóság. A nyomott vizes reaktorokban felmelegedett nagynyomású forró vizet a reaktorból a hőcserélőbe vezetik. A hőcserélő csöveiben áramlik a forró víz, amely hőtartalmát a csövek külső felületén levő tápvíznek adja át. A tápvíz a hőátvétel közben elgőzölög, ezért a hőcserélőt az atomerőművekben gőzfejlesztőnek (gőzgenerátornak) nevezik. A gőzfejlesztőből a lehűlt hűtőközeget a fő keringtetőszivattyú nyomja vissza a reaktorba. A reaktor-gőzfejlesztő-keringtetőszivattyú-reaktor zárt kör alkotja az atomerőmű primer körét. A hőcserélőben termelt gázt már a

gőzturbinába vezetik, tehát a primer kör képviseli az atomerőművekben azt az üzembrészt, amit a gőzerőművekben a kazán.

Az atomerőművek biztonsága

Az atomerőművek biztonságának alapkövetelménye annak megakadályozása, hogy az energiatermelési folyamattal együtt járó radioaktivitás ne veszélyeztesse sem az erőműben dolgozók, sem – az atomerőműből kiszabadulva – a lakosság egészségét. A feladat elvileg egyszerű, hiszen az üzemanyag zárt burkolatban van, tehát onnan a radioaktív hasadási termékek, elsősorban a gázok csak az üzemanyagelem burkolatának sérülésekor kerülhetnek ki. Ebből következően az atomerőmű biztonsági rendszerének törekednie kell az üzemanyagelem sérülésének megakadályozására, de ha ez mégis bekövetkezik, meg kell gátolni, hogy a kiszabaduló radioaktív anyag a környezetbe jusson.

Az üzemanyagelem burkolatának sérülését legvalószínűbben túlmelegedés, nem kielégítő hűtés okozza. Számos biztonsági berendezést szerelnek fel a reaktor hűtővízellátásának biztosítására, feltételezve az adódó üzemzavarokat, és kialakítva a megelőzésükhöz szükséges rendszereket. Például külön aktív és passzív üzemzavari reaktorhűtési rendszereket, ezekhez külön tartalék villamosenergia-ellátást stb. Minden biztonsági rendszer három független redundanciával épül.

Magának a reaktornak a leállítását a reaktor önműködő szabályozó- és védelmi rendszere végzi. Védelmi működéskor a szabályozórudak – amelyek az üzemanyagrudakhoz hasonlóak, de üzemanyag helyett nagy neutronelnyelő képességű anyagot tartalmaznak – beesnek a reaktorba és leállítják a láncreakciót. Az üzemanyagelemekben azonban a radioaktív bomlás következtében még van ún. maradvány *hőfejlődés*, amit a hűtőközeggel szintén el kell szállítani a reaktorból.

Az atomerőmű primer körében keringtetett hűtővíz nagy tisztaságú, de a benne levő szennyeződések (pl. korróziós termékek) a reaktorban radioaktívvá válhatnak. Ezért az egész primer kör sugárveszélyes. Az üzemanyagelem burkolatának sérülése esetén a hűtővíz radioaktív terhelése megnő. A további biztonsági rendszerek feladata, hogy megakadályozzák a radioaktivitás kijutását a primer körből. Általánosan elfogadott megoldás a légtömör *védőburkolat* kialakítása, amely magában foglalja az erőmű összes olyan részét, ahová a radioaktivitás eljuthat. A védőburkolat vasbetonból készül, tökéletes zárást biztosít, és bizonyos belső nyomást (üzemzavar esetén keletkező gőznyomás!) elvisel.

Az atomerőmű felkészítése földrengés, külső repülő tárgyak stb. okozta károk kivédésére, valamint annak mérlegelése, hogy a biztonsági rendszerek működtetése mennyiben igényeljen energiaellátást, már biztonságfilozófiai kérdés.

KOVÁTS IMRE

(x)