



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
DOKTORI TÉZISFÜZETEK  
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR DOKTORI TANÁCSA

Írta:

Böszörményi Gábor

okleveles gépészmérnök

**NAGYTELJESÍTMÉNYŰ HŐSZIVATTYÚ  
MATEMATIKAI MODELLEZÉSE**

című témakörből,

amellyel a Ph. D. fokozat elnyerésére pályázik

Prága

2007

# 1. A témaválasztás háttere, célkitűzések

Szlovákia foszilis energiahordozókban rendkívül szegény, ezért a Kassai Katlanban felfedezett földhőpotenciálnak, amelyből mintegy 300 MW hőteljesítményt lehetne gazdaságosan kihasználni (lásd [14]), szinte stratégiai jelentősége van.

Az eredeti, túlzottan optimista prognózis szerint a gazdaságosan felszínre hozható termálvíz hőmérséklete meghaladhatja a 140 °C-ot. Ezért az ORC-technológián alapuló közvetlen villamosenergia-termelésre való felhasználás is számításba jött, de a gazdaságossági vizsgálat kiábrándító eredményei miatt ez nem tartható indokoltnak. Az így termelt villamos energia költségei ugyanis 3-4-szer meghaladnák a szlovákiai villamosenergia-termelés átlagos költségeit. Mint később a próbafúrások eredményei alapján kiderült, a valóság még ettől is lehangolóbb lenne, mivel a termálvíz hőmérséklete a felszínen valószínűleg nem lesz magasabb 130 °C-nál egy termelőkút hozzávetőlegesen 60 kg/s-os hozama mellett. Következésképpen a fölfedezett geotermális potenciálnak a kassai távhőszolgáltató rendszerben való kihasználása látszott a legésszerűbb megoldásnak annak ellenére, hogy a források és a városi fűtőerőmű közötti távolság 15-16 km. Így a földhő hasznosítását célzó javaslat a kassai távhőszolgáltató rendszer hosszútávú fejlesztési tervének szerves részeként került napirendre.

A városi fűtőerőmű üzemeltetője, a Tepláreň Rt. (TEKO), a 90-es évek elején az élettartama határán levő termelő egységének (TEKO I) leállítását tervezte. Azt követően mintegy 200 MW fűtőtéljesítményt kellett volna helyettesíteni. A probléma megoldásának lehetőségeivel a pozsonyi (Bratislava) EGÚ Rt. által kidolgozott [18] tanulmány foglalkozott. Ebben a három vizsgált koncepció közül annak megvalósítása volt ajánlva, amely szerint 8 kútpárból nyert mintegy 100 MW fűtőtéljesítmény kihasználása mellett kb. 2500 TJ földhővel lenne ellátva, ami csaknem az évi hőfogyasztás felének felel meg. További 100 MW fűtőtéljesítményt egy a TEKO I termelőegységet helyettesítő kombinált gáz/gőz fűtőerőműnek kellett volna szolgáltatnia. Mivel azonban ennek finanszírozását nem sikerült bebiztosítani, áthidaló megoldásként a TEKO I termelőegység élettartama meg lett hosszabbítva, de a geotermikus hőhasznosítás ügye továbbra is napirenden maradt.

A GEOTERM Rt. kezdeményezésére a Houe & Olsen dán és a Kvistgaard izlandi vállalatok részvételével és a Dán Környezetvédelmi Minisztérium hozzájárulásával 2002-ben kidolgozásra került a [13] vállalkozói terv, amely szerint a földhőhasznosítás kissé módosított koncepció alapján zökkenőmentes finanszírozás esetén 2007-ben megvalósulhat, de ismerve a helyi viszonyokat bizonyos csúszással mindenképpen számolni kell. A földhőnek Kassa távhőszolgáltató rendszerébe való betáplálása tehát minden bizonnyal csak az évtized vége felé várható.

Azt követően viszont aktuálissá válik a fűtőerőmű 120 MW-os teljes villamos teljesítményű mindkét egységének (TEKO I, TEKO II) leállítása. Mivel a szlovákiai erőműpark termelő kapacitása 2010-ig az elkerülhetetlen leállítások miatt ezzel együtt csaknem 1800 MW-tal csökkenni fog, jó esély van arra, hogy a TEKO I és TEKO II egységek végül egy kombinált gáz/gőz fűtőerőművel lesznek helyettesítve, amelynek villamos teljesítménye a 120 MW-ot jóval meghaladhatja. A kivitelezés viszont kedvező esetben is csak a

következő évtized elején lehet aktuális, amikor a földhőhasznosítás a [13] vállalkozói terv értelmében minden bizonnyal megvalósul. Ezért indokoltan felmerül az igény az elég szerény gazdaságossági hatékonyságú koncepció alapfilozófiájának olyan irányú innovációjára, amely az energiahatékonyság és a gazdaságossági mutatók javításához vezethet.

Ennek érdekében tevékenyen lépett fel a Kassai Műszaki Egyetem egy kis kutató csoportja, amellyel alkalmam volt szorosán együttműködni. Így a disszertációm keretei között lehetőségeimhez mérten igyekeztem támogatni az erre irányuló törekvéseket, melnek alapja az a több irodalmi forrásban vázolt elképzelés (pl. [9], [10], [20], [21], [22]), hogy lényeges előrelépést lehetne elérni azzal, ha az eredetileg tervezett hagyományos kombinált gáz/gőz fűtőerőmű helyett egy hibrid kapcsolt energiatermelésű gáz/gőzerőmű lenne létesítve. Ez a hagyományos rendszertől abban különbözik, hogy lehetővé teszi a földhőnek a gőzkörfolyamatba való betáplálását a tápvíz előmelegítése által. Így a földhő tőkeigényes ORC-Cycle vagy Kalina-Cycle technológia alkalmazása nélkül villamosenergiává alakítható. A földhő felhasználása egy ilyen típusú erőműben a változatlan tüzelőhő-teljesítmény esetében a villamos teljesítmény növekedését idézné elő, ill. a tüzelőhő-teljesítmény csökkenését változatlan villamos teljesítmény esetén.

A kapcsolt energiatermelésen kívül az ilyen erőműre jellemző a földgáz és a földhő **kapcsolt** felhasználása is ellentétben az eredeti elképzeléssel, amelynél azok egymástól **függetlenül** valósulnának meg.

A visszatérő szekunder földhőhordozó hőmérséklete még így is 40-50 °C lenne. Ezért lehetőség van a földhőhasznosítás mértékének további fokozására egy nagyteljesítményű hőszivattyú által.

A munkám célja nem volt, s nem is lehetett annak eldöntése, hogy a földhőhasznosítás melyik alternatív koncepciója milyen konkrét rendszerstruktúrával és üzemeltetési paraméterekkel lenne a legelőnyösebb. Jelenleg ugyanis nem lehet elfogadható pontossággal felmérni, hogy a megvalósítás után – ami a következő évtizedben lehet aktuális – milyen körülmények között történne az üzemeltetés és milyenek lennének az érdekelt felek közötti tulajdonviszonyok. Ezekkel a problémákkal csak olyan mértékben foglalkoztam, amennyire azt szükségesnek tartottam a témaválasztás háttérének megvilágítása szempontjából. Ehhez a Kassai Műszaki Egyetem kuoatóival való együttműködés szolgált alapul, amelynek fő eredményei a [2] – [8] munkákban és erősen tömörítve főleg a *3. fejezetben* vannak tárgyalva.

A fő cél egy szoftvermodul kidolgozása volt, amely elősegítheti azon energiahatékonysági és gazdaságossági problémák megoldását, amelyeket a földhőhasznosítás mértéke nagyteljesítményű hőszivattyú által való növelésének igénye a felszínre hozhat. A hőszivattyú állandósult üzemállapotainak modellezése terén bizonyos eredmények fellelhetők a [17] munkában. Az ott alkalmazott matematikai modell viszont csak annak a vizsgálatára alkalmas, hogy milyen módon befolyásolja a hőszivattyú fokozatainak száma az energiahatékonyságot. A gazdaságossági szempontokat teljesen figyelmen kívül hagyja. Ezen kívül olyan hűtőközegek alkalmazását feltételezi, melyek használata a környezetet károsító hatásuk miatt már be van tiltva (R11, R12, R22). Továbbá a hatékonyság vizsgálatára a szerző az entalpiaszemléletet alkalmazza, figyelmen kívül hagyva az egyes alrendszerekben keletkező kvalitatív veszteségeket. Értékesebb ismereteket lehet szerezni a [11], [12] munkákból, amelyekben megtalálhatók a

matematikai modell kidolgozásához szükséges termodinamikai összefüggések, azonkívül az energetikai rendszerek dekompozíciója általánosan használható elvének leírása. A [17] munkában leírt program nem teszi lehetővé a kompresszió izentropikus hatásfokának a beszívott térfogatáram függvényében való kifejezését, ami nagyteljesítményű, turbókompresszorokkal működő hőszivattyúk vizsgálatánál elengedhetetlen.

A matematikai modell kidolgozása kizárólagosan önálló munkám. Annak szoftver megjelenítését előbb a Pascal programozási nyelvben dolgoztam ki, majd egy hivatásos programozó barátom segítségével az erre a célra alkalmas Java programozási nyelvben írtam át.

## 2. Munkamódszerek, eredmények

A disszertáció fő céljának elérése érdekében a következő főbb részfeladatokat oldottam meg:

1. Általános módszer kidolgozása a hőszivattyúnak mint kibernetikailag értelmezett rendszernek parciális hőszivattyúkra való első szintű dekompozíciójára, valamint elementáris alrendszerekre való második szintű dekompozíciójára.
2. Az első és második szintű dekompozíció hatásának vizsgálata a hőszivattyúban megvalósuló energiaátalakítási folyamatok hatékonyságára exergiaanalízis alkalmazásával.
3. Egy általános parciális hőszivattyú matematikai modelljének bázis-modellként való kidolgozása az elementáris alrendszerek matematikai leírása alapján.
4. Megfelelő algoritmus kidolgozása egyrészt a hőszivattyú állandósult üzemviteli modelljének a bázis-modell felhasználásával történő generálására, másrészt az energetikai és gazdaságossági hatékonyság vizsgálatára az így nyert virtuális modell alkalmazása által.
5. Az algoritmus leképzése szoftver-modullá a megfelelő programozási eszközök felhasználásával.
6. A szoftver-modul felhasználhatóságának bemutatása a hőszivattyúnak a kapcsolt energiatermelésű hibrid kombinált gáz/gőzerőműbe való integrálása hatékonyságának elemzésére a Tepláreň Rt. szempontjából.

A munkám konkrét, gyakorlatban felhasználható eredménye a MAMUHEP szoftvermodul a hőszivattyú környezeti hőmérséklettől függő állandósult üzemi állapotainak vizsgálatára szolgáló matematikai modellen alapul. A projekt előkészületi fázisában előforduló problémák megoldásával könnyítené a döntéshozatalt, míg a meghatározott műszaki megoldású hőszivattyú esetében lehetővé tenné annak energiahatékonysági és gazdaságossági vizsgálatát különböző feltételek mellett. Ezenfelül alapul szolgálhat egy komplex szoftvercsomag kidolgozásához, amely az ilyen vizsgálatokat kiterjesztené a kapcsolt energiatermelésű hibrid kombinált gáz/gőzerőmű teljes rendszerére. Annak keretében természetesen a MAMUHEP egyes konkrét részletei megfelelő módon korrigálhatóak.

A matematikai modell kidolgozásánál a kibernetikából ismert *dekompozíció/kompozíció* elvét alkalmaztam. Az 5. fejezetben leírtaknak megfelelően esetünkben ez azt jelenti, hogy a hőszivattyú rendszert először a hőszivattyú fokozatoknak megfelelő parciális hőszivattyúkra (a dekompozíció első szintje), majd az egyes parciális hőszivattyúkat négy elementáris alrendszerre bontjuk (a dekompozíció második szintje). Ezen alrendszerek matematikai leírása az egyes parciális hőszivattyúkban formailag megegyezik. A parciális hőszivattyú bázismodellnek felfogható matematikai modellje a 7. fejezetben leírtak értelmében az azt alkotó alrendszerek entrópia/hőmérséklet szemlélet szerinti matematikai leírásán alapszik (a kompozíció első szintje). A MAMUHEP szimulációs szoftvermodul a bázismodell alapján generálja a hőszivattyú virtuális modelljét (8-10. fejezetek, a kompozíció második szintje). Ennek fő eredménye a hőszivattyú állandósult üzemvitelének teljesítménymérlege a környezeti hőmérséklet függvényében, mely alapul szolgál az évi üzemeltetés energiahatékonysági és gazdaságossági vizsgálatához.

Annak ellenére hogy a munka témáját a kassai fűtőerőműben tervezett földhőhasznosítás mértékének növelésére támasztott igény ihlette, a MAMUHEP szimulációs szoftvermodul felépítése univerzális, és megfelelő bemenő adatok alapján jelenlegi állapotában is alkalmas a nagyteljesítményű hőszivattyúk tervezésével összefüggő különböző feladatok megoldására. Ezen felül a termodinamikai összefüggések kibernetikai módszerek általi alkalmazásával gazdagítja a nagyteljesítményű hőszivattyúk energiahatékonysági és gazdaságossági vizsgálatának általános elméletét és gyakorlatát is. A 2. fejezetben kitűzött célok tehát teljesítettnek tekinthetők.

### 3. Új tudományos eredmények, tézisek

A Kassai Műszaki Egyetem kutatócsoportjával való együttműködésem eredményei alapján a következő téziseket lehet megfogalmazni:

#### 1. tézis (3.2. alfejezet, [2]-[8])

A földhőnek egy gőzkörfolyamatba a tápvíz előmelegítés általi betáplálása egyértelműen előnyösebb mint az eredetileg tervezett kizárólagosan fűtési igény kielégítésére való felhasználása. Egyrészt azért, mert a gőzturbina kondenzátorából távozó csapadék hőmérséklete 20-30 K-nel alacsonyabb mint a távfűtő rendszerből visszatérő primer fűtővíz hőmérséklete és így a termásvíz entalpiája nagyobb mértékben lenne kihasználva. Másrészt azért, mert a földhőnek (hasonlóan mint a földgáznak) a kapcsolt energiatermelésre való felhasználása minőségileg is magasabb színvonalat képvisel.

#### 2.1. tézis (3.4. alfejezet, [46])

A fűtési rendszerek termodinamikai minőségét célszerű a tüzelőanyag kihasználásának mértékével jellemezni a *fajlagos fűtőhatás* értéke alapján. Reverzibilis fűtőrendszer (lényegében az ideális hőszivattyú alkalmazásán alapul) esetében csak annyi tüzelőanyag használandó fel, amennyi a fűtőteljesítmény exergiaáramának létrehozásához szükséges, tehát  $\varphi = 1$  exergiahatásfoknál. Az anergiaáramot a rendszer

teljes mértékben a környezetből meríti. A fajlagos fűtőhatás gyakorlatban elérhetetlen határértéke ennek megfelelően a földgáz alapú fűtési rendszereknél a környezeti hőmérséklet  $t = <-15; +15>$  °C intervallumban való változásakor a  $\xi_{rev} = 8,71 \div 60,94$  határok között változik.

A fajlagos fűtőhatás értéke alapján a valóságos fűtési rendszereket célszerű három csoportba osztani:

- a hagyományos fűtési rendszerek esetében, ahol azonos a hatásfokkal  $\xi \leq 1$ ,
- a kapcsoltan termelt hő felhasználásán alapuló rendszereknél  $\xi \geq 1$ , de a termodinamika törvényei alapján a konkrét értéket nem lehet egyértelműen meghatározni,
- a hőszivattyú alkalmazásán alapuló fűtési rendszerek esetében szintén érvényes, hogy  $\xi \geq 1$ , de ellentétben az előbbivel, ez az érték egyértelműen meghatározható és a rendszer működéséhez fordított termodinamikai körfolyamat megvalósítása szükséges.

## 2.2. tézis (3.4. alfejezet, [46])

A gyakorlatban legelterjedtebb hagyományos fűtési rendszerek esetében az alacsony fajlagos fűtőhatás a rendkívül gyenge exergiahatásfok eredménye. Ez földgáz esetében a környezeti hőmérséklet  $t = <-15; +15>$  °C intervallumban való változásakor a  $\varphi = 0,016 \div 0,115$  határok között mozog és az évi átlagos értéke csak kb. 0,05. Ha ezt összehasonlítjuk pl. egy gáz/gőzerőmű hatásfokával, ami elvileg azonos, mert megegyezik az exergiahatásfokkal és megközelítheti a 0,6-ot, nyilvánvalóvá válik, hogy **a földgáznak a legelterjedtebb hagyományos fűtési rendszerekben való felhasználása „termodinamikai barbárság”**. Ez a tény a termodinamika második alaptörvényének következménye. A gázkazánok gyártói akkor sem tudnának rajta változtatni, ha az energiaveszteségeket teljesen kiküszöbölnék, tehát a termodinamika első alaptörvénye értelmében ideális termékekkel látnák el a piacot. A tüzelőanyag tökéletes mennyiségi kihasználása sem tudja ellensúlyozni a minőség nagyon csekély kihasználását.

## 2.3. tézis (3.4. alfejezet)

A hagyományos fűtési rendszerek kiváltása hőszivattyú alkalmazásán alapuló nem hagyományos rendszerrel az energiahatékonyság és környezetkímélés szempontjából kétségtelenül előnyös. A kapcsoltan termelt hő felhasználásán alapuló rendszerekkel viszont csak kedvező esetekben versenget. Ez a dilemma a gyakorlatban elég ritka, mert a hőszivattyú inkább a decentralizált, míg a kapcsolt energiatermelés inkább a centralizált hőellátásnál van alkalmazva.

A hőszivattyú és a kapcsolt energiatermelés kombinált alkalmazást sok szakember fölöslegesnek tartja. Ez kétségtelenül érvényes, ha a hőszivattyúra eső fűtőteljesítmény kapcsoltan hatékonyan kitermelhető, és ezért a hőszivattyúra fordítandó beruházási költségeket el lehet kerülni. Ez az állítás viszont nem általánosítható. Ezt bizonyítja, hogy a kapcsolt energiatermelés hőszivattyúval kombinálva sok esetben nagyon hatékonyan működik. Jó példa erre a Malmöi fűtőerőmű.

A disszertáció keretében kidolgozott szoftvermodul a jövőben többek annak eldöntését segíti majd elő, hogy a Kassai Katlan földhőpotenciálja kihasználásának egy nagyteljesítményű hőszivattyú által való fokozását a városi fűtőerőmű tervezett hibrid gáz/gőz fűtőerőmű rendszerstruktúrájába integrálva, vagy

attól teljesen függetlenül lenne-e előnyösebb megvalósítani. Továbbá a hőszivattyú tervezésével összefüggő alapvető problémák megoldásához is megfelelő eszköz lehet.

A nagyteljesítményű hőszivattyú alkalmazásával összefüggő feladatok megoldására irányuló önálló munkám eredményei alapján a következő tézisek megfogalmazását tartom helyénvalónak:

### **3. tézis** (5.1. alfejezet)

A hőszivattyú alrendszerekre illetve parciális hőszivattyúkra való lebontása lehetőségeinek vizsgálatából következik, hogy aszimmetrikus parciális hőszivattyúk alkalmazásánál lehetőségével nem érdemes foglalkozni annak ellenére, hogy ez esetünkben logikusnak tűnik, mivel a kondenzátorban a fűtővíz hőmérséklet-különbsége hozzávetőlegesen csak fele a szekunder földhőhordozó hőmérséklet-különbségének az elpárologtatóban. Az energiahatékonyság szempontjából egy aszimmetrikus parciális hőszivattyú helyett célszerűbb két szimmetrikusat alkalmazni. Mivel két kisebb teljesítményű kondenzátor esetében nagyobb a valószínűsége, hogy sorozatban gyártott berendezéseket lehet használni, a beruházási költségek is alacsonyabbak lehetnek. Ezenkívül a valamivel magasabb energiahatékonyság eredményeképpen az üzemeltetési költségek is alacsonyabbak lennének.

#### **3.1. tézis** (6.4. alfejezet, [1])

A [16] irodalmi forrásban bevezetett exergiahatásfokon kívül hőszivattyú-változatok exergiahatékonyságának összehasonlítása érdekében célszerű egy további exergiahatékonysági mutató, a fajlagos exergiavesztés bevezetése, amit az eredő exergiavesztésnek a fűtőtéljesítmény exergijára vonatkoztatott értékeként javaslok meghatározni:

$$\alpha = \frac{\dot{I}}{\dot{E}^{Q_H}}$$

A hőszivattyú fajlagos exergiavesztésére hatékony megoldás (kettő vagy több fokozat, magas kompressziós hatások) esetén érvényes  $\alpha < 1$ , míg kevésbé hatékony megoldás esetén  $\alpha > 1$ .

#### **3.2. tézis** (6.5. alfejezet, [1], [36])

Az exergiavesztések a hőszivattyú fokozatainak ill. a parciális hőszivattyúk számának növelésével csökkennek, de ennek mértéke három fölött már gyakorlatilag elhanyagolható. Ellenben az állandó költségek (karbantartás, szerviz) a fokozatszámmal növekednek. Ezért a háromfokozatú elrendezés energiahatékonysági és egyben gazdaságossági optimum lehet. Ezt a feltevést szoftver segítségével elvégzett szimulációk eredményei alapján lehet majd igazolni, esetleg megcáfolni.

#### **3.3. tézis** (6.5. alfejezet)

Nagyteljesítményű, turbókompresszorral működő hőszivattyúban a kompresszió magas hatásokkal valósul meg. Ennek következtében ilyen rendszerben a fojtószelep alrendszerek relatív exergiavesztése a legnagyobb. Ellenben egy spirál vagy dugattyús kompresszorral működő kisteljesítményű hőszivattyúban a

kompresszió hatásfoka érezhetően kisebb, és ennek köszönhetően a kompresszor alrendszerek relatív exergiavesztése a domináns, annak ellenére hogy a fojtás teljes mértékben disszipatív folyamat.

#### 4. tézis (8.3. alfejezet)

A munkaközeg állapotától függően az egyes állapotjellemzők kifejezéséhez a [19] és saját megfontolásom alapján a következő egyenleteket alkalmaztam:

1. Telítettségi nyomás a hőmérséklet függvényében

$$p = K_1 + K_2 \cdot t + K_3 \cdot t^2 + K_4 \cdot t^3 + K_5 \cdot t^4$$

2. Telített folyadék fajlagos entalpiája a hőmérséklet függvényében

$$h = K_6 + K_7 \cdot t + K_8 \cdot t^2 + K_9 \cdot t^3$$

3. Telített gőz fajlagos entalpiája a hőmérséklet függvényében

$$h = K_{10} + K_{11} \cdot t + K_{12} \cdot t^2 + K_{13} \cdot t^3 + K_{14} \cdot t^4 + K_{15} \cdot t^5 + K_{16} \cdot t^6$$

4. Telített folyadék fajlagos entrópiája a hőmérséklet függvényében

$$s = K_{17} + K_{18} \cdot t + K_{19} \cdot t^2 + K_{20} \cdot t^3$$

5. Telített gőz fajlagos entrópiája a hőmérséklet függvényében

$$s = K_{21} + K_{22} \cdot t + K_{23} \cdot t^2 + K_{24} \cdot t^3 + K_{25} \cdot t^4 + K_{26} \cdot t^5 + K_{27} \cdot t^6$$

6. Telítettségi hőmérséklet a nyomás függvényében

$$t = K_{28} + K_{29} \cdot p + K_{30} \cdot p^{\frac{1}{2}} + K_{31} \cdot p^{\frac{1}{3}} + K_{32} \cdot p^{\frac{1}{4}}$$

7. Túlhevített gőz fajlagos entalpiája a hőmérséklet és nyomás függvényében

$$h = K_{33} \cdot p + K_{34} \cdot p^2 + K_{35} \cdot T + K_{36} \cdot T^2 + K_{37} \cdot p \cdot T + K_{38}$$

8. Túlhevített gőz fajlagos entrópiája a hőmérséklet és nyomás függvényében

$$s = K_{39} \cdot p + K_{40} \cdot p^2 + K_{41} \cdot T + K_{42} \cdot T^2 + K_{43} \cdot p \cdot T + K_{44}$$

9. Túlhevített gőz hőmérséklete a nyomás és fajlagos entalpia függvényében

$$t = K_{45} \cdot \ln p + K_{46} \cdot (\ln p)^2 + K_{47} \cdot h + K_{48} \cdot h^2 + K_{49} \cdot \ln p \cdot h + K_{50}$$

10. Túlhevített gőz fajlagos entalpiája a nyomás és fajlagos entrópia függvényében

$$h = K_{51} \cdot \ln p + K_{52} \cdot (\ln p)^2 + K_{53} \cdot s + K_{54} \cdot s^2 + K_{55} \cdot \ln p \cdot s + K_{56}$$

11. Telített folyadék sűrűsége a hőmérséklet függvényében

$$\rho = K_{57} + K_{58} \cdot t + K_{59} \cdot t^2 + K_{60} \cdot t^3 + K_{61} \cdot t^4$$

12. Telített gőz sűrűsége a hőmérséklet függvényében

$$\rho = K_{62} + K_{63} \cdot t + K_{64} \cdot t^2 + K_{65} \cdot t^3 + K_{66} \cdot t^4 + K_{67} \cdot t^5 + K_{68} \cdot t^6$$

13. Túlhevített gőz sűrűsége a nyomás és hőmérséklet függvényében

$$\rho = K_{69} \cdot p + K_{70} \cdot p^2 + K_{71} \cdot T^{-1} + K_{72} \cdot T^{-2} + K_{73} \cdot p \cdot T^{-1} + K_{74} \cdot p^2 \cdot T^{-1} + K_{75}$$

A 3., 5. és 12. egyenletben a [19] forrással ellentétben a polinomos kifejezést tartom megfelelőnek. Ha a használt egyenletekbe a nyomást kPa-ban és a hőmérsékletet °C-ban helyettesítjük be, a fajlagos entalpiát kJ/kg-ban, a fajlagos entrópiát pedig kJ/(kg.K)-ban kapjuk meg. Kivételt képeznek a túlhevített gőz paramétereinek számítására szolgáló egyenletek, melyekben a hőmérsékletet K-ban kell behelyettesíteni. A [19] forrásban az 1.-13. egyenletekbe helyettesítendő együtthatók csupán a R134a munkaközegre lettek levezetve. Mi több, elsősorban a túlhevített gőz állapotjellemzőit leíró egyenletek felhasználhatósága nagy mértékben korlátozott. Ezért a számításba jövő üzemeltetési feltételek mellett (R134a, R290, R1270 és Fluid H munkaközeg esetében 10-80 °C telítettségi hőmérséklet, R245fa és R600a munkaközegek esetében 10-95 °C telítettségi hőmérséklet, 1-45 K túlhevítés) alkalmazható munkaközegekre regresszió segítségével meghatároztam az egyes együtthatókat. Ezen együtthatók értékei a doktori értekezés 72.-73. oldalán található (referencia – állapot : 0 °C-nál a telített folyadék fajlagos entalpiája 200 kJ/kg, fajlagos entrópiája pedig 1 kJ/(kg.K).

A túlhevített gőz fajlagos entrópiáját a nyomás és hőmérséklet ismeretében a 8. egyenlet segítségével ugyan kedvező relatív hibával lehet kiszámítani, az abszolút hiba azonban általában elfogadhatatlan. Mivel a fajlagos entalpia a fajlagos entrópia és nyomás ismeretében a 10. egyenlet alapján rendkívül pontosan meghatározható, a fajlagos entrópia értékét iterációval kedvezőbb pontossággal kapjuk meg.

## **5. tézis** (8.4. alfejezet)

Pentafluoropropán vagy izobután munkaközeg nagyteljesítményű hűszivattyúban való alkalmazása esetén a turbókompresszor általi beszívást megelőzően elengedhetetlen a minimális túlhevítés biztosítása. Ellenkező esetben a kompresszió nedves gőz tartományában játszódhat le, ami a gőzturbináknál tapasztalható, élettartamot csökkentő erózióhoz vezethet. A szükséges túlhevítés biztosításának érdekében a hűszivattyú körfolyamatába iktatott ún. belső hőcserélő (Internal Heat Exchanger) alkalmazása viszonylag egyszerű és ami nagyon fontos, a feltételezett munkaközegek esetén a teljesítmény tényezőt nem csökkentő intézkedés. A belső hőcserélőben a kondenzátorból kilépő telített folyadék állapotában vagy a túlhűtőből kilépő túlhűtött folyadék állapotában lévő munkaközeg és az elpárologtatóból kilépő telített gőz állapotában lévő munkaközeg közötti hőcserének köszönhetően a gőz elegendő mértékben túlhevíthető. A szükséges túlhevítés nő a kompresszió irreverzibilis hatásfokával. A MAMUHEP szoftvermodulba egy olyan algoritmust építettem be, amely a kompresszió irreverzibilis hatásfoka ismeretében lehetővé teszi a minimális túlhevítés meghatározását.

## **6. tézis** (11. fejezet)

A szoftvermodul próbafuttatásának eredményeiből következik, hogy amennyiben a szekunder földhőhordozó és a fűtővíz hőmérséklete a hűszivattyú bemenetén lineárisan csökken a környezeti hőmérséklettel, és a kompresszió irreverzibilis hatásfoka az egyes fokozatokban változik a beszívott munkaközeg-térfogatáram függvényében, a hűszivattyú teljesítmény tényezőjének egy bizonyos környezeti hőmérsékletnél helyi maximuma lehet. E környezeti hőmérséklet értéke nagy mértékben függ:

- az egyes fokozatok kompresszió irreverzibilis hatások - beszívott munkaközeg-térfogatáram függvényétől,
- attól, hogy az egyes fokozatok elpárologtatási és kondenzációs hőmérséklete hogyan változik a környezeti hőmérséklet függvényében.

#### 4. Az eredmények hasznosíthatósága

A munka konkrét eredménye a MAMUHEP szoftvermodul, melynek alapja a hőszivattyú környezeti hőmérséklettől függő állandósult üzemállapotainak vizsgálatára szolgáló matematikai modell. Ez egy konkrét projekt előkészületi fázisában előforduló problémák megoldásával megkönnyítheti a döntéshozatalt. Meghatározott műszaki megoldású hőszivattyú esetében lehetővé teszi annak energiahatékonysági és gazdaságossági vizsgálatát különböző feltételek mellett. Ezenfelül alapul szolgálhat egy komplex szoftvercsomag kidolgozásához, amely a kassai földhőhasznosítási elképzelések esetében az ilyen vizsgálatokat kiterjeszteni a kapcsolt energiatermelésű hibrid kombinált gáz/gőzerőmű teljes rendszerére. Annak keretében természetesen a MAMUHEP egyes konkrét részletei megfelelő módon korrigálhatóak.

A szoftvermodul kidolgozását ugyan a Kassai Katlan földhőpotenciálja hasznosításával összefüggő problémák ihlették, de ezen felül általában a nagyteljesítményű hőszivattyúk tervezésénél és üzemeltetésénél felmerülő feladatok megoldásához hatékony támogatást nyújthat.

#### 5. Irodalomjegyzék

- [1] *Böszörményi, G.*: Nagyteljesítményű hőszivattyú exergiaanalízise, Proceedings of International Conference *Climate Change-Energy Awareness-Energy Efficiency*, Visegrád, 2005.
- [2] *Böszörményi, L.*: Úvahy o využívaní hydrogeotermálneho potenciálu Košickej kotliny pri kombinovanej výrobe tepla a elektriny. Časopis EE, 5, 1999, č. 6
- [3] *Böszörményi, L.*: Optimierte Geothermienutzung bei der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung in einer GuD-Anlage. International Conference World Sustainable Energy Day 2000, Wels/Austria, 2000.
- [4] *Böszörményi, L.*: Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit geothermischer Unterstützung. VDI-Berichte 1594, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2001.
- [5] *Böszörményi, L.*: Vývoj predstáv o košickom geotermálnom projekte, Vydavateľstvo Štrotffek, Košice, 2001.
- [6] *Böszörményi, L.; Böszörményi, G.*: The perspectives of geothermal energy utilization in district heating system of Košice city, Proceedings of World Renewable Energy Congress VII, Köln.
- [7] *Böszörményi, L.; Böszörményi, G.*: Hybrid energy technologies for an efficient geothermal heat utilization, Proceedings of *European Geothermal Conference 2003*, Szeged,

- [8] *Böszörményi, L.; Böszörményi, G.:* Hybrid Technologies of Power Production with efficient Use of Geothermal Energy and Biomass. VDI-Berichte 1746, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [9] *Bruhn, M.; Huenges, E.; Zöllner, G.:* Hybride Dampfkraftwerke zur Stromerzeugung aregenerativen Energien. VDI-Berichte 1457, VDI Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [10] *Bruhn, M.:* Solar unterstützte Dampfkraftprozesse zur Wärme- und Stromerzeugung. Fortschritt Berichte. VDI Reihe 6 Nr 411. VDI Verlag GmbH Düsseldorf, 1999.
- [11] *Büki, G.:* Energetika, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997
- [12] *Büki, G.:* Energiaátalakítás, gáz- és gőzerőművek, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2000
- [13] DANCEE, Geothermal Energy for Kosice District Heating, Business Plan, Danish Ministry of the Environment – Danish Environmental Protection Agency, 2002.
- [14] Geotermálna energia pre centrálné zásobovanie teplom v meste Košice, GEOTERM Košice, Košice,1999.
- [15] *Geyer, M.; Holländer, A.:* Gesicherte Leistung mit Solarenergie? Integration von Solarthermie in GuD-Kraftwerke. Tagungsbericht: Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, Selbstverlag Kassel 1998.
- [16] *Kotas, T. J.:* The Exergy Method of Thermal Plant Analysis, Krieger Publishing Co, 1995.
- [17] *Mečárík, K.; Havelský, V. Fűr, B.:* Tepelné čerpadlá. ALFA/SNTL, Bratislava, 1988.
- [18] Riešenie náhrady zastaralých zdrojov tepla v TEKO Košice. Výskumný ústav energetický EGÚ Bratislava, Bratislava, 1996.
- [19] Simplified equations of the refrigerants by DuPont.
- [20] *Tuschy, I.:* Thermische Hybridkraftwerke zur Krafterzeugung aus Niedertemperaturwärme. Fortschritt- Berichte VDI, Reihe 6, Nr. 465, VDI Verlag GmbH Düsseldorf, 2001.
- [21] *Tuschy, I.; Dittmann, A.; Franke, U.:* Multibrennstoffkonzepte zur Nutzung von Biomassen und Reststoffen zur Krafterzeugung. VDI-Berichte 1495, VDI Verlag Düsseldorf, 1999.
- [22] *Tuschy, I.; Franke, U.:* Thermische Hybridkraftwerke BWK Bd. 54 (2002) Nr. 7/8.

## 6. A témakörből készített további publikációk

- [23] *Böszörményi,L.; Böszörményi,G.:* Základné aspekty voľby technológie čerpania tepla pre racionálne využívanie hydrogeotermálneho potenciálu Košickej kotliny, Acta Mechanica Slovaca 3/2000, Košice, p. 349-352, 2000.
- [24] *Böszörményi,G.; Böszörményi,L.:* Some problems of the integration of heat pump technology into a system of combined heat and electricity production, Acta Polytechnica 2/2001, Praha, p. 42-45, 2001.
- [25] *Böszörményi,L.; Böszörményi,G.:* A Geothermal Energy Supported Gas-steam Cogeneration Unit as a Possible Replacement for the Old Part of a Municipal CHP Plant (TEKO), Acta Polytechnica 6/2001, Praha, p. 14-17, 2001.

- [26] Böszörményi, L.; Böszörményi, G.: Prospects for Geothermal Energy Conversion through a Hybrid Combined Cycle Power Plant, *Acta Polytechnica* 1/2003, Praha, p. 37-42, 2003.
- [27] Böszörményi, L.; Böszörményi, G.: Combined cycle power plant with extraction and use of geothermal energy, *Proceedings of international conference Climate change-Energy awareness-Energy efficiency*, Hungary, p. 1-8, 2003.
- [28] Böszörményi, G.; Böszörményi, L.: Some aspects of optimization of a unique heat pump, *Proceedings of international conference Climate change-Energy awareness-Energy efficiency*, Hungary, p. 163-168, 2003.
- [29] Böszörményi, L.; Böszörményi, G.: Porovnávací analýza technológie čerpania tepla pri novej koncepcii využívania geotermálnej energie, *Zborník prednášok z odborného seminára s medzinárodnou účasťou CASSOVIA THERM 2001 – "Environmentálne, ekonomické a sociálne aspekty centralizovaného zásobovania teplom 2001"*, Košice, p. 110-115, 2001.
- [30] Böszörményi, L.; Böszörményi, G.: Zásobovanie Košíc geotermálnou energiou, *Energia* 3/2001, Bratislava, p. 24-27, 2001.
- [31] Böszörményi, G.; Böszörményi, L.: Some problems of planning of heat pump technology for a special conception of geothermal energy utilization, *Proceedings of international conference Energy efficiency, energy markets and environmental protection in the new millennium*, Hungary, p. 17-13, 2001.
- [32] Böszörményi, L.; Böszörményi, G.: Technologie čerpání tepla pro využívání geotermální energie v košické SCZT, *Větrání, vytápění a instalace* 2001/4, Praha, p. 186-188, 2001.
- [33] Böszörményi, L.; Böszörményi, G.: Hybrid Technologies of Power Production with Efficient Use of Geothermal Energy and Biomass, *Proceedings of international conference Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung 2003*, Germany, p. 575-585, 2003.
- [34] Böszörményi, L.; Böszörményi, G.: Príspevok k problematike optimalizácie tepelného čerpadla pre špeciálny prípad aplikácie, *TZB* 2003/4, Bratislava, p. 15-18, 2003.
- [35] Böszörményi, L.; Böszörményi, G.: Geotermikus hő hasznosítása kapcsolt energiatermeléssel hibrid gáz-gőzerőműben, *Magyar Energetika* 2003/3, Budapest, p. 12-16, 2003.
- [36] Böszörményi, G.: Analysis of a unique heat pump applying the exergy method, *Proceedings of international conference Central European Energy, Efficiency and Renewable Sources*, Praha, 4 pages, 2003.
- [37] Böszörményi, L.; Böszörményi, G.: Hybridný paroplynový zdroj s geotermálnou podporou, ako lákavá perspektíva pre SCZT mesta Košice, I. časť, Košice, 2003.
- [38] Böszörményi, L.; Böszörményi, G.: Perspektívy konverzie geotermálnej energie prostredníctvom hybridného geotermálneho zdroja v podmienkach Košickej kotliny. *ENERGETIKA*, 10/2003, str. 345-348.
- [39] Böszörményi, G.; Guzek, K.; Kraucher, M.: Nový způsob klimatizování komerčních budov tepelnými čerpadly, *Klimatizace* 2004/2, Praha, p. 13-20, 2004.

- [40] *Böszörményi, L.; Böszörményi, G.*: Innovative technology of geothermal energy use for combined heat and power production in Košice city, Proceedings of international conference European Conference on Renewable Energies and Cooperation Exchange, Vienna, 2004.
- [41] *Böszörményi, G.*: Komfort systém – sofistikovaný systém klimatizování ve 21. století, Klimatizace, Praha, 2005.
- [42] *Böszörményi, L.; Böszörményi, G.*: Földgáz és földhő felhasználása kombinált hőszolgáltató erőműben, Proceedings of International Conference *Climate Change-Energy Awareness-Energy Efficiency*, Visegrád, Hungary, 2005.
- [43] *Böszörményi, L.; Böszörményi, G.*: Perspektívy súčasnej konverzie zemného plynu a geotermálnej energie na elektrinu, teplo a chlad, Proceedings of the conference Obnovitelné zdroje energie pro venkov i teplárenství – Renewable energy sources for countryside and heating, Hradec Králové, 2005.
- [44] *Böszörményi, L.; Böszörményi, G.*: Perspektívy súčasnej konverzie zemného plynu a geotermálnej energie na elektrinu, teplo a chlad I, II, [www.tzb-info.cz](http://www.tzb-info.cz), Praha, 2005.
- [45] *Böszörményi, L.; Böszörményi, G.*: A földgáz és földhő kapcsolt felhasználása hőszolgáltató hibrid gáz/gőzerőműben, Energiagazdálkodás, Budapest, 2005/6.
- [46] *Böszörményi, G.*: Alternatív hűtőközegek a klíma-, fűtés- és hűtéstechnikában, Energiagazdálkodás, Budapest, 2006/3.
- [47] *Böszörményi, G.; Böszörményi, L.*: A fűtési igényt kielégítő hőellátás fenntarthatóságának lehetőségei és korlátai, Magyar Instalateur, Budapest, 2006.

## 7. Kutatási jelentés

[48], [49], [50], [51], [52]

2006 és 2007 között az Ingersoll Rand Climate Control Technologies prágai kutatóközpontjában belső publikációként megjelent három kutatási jelentés főszerzője és további két kutatási jelentés társszerzője. A jelentésekkel kapcsolatos részletes információk üzleti titok tárgyát képezik.

## 8. Hivatkozások

- [53] *Kontra, J.*: A geotermális energia és az exergia-szemlélet. Magyar Épületgépészet, LIV. évfolyam, 2005/12. szám. 9-11. oldal

Idézett munkák:

1. *Böszörményi, G.*: Nagyteljesítményű hőszivattyú exergiaanalízise. Klímaváltozás – Energiatudatosság – Energiatakarékosság, IV. nemzetközi konferencia, Visegrád, 2005.
2. *Böszörményi, L., Böszörményi, G.*: Prospects for Geothermal Energy Conversion Through a Hybrid Combined Cycle Power Plant, Acta Polytechnica, Praha, 2003.

- [54] *Kontra, J.*: A városi távfűtés korszerűsítése kapcsolt energiatermeléssel. Műszaki Szemle, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 28/2004 szám, 17-21 oldal

Idézett munka:

*Böszörményi, L., Böszörményi, G.*: Egy speciális hőszivattyú legkisebb költség elve szerinti tervezésének szempontjai. Klímaváltozás – Energiatudatosság – Energiatakarékosság, IV. nemzetközi konferencia, Visegrád, 2005.

- [55] *Büki, G.*: Erőművek. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2004, 500. oldal

Idézett munka:

*Böszörményi, L., Böszörményi, G.*: Geotermikus hő hasznosítása kapcsolt energiatermeléssel hibrid gáz/gőzerőműben, Magyar Energetika, 2003/3. szám.

- [56] Bulletin of the International Institute of Refrigeration, Volume LXXXII N° 2002-6

Idézett munka (a kiadó által cseh eredetiből angolra fordított absztrakt):

*Böszörményi, L., Böszörményi, G.*: Technologie čerpaní tepla pro intenzifikaci využívání geotermální energie v košické SCZT. Časopis VVI 2001/5. szám

## 9. Jelölések

$\dot{m}$	kg/h	tömegáram
$\dot{Q}$	W	hőáram, hőveszteség, fűtő- vagy hűtőtéljesítmény
$H_u$	J/kg	tüzelőanyag fűtőértéke
$\xi$	-	fajlagos fűtőhatás
$\varphi$	-	fűtőrendszer exergiahatásfoka
$t$	°C	hőmérséklet
$T$	K	termodinamikai hőmérséklet
$\bar{T}$	K	termodinamikai középhőmérséklet
$h$	J/kg	fajlagos entalpia
$s$	J/(kg.K)	fajlagos entrópia
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	sűrűség
$p$	Pa	nyomás
$\dot{E}^Q$	W	hőáram-exergia
$\dot{I}$	W	exergiveszteség
$\alpha$	-	fajlagos exergiveszteség
$c_p$	J/(kg.K)	fajlagos hőkapacitás állandó nyomásnál