



## Erőműfejlesztési trendek a világban: korlátok, fejlesztési irányok és ezek távlati kilátásai

2013. november 14-én került sor az Energetikai Szakkollégium Jendrassik György emlékfélévének 5. előadására, melynek témája az erőműfejlesztési trendek voltak. Az előadást Dr. Korényi Zoltán, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem címzetes docense, korábban az E.ON Erőművek Kft. beruházási igazgatója tartotta. Életpályája során több hazai és külföldi erőmű tervezésében és erőművi beruházás megvalósításában is részt vett, ezáltal a szakterületen nagy tapasztalatra tett szert.

Nyitó gondolatoként elhangzott, hogy sajnós az erőműiparban élen járó cégek egyre kevesebb információt hoznak nyilvánosságra új fejlesztéseikről, így még szakmai körökön belül is nehéz olyan tudáshoz hozzáférni, amivel releváns és teljes képet lehetne adni a jövő fejlesztési irányairól. Az előadás során átfogó képet kaphattunk arról, hogyan fejlődött a technológia a kezdetektől napjainkig, megismerkedtünk a világ mostani fejlettségi szintjével, zárásképp pedig néhány lehetséges fejlesztési irányról is szó esett.

## Földünk energiaforrásai, műszaki fejlődésünk története

Az emberi létezés két egyértelmű forrása a Nap, ami a Földet látja el energiával, valamint a Föld, ahonnan az emberi létezéshez szükséges anyagok származnak. A földön lévő energiaforrásokat 100%-nak véve, a napsugárzásból eredő hőtermelés 45%-ot, a vízpárolgatatás 23%-ot, a szél, hullámok és áramlatok 2%-ot, a fotoszintézis pedig 0,023%-ot tesz ki. Ezek mellett elhanyagolhatónak tűnik a fosszilis tüzelőanyagok részaránya, ami összesen 0,006%-ot jelent a teljes, rendelkezésünkre álló energiaforrásokból, viszont jelen pillanatban mégis ezekből származik az energiatermelés jelentős része. Ezen készletek élettartama véges, az erre vonatkozó becslések értéke azonban folyton változó, mivel az mindig a gazdaságosan kitermelhető készletekre vonatkozik, melyek az idő múlásával változik, és korábban veszteségesnek ítélt lelőhelyek is elérhetővé válnak.

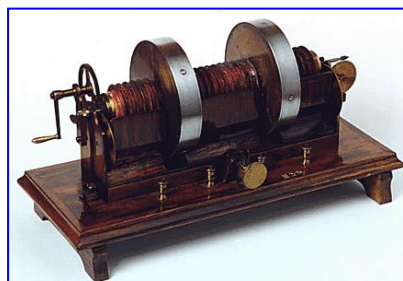
**Gazdaságosan kitermelhető készletek élettartama a 2011. évi kitermelési szinten:**

- **Szén: 112 év**
- **Olaj: 46 év**
- **Gáz: 54 év**

1. ábra: készletek élettartama

Műszaki fejlődésünk kezdete nagyon messzire, egészen a tűz felfedezéséig nyúlik vissza, hiszen a tűz és az égési folyamatok a mai napig nagyon fontos szerepet játszanak az energiatermelésben. Az erőművek kialakulásáig sok berendezés feltalálására és fejlesztésére volt szükség. Az erőgépek ötlete már az ókorban megfogalmazódott, az első ilyen gép Héron nevéhez fűződik, a mai értelemben hagyományosnak vett **gőzgépet** viszont csak a 18. században találták fel. A hiedelemmel ellentétben ez nem Watt találmánya, hanem több előd után Thomas Savery készítette el az első ipari gőzgépet (1698), majd Thomas Newcomen tette stabilan használhatóvá (1712). Ez képezte alapját James Watt fejlesztéseinek (1769), amelyek kialakították a mai technológia legfontosabb alapjait (kondenzátor alkalmazása, regulátor, a hőveszteség jelentősége). Így az ő neve vált ismertebbé a történelemben.

A villamos energia alkalmazása először az 1600-as években jelent meg, elterjedésére azonban még várni kellett. Otto von Guericke alkotta meg az első dörzselektromos gépet, valamint hozta be a köztudatba a vákuum fogalmát is. Faradayhez köthető az első **elektromotor** elkészítése, az elektromágneses indukció felfedezése, valamint az



2. ábra: Jedlik dinamója

elektrolízis is. Jedlik Ányos szintén fontos szerepet töltött be ebben a sorban, hozzá fűződik többek között az első egyenáramú villanymotor, valamint az első dinamó feltalálása is. A villamos energia hasznosításának történetében a két legfontosabb ember Nikola Tesla, valamint Thomas Edison voltak. Tesla volt a **háromfázisú generátor** és a váltóáramú motor feltalálója, emellett a rádiósugárzás elvének megfogalmazása is neki köszönhető. Edison az egyenáram képviselője volt, ő találta fel a szén-szálas izzószálat, valamint az ő közreműködésével épült meg az első elektromos **erőmű** is.

Az erőművek megjelenésére az 1800-as évek végéig kellett várni. A világ első erőművét 1878-ban építették Bajorország területén II. Lajos király megrendelésére. Dugattyús gőzgép hajtással üzemelő dinamók, valamint szénelektrodos lámpák összhangjával a Lindenhof kastély kertjében lévő Vénuszbarlang megvilágításáért volt felelős. A korai erőművek az elsőhöz hasonlóan világítási igény kiszolgálására létesültek. Az első közvilágítási célú erőmű Londonban épült (1882. január), ezt nem sokkal követte egy New York-i erőmű megépítése is (1882. szeptember). Mindkét létesítmény Edison tervei alapján készült el. Magyarország is tartotta a lépést a fejlődéssel, 1884-ben Temesváron készült el az első magyarországi közcélú erőmű, ami szintén városi közcélú világítási feladatot látott el. A világ első atomerőműve 1954-ben épült Obnyinszkban, a 2. világháború után rendelkezésre álló fejlettebb technológiát alapul véve.

A technológia az évek során nagyon sokat fejlődött, az utóbbi években a növekedés üteme megnőtt. Ma már sokkal szélesebb körben zajlik az energiatermelés, mint a kezdetekkor, és az emberi igényekhez igazodva sokkal nagyobb méreteket is öltött. A világ mai legnagyobb létesítményeit foglalja össze a következő táblázat:

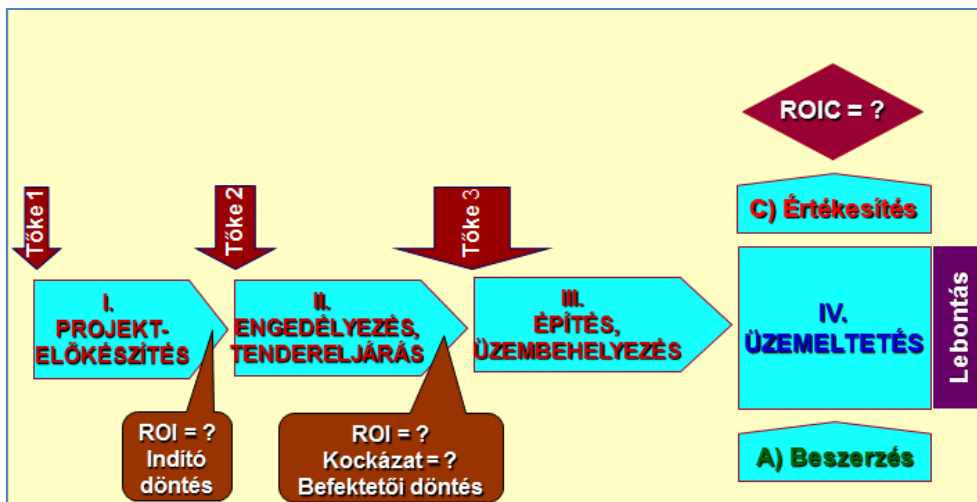
<b>Erőműtípus</b>	Víz	Szén	Olaj	Gáz	Atom
<b>Helyszín</b>	Kína	Taiwan	Szaúd-Arábia	Oroszország	Japán
<b>Teljesítmény [MW]</b>	22500	5824	5600	5600	7965

<b>Erőműtípus</b>	Nap (lapos napelem)	Nap (koncentráló napelem)	Off-shore szélpark	Biomassza
<b>Helyszín</b>	USA	USA	UK	Lengyelország
<b>Teljesítmény [MW]</b>	250	37	1000	205

## Az erőműfejlesztések hajtóereje, fő irányai

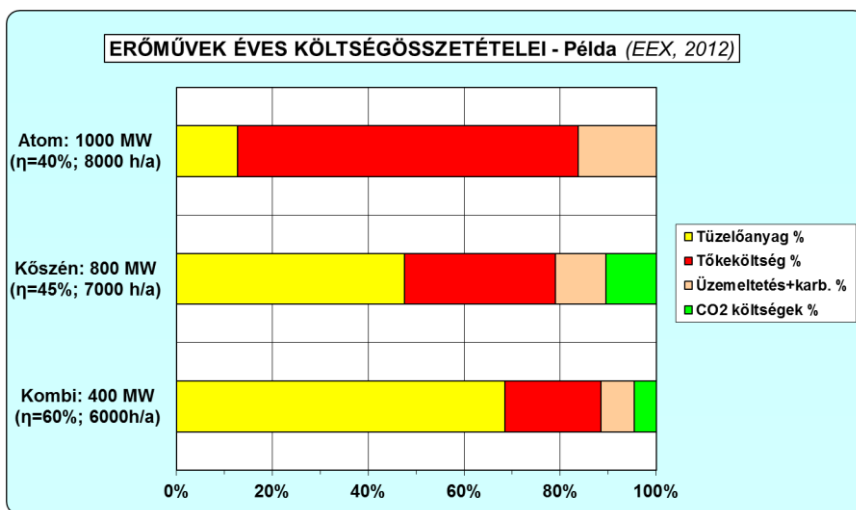
Az előadó szerint ahhoz, hogy megtudjuk, milyen irányba tartanak a fejlesztések, tisztában kell lennünk azon főbb tényezőkkel, amelyek egy erőmű megvalósíthatóságakor szerepet játszanak. Minden erőműépítés célja, hogy a befektetett pénz a teljes életciklus alatt megtérüljön. Az erőművek megépítése rendkívül összetett feladat, a folyamat során nagyon sok szempontot figyelembe kell venni. A projekt előkészítése során gondoskodni kell a jogi, pénzügyi és megvalósíthatósági tervekről, melyek alapján felmérhető, hogy az adott erőmű megépítésével megéri-e foglalkozni, valamint az lehetséges-e az elképzelések alapján. A kezdeti számítások után szükséges egy indító döntés meghozatala, ezután kezdődhet el az erőmű megépítéséhez és üzemeltetéséhez szükséges engedélyek megszerzése, valamint a berendezésekről szóló tendereljárás kiírása is. A beérkezett ajánlatok alapján ismét számítások szükségesek, majd az eredmények és kockázatok figyelembevételével történhet meg a befektetői döntés. Ha a befektetők az erőmű megépítése mellett döntenek, ezek után kezdődhet meg a tényleges építkezési folyamat, illetve az üzembe helyezés.

Az erőmű tényleges élettartama az üzembe helyezésétől annak lebontásáig tart. Az üzemeltetési szakasz alatt törekedni kell arra, hogy gazdaságosan és nyereségesen tudjon működni az adott létesítmény. Mindez a megfelelő beszerzések és értékesítések mellett lehetséges. Az itt ismertetett folyamatot szemlélteti a 3. ábra is. Fontos mutatószám a ROI (Return on Investment – tervezett beruházás belső megtérülési mutatója), ami a projekt előkészítés, valamint az engedélyezés és tendereljárás folyamatok közben játszik meghatározó szerepet, valamint a ROIC (Return of Invested Capital – befektetett tőke adózott hozama), ami a már üzemelő erőmű esetében fontos.



3. ábra: egy erőmű megvalósításának lépései

Amint arról már korábban is szó volt, erőművek megépítésekor a kitűzött cél a befektetés pénzügyi megtérülése a teljes életciklusra. Ehhez szükséges a költségek minimalizálása, valamint a bevételek maximalizálása. Főbb kiadások a tüzelőanyag vásárlás, tőkeköltség, munkabér, hűtővíz felhasználás, segédanyagok beszerzése, hulladékkezelés, CO<sub>2</sub>-kvóta vásárlás, környezetvédelem, karbantartás, önfogyasztás. Ezek a költségek erőmű-típusonként változóak, néhány főbb esetre látható ezek eloszlása a 4. ábrán.



4. ábra: erőművek éves költségösszetételei

A bevételek közé tartozik a villamosenergia-értékesítés (kWh), kiegyenlítő energia, kapacitás (MW), rendelkezésre állás, rendszerszintű szolgáltatások a villamosenergia-rendszer irányítója felé (primer/szekunder/tercier szabályozás, terhelésváltoztatás nagysága), valamint a hőenergia értékesítése (GJ).

A felsorolt kiadások és bevételek alapján lehet következtetni az erőműfejlesztések főbb irányaira is. A körfolyamat hatásfokának növelésével – azaz a hőközlés hőmérséklet szintjének emelésével – az erőmű tüzelőanyag-fogyasztása csökken, valamint a működés környezetkímélőbbé válik. Ennek jelen pillanatban a szerkezeti anyagok

összetétele szab korlátot, mivel a jelenlegi technológiák már elérték azt a határt, amit az általánosságban ismert és használt szerkezeti anyagok elviselnek. Az erőmű összzhatásfokához hozzájárulnak az erőművi berendezések (pl. kazán, turbina, generátor) egyes hatásfokai is, így azok növelése is kedvezően hat termodinamikai szempontból, ezen megoldások azonban mind növelik az erőmű beruházási költségét.

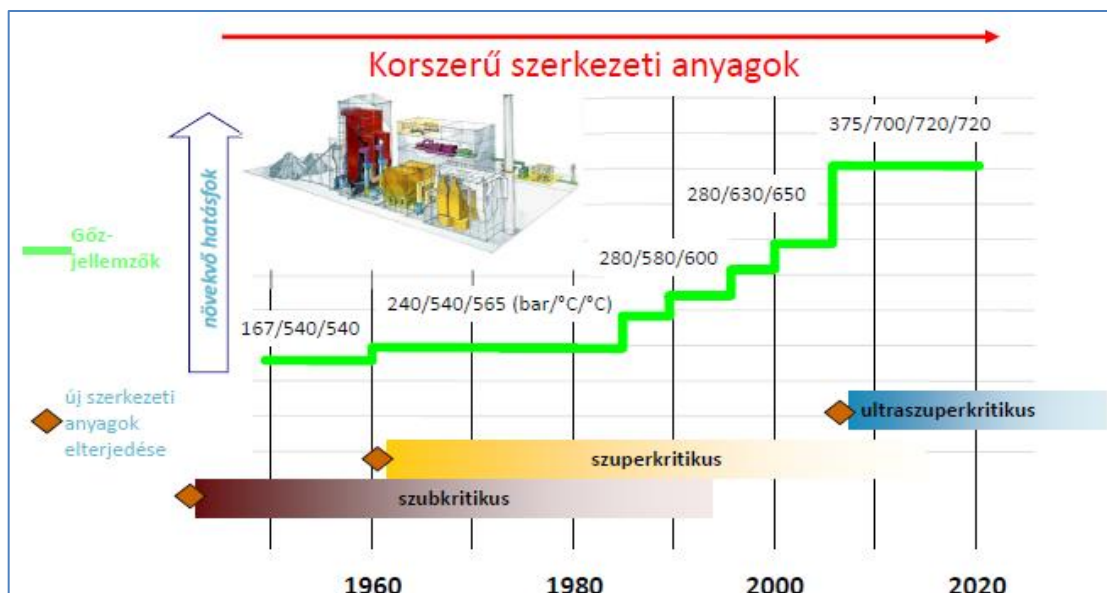
A szigorodó környezetvédelmi előírásoknak szintén meg kell felelni, ami – erőműtípustól függően – szükségessé teszi plusz berendezések beépítését. Ez költségnövekedéssel, valamint hatásfokcsökkenéssel jár (mivel a berendezés energiaigénye növeli az erőmű önfogyasztását), ez azonban az üzemeltetés szempontjából elengedhetetlen. A villamosenergia-rendszer irányítója által támasztott követelményeknek minél magasabb szinten kell eleget tenni. A rendelkezésre állás, valamint a rugalmasság növelése (tehát a gyors indíthatóság és terhelésváltoztatás) növeli egy erőmű értékét. A meglévő erőműállomány korszerűsítése, valamint átépítése egy olyan lehetőséget jelent a befektetők számára, ami kisebb tőkét igényel, mint egy teljesen új erőmű megépítése, amelynek a megtérülése is gyorsabb. A piaci igények változása újszerű követelményeket támaszt, így az ezekhez való alkalmazkodás is egyfajta fejlesztési irányt jelenthet (pl. ha egy 500 MW-os erőműtől csak 50 MW teljesítményre van igény).

## Az erőművek fejlődése

Az emberiség folyamatos technológiai fejlődése az erőműfejlesztések területén is változásokat idézett elő. Az előadásban részletesebben a hagyományos gőzerőművek, a gázturbinák kerültek vizsgálat alá valamint a kombinált ciklus kialakulásáról, és a kezdetektől a mai szintig való eljutásáról volt szó.

A gőzerőművek a XX. század elején még alacsony hőmérséklet- és nyomástartományban működtek, ezáltal elég alacsony hatásfokot lehetett elérni az akkori gépekkel. Az egyre újabb és újabb szerkezeti anyagok megjelenésével lehetővé vált, hogy az erőművi berendezések magasabb gőzparaméterekkel tudjanak üzemelni. A fejlődés története látható az 5. ábrán, ahol az egyes szintekhez tartozó értékek rendre: frissgőznyomás/frissgőz-hőmérséklet/újrahevítési hőmérséklet (bar/°C/°C). A szerkezeti elemek korszerűsítése által csökkentek a veszteségek, valamint az erőművek hatásfoka is megnőtt. Széntüzelésű erőművek esetében ezt a növekedést nem csak a maximálisan elérhető paraméterek gátolják, hanem az egyre szigorúbb környezetvédelmi követelmények is. A magas CO<sub>2</sub>-kibocsátás meggátolásának érdekében szükséges technológiák mind az erőmű önfogyasztását, mind a beruházási költségeket is növelik.

A német „50 plusz” programot külön a gőzerőművek fejlesztésének érdekében hozták létre. Célja az volt, hogy a 600°C frissgőzhőmérsékletű technológiákról (~ 45%-os hatásfokú) új szerkezeti anyagok alkalmazásával eljussanak a 700°C-os (~50%-os hatásfokú) fejlettségi szintre. A kutatást a 2000-es évek elején kezdték, főbb témakörei közé tartozott a nikkel-alapú szerkezeti anyagok vizsgálata egyes berendezéseknél, az anyagtulajdonságok, a gyártási és hegesztési tulajdonságok, a füstgázkorrózió, valamint a hőátadási jelenségek vizsgálata. Az ambiciózus tervek ellenére a gazdasági válság itt is nyomott hagyott, így a programot nem tudták véghezvinni.



5. ábra: szerkezeti anyagok fejlődése

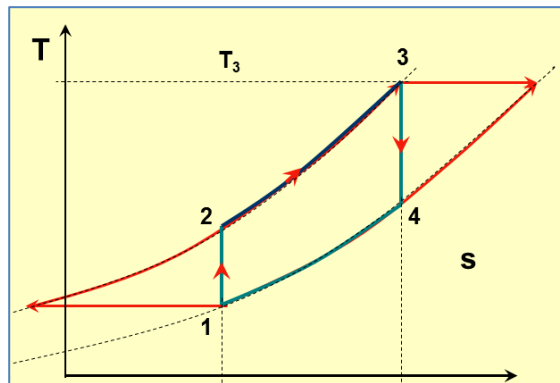
Amikor gázturbináról van szó, akkor sokan egy gépre gondolnak, viszont valójában a gázturbina, mint egység létezik. Fő részeit a kompresszor, az égőtér, valamint a turbina képezik. A kompresszor meghajtása jelenlegi viszonyok szerint a turbina által leadott teljesítmény közel 50%-át igényli, így a generátorra csak a maradék 50%-nyi teljesítmény jut. A mai értelemben vett gázturbinák történelme a 18. század végén kezdődött, az első igazi gázturbinás szabadalmat John Barber hozta létre 1791-ben, az első önfenntartó gázturbinára azonban 1903-ig kellett várni (Egidius Elling szabadalma). Fejlődésük a háborúk során a hadipar fejlődésével együtt történt. Magyar vonatkozásban mindenképp fontos kiemelni Jendrassik György munkásságát, aki a világ első gyűrűs égésterét alkotta meg, valamint a világ első légcsavaros gázturbinájának tervét is elkészítette. Az első erőművi gázturbina 1939-ben került üzembehelyezésre. A fejlesztések elméleti alapját a Brayton-körfolyamat szolgáltatja (6. ábra – kék körfolyamat). A folyamat adiabatikus kompresszióból és expanzióból, valamint izobár hőfelvételtől és hőleadásból áll. Ha növelni tudjuk az átlagos hőbeviteli hőmérsékletet, azáltal nő a körfolyamat hatásfoka is. Mivel a beszívott levegő hőmérséklete a folyamat során adott, így ezt csak a turbinába belépő  $T_3$  hőmérséklet növelésével tudjuk befolyásolni, aminek ebben az esetben is a szerkezeti anyagok hőállósága szab határt.

Szintén egy ilyen próbálkozás volt az Ackeret-Keller körfolyamat, ami adiabatikus folyamatok helyett izotermikus, azaz állandó hőmérsékletű kompressziót és expanziót alkalmazott (6. ábra – piros körfolyamat).

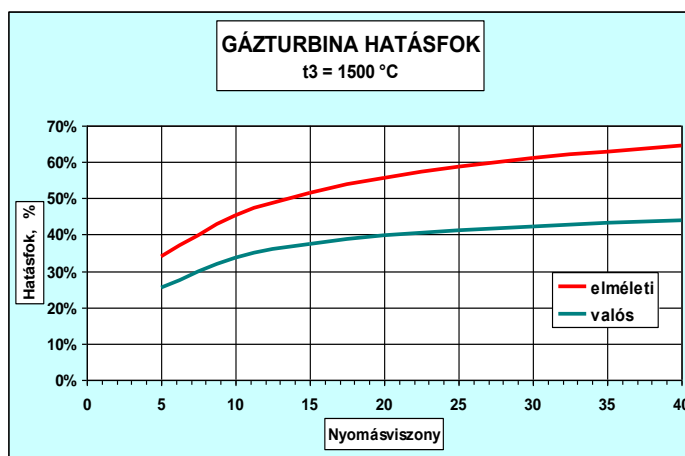
Gázturbinák hatásfoka növelhető a nyomásviszony növelésével is. A nyomásviszony megadja, hogy a beszívott levegő (általában atmoszférikus) nyomásának hányszorosa a komprimált levegő nyomása. A kapcsolatot a 7. ábra szemlélteti.



Az előadó szerint a technológia csúcsát jelenleg négy cég fejlesztései jelentik. Az Alstom tervei alapján egy alacsonyabb tüztérhőmérsékletű (Dry Low NOx technológia), 30-as nyomásviszonyú gázturbinás egység készül, kivitelezéstől függően a kombinált ciklusú erőmű (gáz+gőzturbina) teljesítménye akár 540 MW is lehet, nettó hatásfoka az 59%-ot is elérheti. Kétfokozatú égőkamra alkalmazásával nagyon tág teljesítménytartományban tud üzemelni (25 – 100%). A GE fejlesztése egy 23-as nyomásviszonyú, Dry Low NOx technológiával felszerelt gázturbinás egység. Teljesítménye (kombinált ciklusban) 520 MW, nettó hatásfoka 60%. Lapáthűtésre gőzt használnak, amit nem a folyamatba vezetnek be, hanem üreges kialakítású lapátokat építenek be, amin keresztül vezetik a kombinált ciklus gőzturbinás részéből származó gőzt. Ez mindkét körfolyamat számára előnyös, hiszen a kompresszorból nem kerül levegő elvonásra, emellett a gőz hője hasznosul a gőzturbinában, így ez összességében 2%-os hatásfokváltozást is előidézhet. A Mitsubishi által fejlesztett gázturbina 21-es nyomásviszonnal rendelkezik, a turbinába belépő füstgáz hőmérséklete 1600°C. A lapátok hűtése a GE megoldásához hasonlóan gőzhűtéssel történik. A gázturbina teljesítménye 320 MW, a kombinált ciklusú erőmű nettó hatásfoka valamivel 60% felett van. A Siemens fejlesztése egy 23-as nyomásviszonyú, levegőhűtésű gázturbina. Kialakításának köszönhetően rövid indítási idővel (~40 perc) rendelkezik, emellett rugalmas üzemre képes. Az SGT5-8000H jelzésű gázturbina teljesítménye 375 MW, a kombinált ciklusú erőmű nettó teljesítménye 570 MW, nettó hatásfoka pedig 61% körüli.



6. ábra: Joule-Brayton és Akeret-Keller körfolyamatok



7. ábra: gázturbina hatásfoka a nyomásviszony függvényében

Egyre elterjedtebb a kombinált, avagy összetett ciklusú erőművek alkalmazása. Ennek lényege, hogy a gázturbinából kilépő magas hőmérsékletű füstgázt egy hőhasznosító gőzkazánon keresztül vízgőz előállítására használják, ami egy gőzturbinát hajt meg. A kombinált ciklusú erőműveknek négy nagy generációja volt eddig. Az 1950-es, '60-as években indultak fejlődésnek, a működést a gázturbinára optimalták. Alkalmazása erőmű rehabilitáció céljából, illetve kapcsolt termelés céljából történt. A gőzkörfolyamatban 1-2 nyomásfokozatú elgőzölögtetést alkalmaztak, nem volt újrahevítés, valamint az emisszióval sem foglalkoztak. Ezek az egységek 3-5 MW-os teljesítménytartományban, 30-40%-os hatásfokkal üzemeltek. Az 1960-70-es időszakban már áramtermelésre, valamint tápvíz előmelegítésre is használták őket. Az elgőzölögtetés

már 1-2-3 nyomáson zajlott, de még mindig újrahevítés nélkül, viszont az emisszió mérése (pl. NO<sub>x</sub>-tartalom figyelése, szűrése) már szerepet kapott. A kombinált ciklusú egységek 50-100 MW-os tartományban, 40-45%-os hatásfokkal működtek. Az 1980-90-es években már nem a gázturbinára, hanem magára a teljes folyamatra optimalták a működést. A technológia fejlődésével egyre magasabb hőmérsékletet értek el, lehetővé téve a gőz újrahevítését, valamint magasabb teljesítmény elérését (70-250 MW), és a magasabb hatásfokú üzemeltetést is (45-58%). A ma is használatos, új erőművek a 2000-es évektől kezdtek el terjedni. A gózturbinánál 565°C-os gőzhőmérséklet is elérhető, mindez 95-125 bar között. A teljesítmény 400-600 MW között változik, hatásfokuk akár már 60% feletti is lehet.

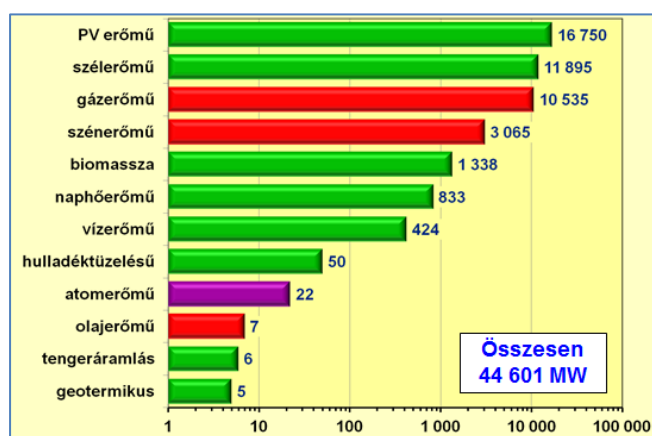
Az előadásban kiemelt egyik új megoldás az erőműfejlesztések terén a decentralizált rendszerek létrehozása. A virtuális erőmű lényege, hogy több, kisebb teljesítményű egységet egy központi számítógépes vezérlés köt össze, ami a fogyasztói igényekhez igazodva működik, és a rendszerirányító számára egy erőműként jelenik meg. A korszerű technológiának köszönhetően lehetővé teszi megújuló energiaforrások bevonását is (valós idejű időjárási adatok mérésével).

A mikrohálózatok olyan okos rendszerek, melyek állandó mérések által elősegítik a decentralizált rendszerekhez való igazodást. Gyakorlatilag a teljes rendszertől különálló körként működve nem a központi rendszerirányító szabályozza őket, hanem a termelés és a fogyasztás egyensúlya a körön belül van biztosítva.

## Jövőkép



Több ország esetében (többek között Magyarországnál is) a felhasználás jelentős részét villamosenergia-import fedezi. Ez annak köszönhető, hogy a hazai termelés, elsősorban a földgáztüzelésű erőművek esetében, a magas gázárak miatt, nehezen tudja felvenni a versenyt az import villamos energiával szemben. Ebben a helyzetben egy új erőmű fejlesztése szinte teljesen lehetetlen. Több szempont viszont indokoltá teszi új egységek építését: egyrészt a régi blokkok leállításából származó hiány pótlása miatt, másrészt a növekvő fogyasztói igények miatt is szükség lesz rájuk. A 8. ábrán az EU-27 országok által 2012-ben üzembe helyezett új egységek láthatók kategóriák szerint. Ebből látszik, hogy egyértelműen a megújuló energiaforrásokat részesítették előnyben a beruházók. Az előadó szerint a jelen tükrében festhető jövőkép nem a legfényesebb az



8. ábra: EU-27 országok által épített új blokkok 2012-ben

erőműfejlesztések szempontjából, ám semmiképp sem elhanyagolható a szükségessége. A rendszer teljes beépített teljesítménye ~ 950000 MW, csúcsterhelése viszont csak ~550000 MW, tehát jelentős tartalék áll rendelkezésre. Az újonnan üzembe helyezett erőművek mellett nagyjából 25000 MW-nyi régi egység került leállításra, ezek főként szenes, illetve atomerőművek voltak. A jelenlegi alacsony villamosenergia-

árak mellett figyelembe kell venni, hogy milyen típusú erőmű mennyire tud gazdaságosan üzemelni, mit lenne érdemes fejleszteni. A szenes erőművek esetében bár az üzemanyag olcsó, de figyelmet kell fordítani a CO<sub>2</sub> kibocsátásra, illetve az ebből eredő CO<sub>2</sub>-kvótára is. A földgázzal üzemelő erőművek esetében az üzemanyag költsége nagyjából a termelési költség kétharmadát teszi ki, így főleg a jobb hatásfokú, korszerű erőművek tudnak érvényesülni. A megújulók esetében az egyre növekvő darabszám csökkenő beruházási költségeket eredményez. Az atomerőművek értékelésében nagyon fontos szerepet játszik a társadalmi elfogadottság, valamint ebből kifolyólag az aktuális politikai helyzet is. Európában jelenleg bizonytalanság jellemző, de a világ több részén is folyamatos fejlesztések mennek végbe. A gazdasági helyzetet figyelembe véve inkább egyszerűbb, olcsóbb megoldások jellemzőek. A meglévő létesítmények, épületek energiahatékonyságának növelése is látható javulást eredményez, viszont kisebb mértékű forrást igényel a beruházóktól. A gazdasági válság okozta visszaesés emellett a felhasználói igények csökkenését is jelentette, ami kevésbé teszi szükségessé az új beruházásokat.

Az előadás záró gondolatsora a ma hallgatóinak volt címezve. Az ipar folyamatosan változik, amihez minden helyzetben fontos igazodni. A jó szakember rengeteg feladatkörben helyt tud állni, a szakmát pedig ezek a jó szakemberek viszik előre.

**Péter Norbert**  
Energetikai Szakkollégium tagja