

I. Századvég-MET energetikai tanulmányíró verseny

Választott témakör

- A megújuló energiaforrásokat felhasználó villamosenergia termelő egységek hozambizonytalanságához kapcsolódó hálózati megoldások
- Fejlesztési lehetőségek Magyarország energetikai hulladékhasznosításában
- Nukleáris fejlesztések hatásai és kockázatai
- Az Európai Unió és Magyarország gázpiacát érintő kihívások és arra adható megoldások
- Az energiaszektor és az ipar fejlesztésének kölcsönhatásai

Galyas Anna Bella

Köteles Tünde

2016. január 05.

Gázátadó állomásokon beépített nyomásssabályozók turbó-expanderrel történő kiváltásának vizsgálata

Készítette:

Galyas Anna Bella
Köteles Tünde
Miskolci Egyetem
Műszaki Földtudományi Kar
Ph.D. hallgató

Egyetemi konzulens:

Prof. Dr. Tihanyi László
egyetemi tanár

Miskolc, 2016. január 05.

Rezümé

Napjainkban egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a rendelkezésre álló energia teljesebb kihasználására. A nagynyomású gázszállító rendszerek üzemeltetésénél már régóta ismert egy sajátos kettősség. Egyrészt a szállítórendszer energiaigénye, illetve a nyomásveszteség annál kisebb, minél nagyobb nyomáson történik a szállítás. Másrészt a rendszer elvételi pontjaiban – a gázátadó állomásokon – minél nagyobb nyomásról kell a gázt leszabályozni a nagyközép nyomású elosztói rendszerbe történő betápláláshoz, annál nagyobb lesz az energiaveszteség. Ráadásul a szabályozás előtt a földgázt a legtöbb esetben melegíteni is kell annak érdekében, hogy a csatlakozó rendszerbe meghatározott hőmérsékletnél kisebb hőmérséklet (általában 0 °C) ne alakulhasson ki. A szakemberek már régóta keresik a technikai lehetőségét annak, hogy a gázszállító távvezeték rendszer nagyszámú gázátadó állomásán elvesző energiát hogyan lehetne hasznosítani. A szerzők az előzőek szerinti műszaki feladat újragondolását és alapos vizsgálatát tűzték ki célul.

A szerzők, pályázatukban, szakirodalmi összefoglaló keretében mutatják be a választott témakörrel kapcsolatos nemzetközi alkalmazási példákat. Ennek keretében rámutatnak, hogy más országokban milyen megoldásokat valósítottak már meg, illetve milyen feltételek mellett lehet gazdaságos egy ilyen technológia alkalmazása.

A pályázat második felében modell-számítások segítségével – különböző feltételezett nyomás-, hőmérséklet- és gázáram értékek esetén vizsgálják egy turbóexpanderes gázátadó állomás energiamérlegét annak érdekében, hogy az esetleges alkalmazási tartományt ki tudják jelölni.

Végül a modellszámításokra épülő elemzésük alapján megadják, hogy az energetikai elemzés alapján mely tartományban javasolható a meglévő gázátadó állomások technológiai rendszerét kiegészíteni egy turbóexpanderes blokkal.

Tartalomjegyzék

Ábrajegyzék

Táblázatjegyzék

1. Bevezetés	1
2. A hazai földgázellátó rendszer infrastruktúrája.....	2
3. Nyomásszabályozó állomás	5
3.1. A gázátadó állomás bemutatása	5
3.2. A gázátadó állomás kapcsolási modellje.....	6
4. A turbó-expander elhelyezése gázátadó állomáson	9
4.1. A gépegység bemutatása	9
4.1.1. A turbó-expander működési mechanizmusa.....	9
4.2. Turbó-expander alkalmazása a gyakorlatban	11
5. A szimulációs vizsgálatok	13
5.1. A vizsgálat során felhasznált modellek bemutatása	13
5.2. Egy turbó-expander és egy nyomásszabályozó egység összehasonlító vizsgálat.....	17
5.2.1. Nagy kapacitású, nagy érkező nyomású gázátadó állomás vizsgálata	17
5.2.2. Közepes kapacitású gázátadó állomás vizsgálata	21
5.2.3. Kis teljesítményű, kis érkező nyomású gázátadó állomás vizsgálata	23
5.3. Az egy- és két turbó-expander gépegységgel megvalósuló nyomásszabályozás összehasonlító vizsgálat.....	27
5.3.1. Nagy kapacitású, nagy érkező nyomású gázátadó állomás vizsgálata	28
5.3.2. Közepes kapacitású gázátadó állomás vizsgálata	30
5.3.3. Kis érkező nyomású, kis kapacitású gázátadó állomás vizsgálata	32
6. Összefoglalás.....	35
7. Irodalomjegyzék.....	37

Ábrajegyzék

1. ábra: A földgázellátó rendszer kapcsolódási sémája	2
2. ábra: hazai földgázszállító rendszer strukturális jellegzetessége	3
3. ábra: A gázátadó állomás elvi technológiai kialakítása.....	6
4. ábra: A gázátadó állomás sematikus felépítése.....	9
5. ábra: A nyomáscsökkentési folyamatok közötti különbség.....	10
6. ábra: A gázátadó állomáson elhelyezett gépegység.....	11
7. ábra: Egy turbó-expanderrel és egy nyomásszabályozó berendezéssel ellátott gázátadó állomás sémaképe	14
8. ábra: Két turbó-expanderrel és egy nyomásszabályozó gépegységgel ellátott gázátadó állomás sémaképe	15
9. ábra: Hőmérsékletváltozás a nyomásváltozás függvényében turbó-expanderrel és nyomásszabályozó szeleppel.....	25
10. ábra: Elméleti energiatermelés a nyomásarány és a hőmérséklet függvényében	26
11. ábra: Az egy- és két turbó-expanderrel megvalósuló energiatermelés	33

Táblázatjegyzék

1. táblázat: A gázátadó állomások csoportosítása.....	5
2. táblázat: A vizsgálat során alkalmazott mintaföldgáz összetétele	16
3. táblázat: Elméleti energiamérleg összehasonlítása 45 bar érkező nyomáson és emelkedő földgáz hőmérséklet mellett	18
4. táblázat: Elméleti energiamérleg összehasonlítása 50 bar érkező nyomáson és emelkedő földgáz hőmérséklet mellett	20
5. táblázat: Elméleti energiamérleg összehasonlítása 55 bar érkező nyomáson és emelkedő földgáz hőmérséklet mellett	21
6. táblázat: Közepes érkezőnyomású és közepes földgázkapacitású gázátadó állomás elméleti energiamérlege	22
7. táblázat: Kis érkezőnyomású és kis földgázkapacitású gázátadó állomás elméleti energiamérlege	24
8. táblázat: Az egy- és két turbó-expanderrel megvalósított nyomásszabályozás összehasonlítása nagy nyomású és nagy kapacitású gázátadó állomáson	29
9. táblázat: Az egy - és két turbóexpanderrel megvalósított nyomásszabályozás összehasonlítása közepes nyomású és közepes kapacitású gázátadó állomáson.....	31
10. táblázat: Az egy - és két turbóexpanderrel megvalósított nyomásszabályozás összehasonlítása kis nyomású és kis kapacitású gázátadó állomáson	32

1. Bevezetés

Ma az energiahatékonyság, az energiával való takarékoság nem csak helyi vagy országos szinten valósul meg, hanem globális jelenség. A jövő nemzedékeire váró egyik legnagyobb kihívás lehet a növekvő népesség energiafelhasználásának biztosítása az egyre csökkenő készletek mellett. Az előzőek miatt merült fel az a gondolat, hogy a gázátadó állomásokon elhelyezett nyomásszabályozó ágakat turbó-expanderes ágakkal egészítsék ki.

A gázátadó állomások egyik alapvető feladata, hogy az ott beépített nyomásszabályozók a nagynyomású szállítóvezetéken érkező, és nagyfogyasztók részére átadásra kerülő, vagy a gázelosztó rendszerbe történő betáplálás céljából a földgázáram nyomását a kívánt nyomásfokozatra/nyomásértékre redukálják. A folyamat során a cél elérése érdekében nagymértékű energiaveszteség jelentkezik. Ez az energiamennyiség nyomásszabályozó berendezések esetében hasznosítás nélkül elvész, turbó-expander és a hozzá kapcsolható villamos generátor alkalmazásával pedig felhasználhatóvá válik. Az így megtermelt villamos energia többek között felhasználható a gázátadó állomások energiaigényének a csökkentésére.

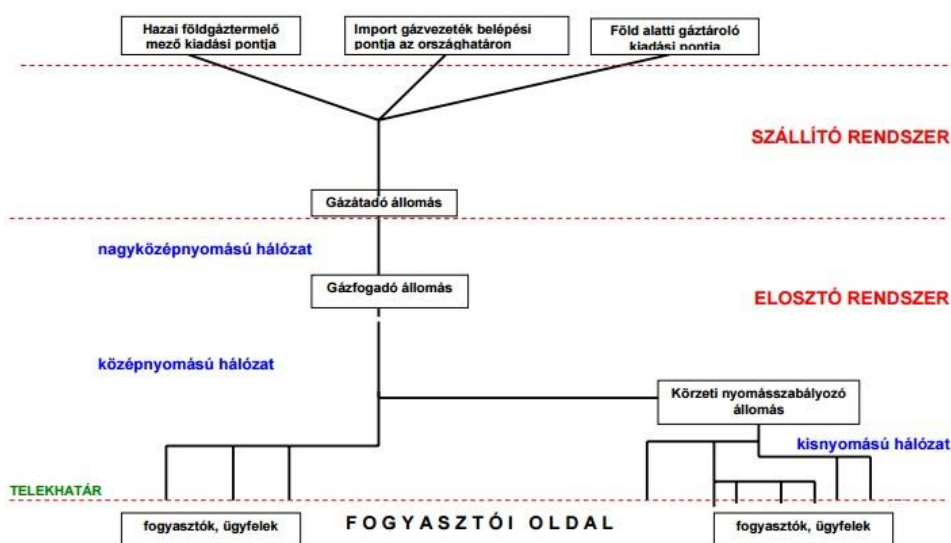
A tanulmány első részében a bemutatjuk a gázátadó állomások funkcionális felépítését, a fojtásos és a munkavégzéses expanzió közötti különbségeket. Az elméleti alapok áttekintése során figyelembe vesszük a gázátadó üzemeltetése során fennálló nyomás- és hőmérséklet korlátokat.

A fellelhető szakirodalmak segítségével nemzetközi kitekintést adunk a pályázat témájával kapcsolatos eddigi eredményekről, tervezett és megvalósított projektekről. A nemzetközi kitekintés során kiemelt figyelmet fordítottunk arra, hogy elsősorban a már megvalósított, és ne a bizonytalan, gazdaságilag nem megalapozható projektekre helyezzük a hangsúlyt.

A tanulmány második részében bemutatjuk azoknak az eredményeknek a feldolgozását és elemzését, amelyeket a hagyományos nyomásszabályozóval, illetve a turbó-expanderrel történő üzemviszonyokra kaptunk az olaj- és gáziparban széles körben alkalmazott HYSYS technológiai tervező szoftverrel felhasználásával kaptunk.

2. A hazai földgázellátó rendszer infrastruktúrája

A földgáz, mint energiahordozó Magyarország energiaellátásában igen jelentős szerepet tölt be. Hazánk energiaszükséglete 2013-ban 952 PJ volt, amelynek több mint egyharmadát, pontosan 33,9 %-át a földgáz elégítette ki. (Eurostat, 2014.) Ennek a tiszta energiának a végfelhasználóig történő eljuttatása az 1. ábrán látható földgázellátó-rendszeren valósul meg, amely a legnagyobb mértékben kiépített csővezeték hálózattal rendelkezik Magyarországon.

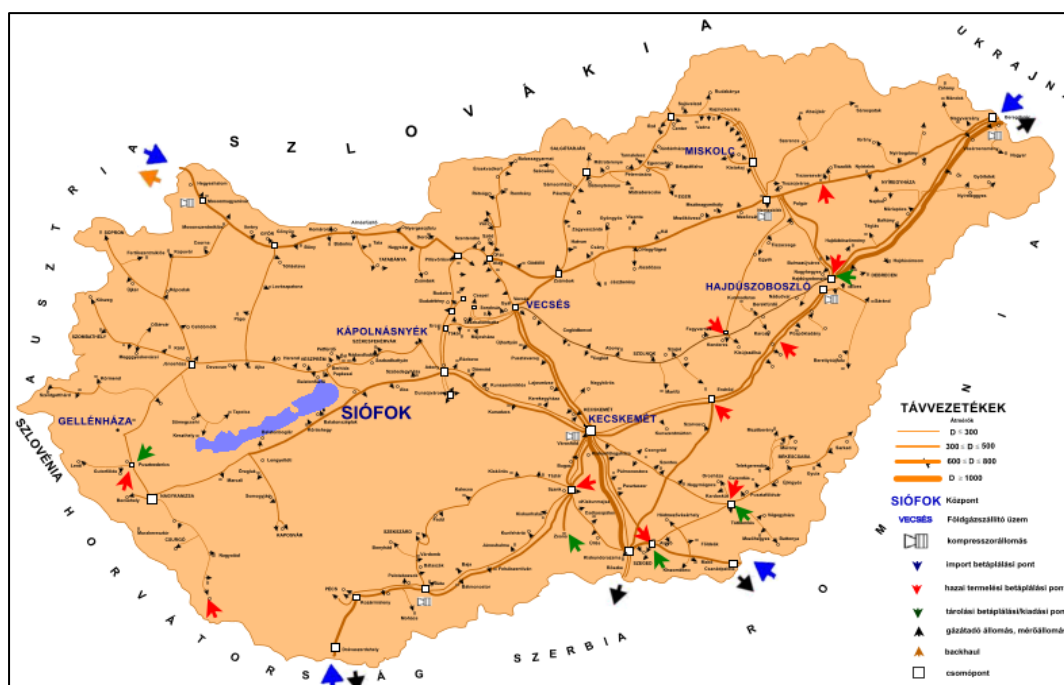


1. ábra: A földgázellátó rendszer kapcsolódási sémája
(Forrás: Csete J., 2010.)

A Földgázszállító Zrt. által üzemeltetett földgázszállító hálózat betáplálási "0" pontokból, kompresszorállomásokból, gázszállítási csomópontokból, mérőállomásokból, nagynyomású csőtávvezetésekből, valamint a regionális gázszolgáltató társaságok és ipari fogyasztók felé közvetlen kapcsolatot jelentő gázátadó állomásokból áll. A földgázszállító rendszer a csővezetékes energiaellátás központi eleme, amely elszállítja a termelő mezőkről, az importból vagy a földalatti gáztárolókból származó földgázt a fogyasztói körzetekbe, azaz a forrásokat köti össze a gázátadó állomással, felhasználási helyekkel. Ezen felül biztosítja az adott ország jogszabályaiban rögzített pontosságú mérés és elszámolás technikai feltételeit. A földgázszállító csővezeték rendszerek 25-100 bar nyomástartományban, általában földbe fektetve üzemelnek kontinensek között, a kontinenseken, vagy az

országhatárokon belül, és lehetővé teszik a földgáz biztonságos és gazdaságos szállítását. (Tihanyi-Zsuga, 2012.)

Magyarországon egy teljesen integrált földgázszállító rendszer működik, amelynek strukturális felépítése a 2. ábrán látható. Ezen a rendszeren keresztül történik a földgáz eljuttatása a betáplálási pontoktól a gázátadó állomásokra. A rendszer jellemző átmérője 100–1 400 mm, üzemnyomása 25-75 bar, átlagéletkora közel 30 év. A hazai földgázszállító rendszer jelenleg 22 db betáplálási ponttal rendelkezik, amelyből 3 határkeresztező import betáplálási pont, 5 földalatti gáztároló és 13 hazai termelésű gáz betáplálási pont.



2. ábra: A hazai földgázszállító rendszer strukturális jellegzetessége (2014)
(Szerző saját szerkesztése, forrás: FGSZ Zrt.)

A csővezetékes infrastruktúra részét képező kompresszorállomásokon gázturbina meghajtású centrifugál kompresszorok üzemelnek, amelyeknek a feladata, hogy a gáznyomás megnövelésével lehetővé tegyék nagyobb gázáramok szállítását a rendszer fő szállítási útvonalain, továbbá a rendszeregyensúlyozáshoz szükséges vezetékészlet biztosítása.

A nagy nyomású (25 bar felett) földgázszállító rendszer végpontja a gázátadó állomás, amelyhez csatlakozik a már kisebb üzemnyomással jellemezhető elosztói hálózat. Ezeken a határpontokon ellenőrzött módon, folyamatosan adják át a gázt a

csatlakozó rendszerüzemeltetőknek és a közvetlen ipari fogyasztóknak. Az elosztói rendszerüzemeltetőkhez kapcsolódó pontok száma: 356. Az elosztói rendszerüzemeltetők a 25 bar-nál kisebb nyomáson üzemelő gázelosztó hálózatokon keresztül juttatják el a földgázt közel 3,5 millió további fogyasztóhoz nagyközép- ($25 > p > 10$ bar), közép- ($10 > p > 0,1$ bar) és kisnyomású ($p < 0,1$ bar) tartományban üzemelő csővezeték hálózaton keresztül. Ez utóbbiak teljes hossza 83 222 km volt 2013. december 31-én. *(Tihanyi-Chován, 2015.)*

A szállító- és elosztórendszer csatlakozási pontjául szolgáló gázátadó állomáson történő, a földgáz fizikai paramétereire irányuló szabályozásnak ki kell elégítenie „A Magyar Földgázrendszer Üzemi és Kereskedelmi Szabályzatá”-ban (továbbiakban: ÜKSZ) megfogalmazottakat. A szabályzat a kiadási hőmérséklettel kapcsolatban úgy fogalmaz, hogy a kiadási ponton mért gázhőmérséklet nem lehet kevesebb, mint 0 °C. A névleges kiadási nyomásértékkel kapcsolatban 3 – 15 bar közötti tartományt határoz meg új kiadási pontok esetén, meglévő kiadási pontok esetében ezt a rendszer alkalmassági vizsgálatának megfelelően lehet módosítani. *(ÜKSZ, 2015.)* A gyakorlatban 6 bar kiadási nyomásra történik a szállított földgáz szabályozása az elosztói rendszerbe történő betápláláshoz. Ezek alapján a gázátadó állomások energetikai vizsgálatának alapkritériumaként a 0 °C kiadási hőmérséklet és 6 bar névleges kiadási nyomás lett meghatározva a gázátadó állomások végpontjában, csatlakozva a földgázelosztó rendszerhez.

3. Nyomákszabályozó állomás

Ebben a fejezetben a nyomákszabályozó állomás kapcsolási sémája, szerkezeti elemei, működése és feladata kerül bemutatásra.

3.1. A gázátadó állomás bemutatása

A gázátadó állomás a földgázszállító rendszer végponti része, valamely távvezeték vagy az abból leágazó vezeték végéhez kapcsolódó technológiai állomás, melyen a szállított gázt az átvevőnek meghatározott nyomáson mérve és szagosítva adják át. Jelenleg a hazai földgázszállító rendszeren közel 400 db gázátadó állomás található, amelyek fő feladatai: *(Tihanyi-Zsuga, 2012.)*

- szűrés,
- gázmelegítés,
- nyomákszabályozás,
- nyomásbiztosítás,
- gázmennyiség mérés,
- szagosítás.

A gázátadó állomások esetében a telepítés szerint meg lehet különböztetni a sík-, a szekrényes- és a konténerben vagy épületben elhelyezett állomást, amelynek módját többek között a jogszabályi környezet, a gazdaságosság, a technológiai fejlettség szintje határoz meg, míg kialakításának módját az adott létesítménnyel szemben elvárt követelmények határozzák meg, amelyek összefoglalása az 1. táblázatban látható.

1. táblázat: A gázátadó állomások csoportosítása
(Forrás: Tihanyi-Zsuga, 2012.)

Telepítés szerint	Kialakítás szerint
Sík állomás	Aktív-monitor szabályozás fő- és tartalékággal
Szekrényes állomás	Nyomákszabályozó-gyorszár-lefúvató
Épületben vagy konténerben elhelyezett állomás	Egyedi megoldású

miatt a biztonsági lefúvató csak kis gázmennyiségek lefúvatását biztosítja, a biztonsági gyorsár pedig legvégső eszköze a túlnyomás határolásnak. A korszerű technológiai rendszer miatt ezeknél az állomásoknál nem szükséges a primer oldalon a belépési pontra távműködtetésű motorikus főelzárót tenni.

A nyomásszabályozó után található a szagosító egység, előtte a szűrőegység. Az állomás kisnyomású oldalán van a mérőegység és a tartalék szagosító. Időszakos működésű az állomás bemeneti oldalán a gázmelegítő egység. A nyomásszabályozó ágak kiesése esetén a kerülő ágba épített kézi szabályozó szeleppel lehet szabályozni. A kimeneti oldal túlnyomás elleni védelmét a biztonsági lefúvató szelep szolgálja.

Az állomásra belépő gázmennyiség áthalad a biztonsági főelzárón. A gázmelegítők az állomás egyik részén a szűrők elé, másik részénél azok után kerülnek elhelyezésre. A párhuzamosan kialakított nyomásszabályozó ágakat kézi kerülő ág egészíti ki, amelyen rendkívüli esetben az állomás kapacitásának 50-70 %-a szabályozható. A nyomásszabályozó ágak szekunder oldali fejcsövéről általában több mérőág ágazik le. A szagosító egységet korábban a mérési pont elé, a későbbiekben utána telepítették.

A gázsűrő a földgázban lévő szilárd szennyeződések leválasztására szolgál, amelyek készülhetnek porkohászati úton bronzból, perlonból vagy műszálból. A földgáz előmelegítésére a hidrátképződés elkerülése érdekében van szükség abban az esetben, ha a nyomáscsökkenés meghaladja a 14 bar-t. A földgáz melegítése ellenáramú csöves hőcserélővel történik, amelyhez a melegvizet külön helyiségben elhelyezett gázkazánok biztosítják. A nyomásszabályozó ágakba beépített hőcserélőkhöz keringető szivattyúk segítségével jut el a melegvíz. Ennél a rendszernél a hőbevitel közvetlenül a nyomásszabályozó előtt történik, ezért minimális a hőveszteség és a szabályozott gázáram hőmérséklete pontosan szabályozható. Minden állomáson legalább két kazánt építenek be, 30 % tartalék kapacitással, így egy kazán meghibásodása nem jelenti a gázmelegítő rendszer teljes kiesését.

A biztonsági gyorsárak nyomásfeltételhez kötött elzáróelemek, amelyekkel a gáz áramlása pillanateszerűen megszüntethető. A beállítható alsó- és felső nyomásérték segítségével egyrészt a szekunder oldalon kialakuló gázhiány, másrészt

túlnyomás ellen nyújt hatékony védelmet. A gyorszárat úgy alakítják ki, hogy zárt állapotban a primer oldali nyomás közvetlenül hat a szeleptányér felületére, ezzel garantálva a tömör zárást. A szerelvény nyitása általában kézi úton, a szeleptányér két oldala közötti nyomáskiegyenlítés után végezhető el. A gyorszárat a nyomásszabályozó elé építik be, de a szabályozó utáni nyomással vezérlik.

Színtelen és szagtalan gáz szagosítását – a gázszivárgások érezhetővé tétele miatt - tercier-butil-merkaptán és terta-hidro-tiofén (THT-TBM) 50-50 %-os keverék beadagolásával, Lewa gyártmányú szivattyúkkal végzik el a gázátadó állomásokon.

A nyomásszabályozó a nagynyomású gázszállító rendszerből szabályozza az átáramlást egy kisebb nyomású vezetékbe, vagy hálózatba olyan módon, hogy a kisebb nyomású oldal indítónyomását változó terhelés esetén is állandó értéken tartja. A jelenleg kereskedelmi forgalomban lévő nyomásszabályozók pneumatikus berendezések, amelyeknek a munkaközeg maga a földgáz. A szabályozott nyomás egy kis átmérőjű, ún. impulzus vezetéken keresztül hat vissza a pneumatikus vezérlő szervre, amely a munkaközeg nyomásának változtatásával változtatja az átömlési keresztmetszetet. Ha a kisebb nyomású oldalon nő a gázfogyasztás, akkor a nyomáscsökkenés hatására a szabályozó növeli az átömlési keresztmetszetet és ezáltal több gázt enged át. Ha a gázfogyasztás csökken, ellentétes folyamat játszódik le, így a szabályozott nyomás egy névleges érték körül ingadozik. A nyomásszabályozóval szemben fontos követelmény, hogy a beállított nyomásértéket terheléstől függetlenül tartani tudja, továbbá időben változó gázigények esetén működése stabil legyen és lehetőleg kis holtidővel kövesse a változásokat. *(Tihanyi-Zsuga, 2012.)*

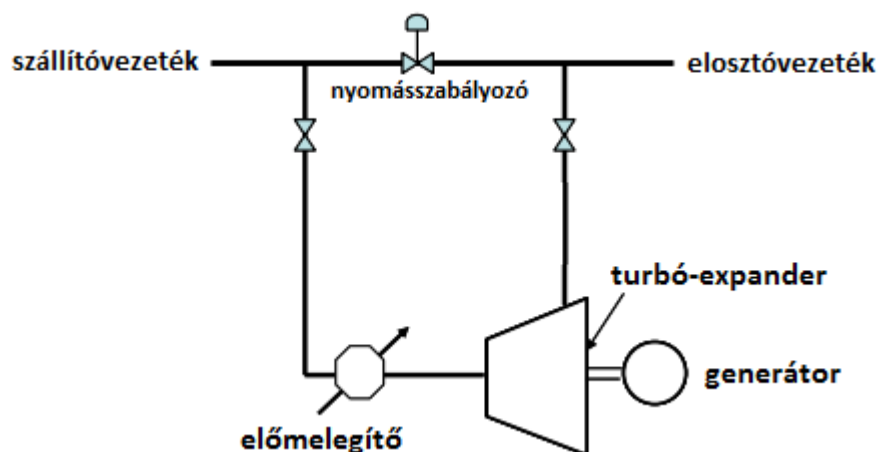
4. A turbó-expander elhelyezése gázátadó állomáson

4.1. A gépegység bemutatása

A turbó-expander vagy másnéven expanziós turbina, egy radiális vagy axiális turbina, amelyen keresztül haladva a nagynyomású gáz expanziója révén munkát végez, amelyből energia állítható elő. Mind a sugárirányú-, mind a tengelyirányú turbina alkalmazott a gyakorlatban, bár az előbbi használata elterjedtebb.

A turbó-expander és a generátor közös tengelyen kapcsolódnak egymáshoz. A földgázból kinyert ún. hideg energia mechanikai energiává alakul át, amely meghajtja a tengelyt.

A turbó-expander kerülő (bypass) vezetéken kerül elhelyezésre a gázátadó állomásokon, amely mellett a főágon továbbüzemelő hagyományos berendezés is megtalálható, ahogyan a 4. ábra is mutatja.

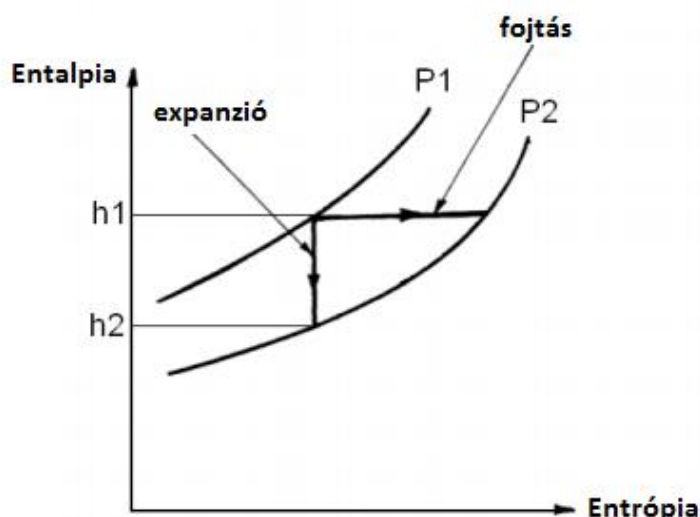


4. ábra: A gázátadó állomás sematikus felépítése
(Forrás: INGAA, 2008.)

4.1.1. A turbó-expander működési mechanizmusa

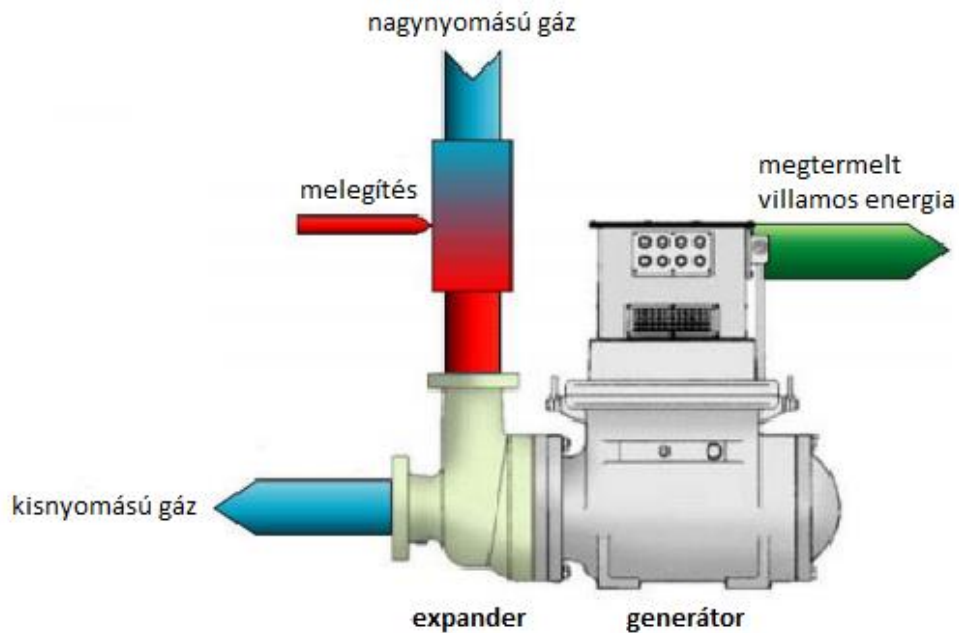
A gázátadó állomáson a földgáz nyomását hagyományos nyomásszabályozó szelepek segítségével csökkentik a kívánt értékre. Ebben az esetben egy izentalpikus folyamatról van szó, vagyis a gázáram entalpiája azonos a szelep mindkét oldalán. A fojtásos állapotváltozás termodinamikailag irreverzibilis. Az izentalpikus fojtás következtében a gáz hőmérséklete csökken a Joule-Thompson-effektus miatt.

Az előzőekkel ellentétben a turbó-expanderben kialakuló folyamat izentrópikus, vagyis a rendszernek az izentrópiája állandó. Ez utóbbi esetben az entrópia változást munkavégzésre lehet felhasználni, azaz a nagynyomású gáz expanziója egy turbina segítségével – jó hatásfokkal – mechanikai energiává alakítható át és hasznosítható. A turbó-expander lényegében egy fordítottan működő kompresszor. Ahelyett, hogy a tengelyteljesítményt a gáz nagyobb nyomásra történő komprimálására használná, a teljesítményt a földgáz nyomáscsökkentését kísérő expanziós folyamatból nyeri. A földgázból kinyerhető energia nagyobb hőmérsékletcsökkenést eredményez izentrópikus esetben, mint izentalpikus fojtás következtében, azonos nyomáсарány mellett. A két folyamat közötti különbséget az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra: A nyomáscsökkentési folyamatok közötti különbség
(Forrás: Elsobki, 2013.)

A fojtásos, illetve a munkavégzéses expanzió esetén a gáz kilépő hőmérséklete a földgáz összetételétől is függ.



6. ábra: A gázátadó állomáson elhelyezett gépegség
(Forrás: Kowala, 2009.)

A 6. ábrán a turbó-expanderes gépegség kialakítása figyelhető meg. A nagynyomású gáz előmelegítést igényel a nagymértékű, az izentrópikus expanzió során kialakuló hőmérsékletvesztés miatt. A gáz belép az expanderbe, ahol expandál. Ebből a folyamatból kinyerhető hideg energia nagy része mechanikai energiává alakul át. Az expander és a generátor közös tengelyen helyezkednek el. A generátor a mechanikai energiát elektromos energiává alakítja.

4.2. Turbó-expander alkalmazása a gyakorlatban

A turbó-expander alkalmazása nem újkeletű, már az 1980-as években alkalmazták az Egyesült Államokban. Elsőként 1983-ban helyeztek üzembe expanziós turbinát San Diego városában, Kaliforniában. A telepítés elsősorban kutatási céllal jött létre a berendezés teljesítményének tesztelésére, valamint a rendszer üzemeltetési kérdéseit és gazdaságosságának vizsgálatát tűzték ki célul. (Bloch – Soares, 2001.) A folyamat nem igényelt előmelegítést, amely pénzügyi szempontból rendkívül előnyös volt. A rendszer nagyon alaposan lett megvizsgálva és bizonyította, hogy a turbó-expander gazdaságosan alkalmazható a gázátadó állomásokon nyomásszabályozók helyett. 1987-ben további két helyen, Agawam és Hamilton városában telepítettek turbó-expandert évi 5,0 MWh energiatermeléssel az Egyesült Államokban.

1995-ben Magyarországon a Kelenföldi gázátadó állomáson került telepítésre expanziós turbina, amely 10 évig üzemelt. Pontos adatok nem találhatóak az energiatermelés mennyiségéről. Valószínűsíthetően az akkor még problémás gépegység kezelésnek tulajdonítható az, hogy 2005-ben a turbó-expandert üzemen kívül helyezték. *(Delgado-Calin, 2010.)*

2002-ben Belgiumban telepítettek egy turbó-expanderes gépegység, amelyhez 2 gázmotort csatlakoztatva, közel 10 MW villamos energiát állítanak elő, amit az elektromos hálózatba táplálának közvetlenül.

Londonban 2009-ben telepítettek expanziós turbinát a nyomásszabályozó állomáson biodízel generátorral összekapcsolva, amellyel 20 MW villamos energia előállítását valósul meg. *(Rheuban, 2009.)*

Számos kutatás készült az elmúlt években a hideg energia expanziós folyamatból való kinyerésére, középpontban a nyomásszabályozó állomásokkal. Bisio (1995) vizsgálat alá vonta a turbó-expanderek széles spektrumát, melyekkel energia nyerhető ki, 75 kW – 130 MW közötti tartományban. Pozivil (2004) a nyomásszabályozó állomáson elhelyezett turbó-expanderek izentropikus hatásfokát tanulmányozta egy szoftver segítségével. Farzenah (2007) a Bander Abbas-i (Irán) gázátadó állomáson végzett vizsgálatokat a földgázból kinyerhető energia felhasználási módjaira vonatkozóan. Emellett tanulmányozta a földgáz előmelegítésének hatását a villamosenergia-termelés vonatkozásában. Rahman (2010) a bangladeshi gázátadó állomás átlagos havi terhelése alapján számított villamos energia potenciált, illetve vizsgálta az előmelegítés jelentőségét, melyről kijelentette, hogy az minden esetben szükséges. Elsobki (2013) átfogó tanulmányt végzett az egyiptomi gázátadó állomásokon megtermelhető villamos energia mennyiségét illetően. Megvizsgálta az ottani jogszabályi környezetet, az expanderes gépegységek telepítésének lehetőségét valamennyi állomás esetében.

A fenti vizsgálatok abból a szempontból is érdekesek, hogy a különböző országokban milyen nyomásfokozatok vannak a gázellátó rendszerben.

5. A szimulációs vizsgálatok

Az alábbi fejezetben a kőolaj- és gáziparban széles körben alkalmazott HYSYS nevű szimulációs szoftver segítségével felépített modell és az azzal elvégzett számítások során kapott eredményeket mutatjuk be és értékeljük. A modell vizsgálatoknál az összehasonlíthatóság érdekében olyan modellt alkalmaztunk, amelynél a hagyományos nyomásszabályozós, és a turbóexpanderes technológiai rendszerben végbemenő állapotváltozás egyidejű modellezésére volt alkalmas különböző gázáram-, bemeneti nyomás- és bemeneti hőmérséklet esetén. A modellben a gázáram 50-50%-ban oszlik meg a hagyományos nyomásszabályozót, illetve a turbóexpandert tartalmazó ág között. Így egy-egy futtatással egyidejűleg megkaptuk az egyik, illetve a másik ágra vonatkozó részletes számítási eredményeket. A modellvizsgálatok célja az volt, hogy a földgáz nyomásenergiája hasznosítható-e turbóexpander segítségével villamosenergia termelés céljára.

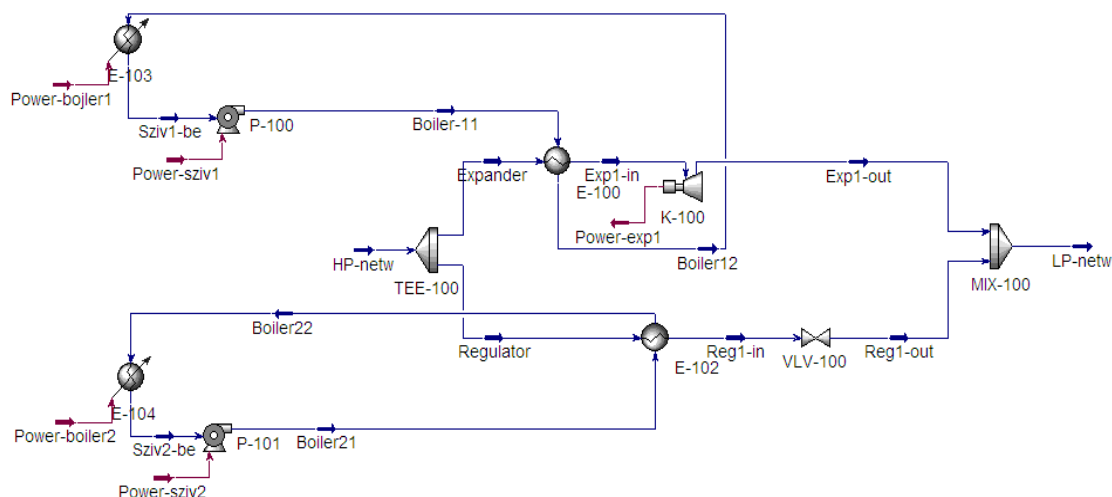
A modellvizsgálatoknál abból indultunk ki, hogy a gázátadó állomás feladata új technológiai megoldás esetén sem változhat. Egy adott gázátadó állomáson a földgázt az aktuális nyomás- és hőmérséklet értékről A Magyar Földgázrendszer Üzemi és Kereskedelmi Szabályzatban (ÜKSZ) rögzített, 6 bar-os kiadási nyomásra kell szabályozni. Az előzőhöz kapcsolódó mellékfeltétel, hogy a földgáz hőmérséklete a szabályozás után nem lehet kisebb az ÜKSZ-ben szereplő 0 °C-os minimális értéknél.

5.1. A vizsgálat során felhasznált modellek bemutatása

Az energetikai és műszaki megvalósíthatósági vizsgálatok során két modell állt rendelkezésünkre, amelyek megalkotásához a HYSYS nevű szimulációs szoftvert alkalmaztuk. Mindkét modell esetében alapul szolgált a gázátadó állomásokon elhelyezett és jelenleg is üzemelő, hagyományos nyomásszabályozó berendezések megléte, amelyek a 7. és 8. ábra alsó ágaiban láthatóak. A turbó-expanderes gépegységek segítségével létrejövő gáznyomás szabályozás a gyakorlatban is megvalósuló by-pass vezetéken került beépítésre a modellezés során. Ennek segítségével egyszerűen válhattak összehasonlíthatóvá az egyes megoldásokkal

történő nyomásszabályozási folyamatok, elsősorban energetikai szempontokat figyelembe véve.

Minden egyes vizsgált változat során alapfeltételnek tekintettük a gázátadó állomásról az elosztói rendszerbe átadott földgáz esetében a 0 °C hőmérséklet és a 6 bar névleges kiadási nyomást, amely az ÜKSZ-ben került megfogalmazásra és a gyakorlatban is alkalmaznak.



7. ábra: Egy turbó-expanderrel és egy nyomásszabályozó berendezéssel ellátott gázátadó állomás sémaképe

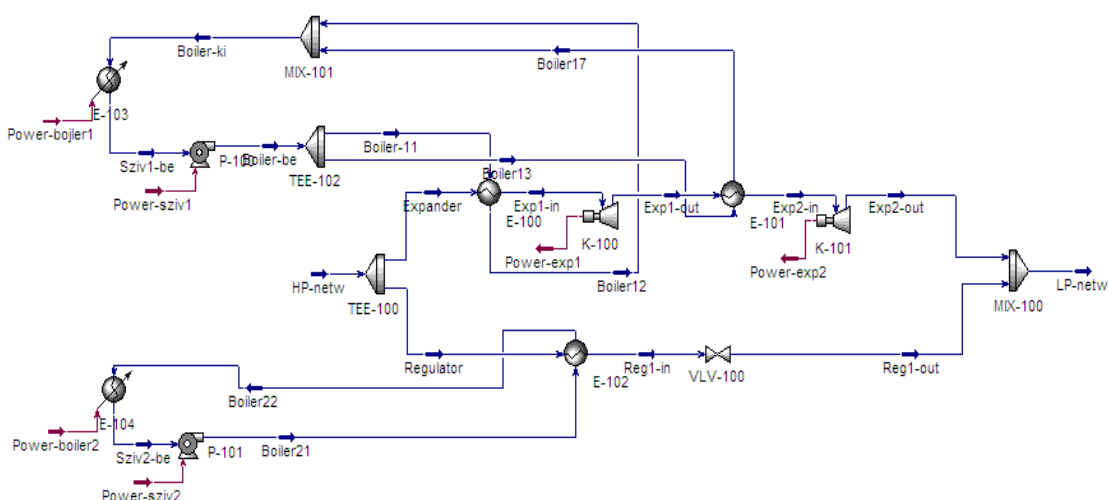
A 7. ábrán az egy turbó-expanderes gépegyeséggel ellátott szabályozó ág (felső) és egy hagyományos nyomásszabályozó berendezéssel ellátott ág (alsó) látható. Mindkét ágban azonos a gázáram, továbbá a HP-netw csomópontban a betáplálási nyomás- és hőmérséklet, illetve az LP-netw csomópontban a kiadási nyomás- és hőmérséklet értéke.

Minden esetben számolni kell azzal, hogy a gázátadó állomásra érkező gáz hőmérséklete szezonálisan változó. A vizsgálatoknál az sem hagyható figyelmen kívül, hogy téli időszakban a gázátadó állomáson átáramló földgáz mennyisége a fűtési célú gázigény miatt jelentősen megnő, és a talajhőmérséklet is kisebb a nyári időszakban kialakuló értéknél. Az előzőek emiatt a nyomáscsökkentés előtt az áramló gázt melegíteni kell. Erre egy gázmelegítő rendszer szolgál, amelyben egy földgáz tüzelésű kazán olyan mértékig melegíti fel a közvetítő közegként használt vizet, hogy a nyomáscsökkentő elem kimeneti oldalán a hőmérséklet adott érték legyen. Ebben a segédrendszerben a víz keringetéséhez szükséges energiát egy

villanymotorral meghajtott szivattyú biztosítja.

Az áramló földgáz lehűlése nem azonos mértékű a hagyományos nyomásszabályozó és a turbó-expander esetében. Ennek oka, hogy a hagyományos nyomásszabályozókban egy fojtószelepen történő átáramlás során csökken a gáz nyomása és hőmérséklete, míg a turbó-expander esetében munkavégzéses expanzió következik be, amely lényegesen nagyobb lehűléssel jár. Könnyebbség, hogy a HYSYS modellnél a nyomáscsökkentő elem kiválasztásával már egyértelművé válik az állapotváltozás. Nagyon fontos, hogy a szivattyú csak 100 %-ban folyadékfázis továbbítását képes elvégezni, emiatt a melegítő kör nyomását úgy kell megválasztani, hogy a melegítő közeg folyadék halmazállapotban maradjon a szivattyú nyomóoldalától a szivattyú szívóoldaláig.

Egyes esetekben, különösen a kompresszorállomások kimeneti pontjától nem túl távol eső gázátadó állomások esetében előfordulhat olyan helyzet, hogy a gázátadó állomáson a 6 bar-ra történő szabályozásnál a 0 °C-os kimeneti hőmérséklet csak úgy biztosítható, ha a szabályozó elem előtt a földgázt 100 °C-ot megközelítő, esetenként meghaladó hőmérsékletre kellene felmelegíteni. Különösen turbó-expander alkalmazása esetén állhat elő ilyen helyzet. Ilyen esetekben indokolt lehet a nyomáscsökkentést két lépcsőben elvégezni.



8. ábra: Két turbó-expanderrel és egy nyomásszabályozó berendezéssel ellátott gázátadó állomás sémaképe

A 8. ábrán két turbó-expanderes gépegyeséggel ellátott szabályozó ág (felső) és egy hagyományos nyomásszabályozó berendezéssel ellátott ág (alsó) látható. Mindkét ágban azonos a gázáram, továbbá a **HP-netw** csomópontban a betáplálási nyomás- és hőmérséklet, továbbá az **LP-netw** csomópontban a kiadási nyomás- és hőmérséklet értéke. Az ábrán látható az is, hogy ebben az esetben az előmelegítéshez szükséges víz mennyisége egy szétválasztó berendezéssel 50-50 %-os arányban kerül szétválasztásra, és 2 db hőcserélőn keresztül történik meg a földgáz előmelegítése. A 2 turbó-expander és a hozzá kapcsolódó villamos generátor segítségével nyerhető ki energia. Az összehasonlításra szolgáló hagyományos nyomásszabályozóval rendelkező ágban a vizsgált esetekben sem kellett megduplázni a nyomásszabályozó berendezést.

Az 2. táblázatban a számítások során felhasznált mintaföldgáz összetétele látható, amely a hazai földgázellátó rendszerről szolgáltatott földgázéhoz nagyon hasonló. A vizsgálat során minden esetben a táblázat szerinti gázösszetételt használtuk.

2. táblázat: A vizsgálat során alkalmazott mintaföldgáz összetétele

Komponens	Képlet	mol%
Metán	CH ₄	95,50
Etán	C ₂ H ₆	2,57
Propán	C ₃ H ₈	0,66
Bután	C ₄ +	0,27
Nitrogén	N ₂	0,75
Szén-dioxid	CO ₂	0,25

A szimulációs szoftverrel 336 db változatot futtatunk le a rendelkezésünkre álló két modellen, amelyek közül csupán a tanulmány szempontjából legjelentősebb eredményeket mutatjuk be.

5.2. Egy turbó-expander és egy nyomásszabályozó egység összehasonlító vizsgálata

Ebben az alfejezetben a 7. ábra szerinti gázátadó állomás működése került elemzésre különböző feltételek esetén az alábbiak szerint.

5.2.1. Nagy kapacitású, nagy érkező nyomású gázátadó állomás vizsgálata

A minél szélesebb működési tartomány vizsgálata érdekében 3 különböző gázátadó csoportot határoztunk meg, a gázáram és az érkező nyomás függvényében. A Gázátadó-I. csoportba sorolt létesítmények kompresszorállomás közelében lévő állomások, amelyek nagy érkező nyomással és nagy kapacitással rendelkeznek.

A szállított közeg vizsgálati tartománya 10 000 - 22 000 m³/h tartományba esik, a vizsgálati lépésköz 4 000 m³/h. A hazai gázátadó állomások jelentős hányada ebbe a csoportba tartozik a maximális terhelhetőség szempontjából. A csoportban a másik paraméter a bemeneti nyomás. Ezt a kritériumot a kompresszorállomás közelsége miatt 45 - 55 bar közötti nyomás-tartománnyal jellemeztük és a modellezések során 5 bar-os lépésközt alkalmaztunk. A kategóriára vonatkozó számítási eredmények a 3. - 5. táblázatokban láthatók.

A 3. - 5. táblázatokban feltüntetésre kerültek a szimulációk során a földgáz előmelegítő-körre számított energetikai adatok, a gázfűtő kazánnak, illetve a szivattyúnak a teljesítményei, kW mértékegységben. Ezeknek a technológiai egységeknek az üzemelése energiafelhasználással jár, amelyet az energiamérlegben indokolt feltüntetni. Minden egyes táblázatban az egyes változatok energia igénye az „összes ráfordítás” nevű, szürke színű mezőben látható. A táblázatban zöld színnel jelzett érték a turbó-expanderes gépegyeséggel termelt energiamennyiséget jelöli, szintén kW mértékegységben. Az egyes változatok végén feltüntetett „különbség” rubrikában az összes szükséges energia és a megtermelt energia különbsége látható, amely jelen pályázat szempontjából a legfontosabb indikátor.

Véleményünk szerint az előzőek szerinti indikátor megfelelő alapot biztosít a két különböző technológia energiamérlegének összehasonlítására és egy későbbi fejlesztési döntéshez. Ugyanakkor fontos hangsúlyozni, hogy az előmelegítő kör részeként beépített gázfűtő kazán energiaszükséglete technológiai célú földgázra

vonatkozik, és csak a szivattyúk üzemeltetéséhez szükséges villamosenergia.

A 3. táblázatban a 45 bar érkező nyomással rendelkező, nagy kapacitású gázátadó állomás vizsgálatának eredményei láthatóak.

3. táblázat: Elméleti energiamérleg összehasonlítása 45 bar érkező nyomáson és emelkedő földgáz hőmérséklet mellett

$p=45\text{ bar}$	Mérték- egység	$Q=10\,000\text{ m}^3/\text{h}$		$Q=14\,000\text{ m}^3/\text{h}$		$Q=18\,000\text{ m}^3/\text{h}$		$Q=22\,000\text{ m}^3/\text{h}$	
		Exp.	Szab.	Exp.	Szab.	Exp.	Szab.	Exp.	Szab.
$T=4\text{ }^\circ\text{C}$									
Kazán teljesítmény	kW	519,0	87,0	727,0	121,0	935,0	156,0	1143,0	191,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,48	0,15	0,54	0,15	0,57	0,19	0,70	0,19
Össz. ráfordítás	kW	519,48	87,15	727,54	121,15	935,57	156,19	1143,70	191,19
Megtermelt energia	kW	433,0	0,0	607,0	0,0	780,0	0,0	953,0	0,0
Különbség	kW	86,48	87,15	120,54	121,15	155,57	156,19	190,70	191,19
$T=8\text{ }^\circ\text{C}$									
Kazán teljesítmény	kW	499,0	66,0	699,0	93,0	898,0	120,0	1099,0	146,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,49	0,15	0,53	0,15	0,58	0,19	0,70	0,19
Össz. ráfordítás	kW	499,49	66,15	699,53	93,15	898,58	120,19	1099,70	146,19
Megtermelt energia	kW	433,0	0,0	607,0	0,0	780,0	0,0	953,0	0,0
Különbség	kW	66,49	66,15	92,53	93,15	118,58	120,19	146,70	146,19
$T=12\text{ }^\circ\text{C}$									
Kazán teljesítmény	kW	479,0	46,0	670,0	93,0	862,0	84,0	1054,0	102,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,49	0,15	0,53	0,15	0,57	0,19	0,70	0,19
Össz. ráfordítás	kW	479,49	46,15	670,53	93,15	862,57	84,19	1054,70	102,19
Megtermelt energia	kW	433,0	0,0	607,0	0,0	780,0	0,0	953,0	0,0
Különbség	kW	46,49	46,15	63,53	93,15	82,57	84,19	101,70	102,19

A 3. táblázatban minden változat esetében a gázátadó feltételezett bemeneti nyomása 45 bar, a földgáz hőmérséklete a bemeneti ponton rendre $4\text{ }^\circ\text{C}$ $8\text{ }^\circ\text{C}$ és $12\text{ }^\circ\text{C}$, a gázáram pedig $10\,000\text{ m}^3/\text{h}$ és $22\,000\text{ m}^3/\text{h}$ között változik.

A szimulációs eredményekből látható, hogy a hőmérséklet tartomány minimumán, azaz $4\text{ }^\circ\text{C}$ -on a szállítási feladat növekedésével egyenesen arányosan növekszik a megtermelhető energia mennyisége. Amíg $10\,000\text{ m}^3/\text{h}$ gázáram esetén $433,0\text{ kW}$ energia nyerhető ki turbó-expanderrel történő nyomáscsökkentés esetében, addig egy $22\,000\text{ m}^3/\text{h}$, azaz az állomás maximális kapacitásán a gázárammal arányosan $953,0\text{ kW}$ nyerhető ki a turbó-expanderrel. állítható elő. A táblázatból ugyanakkor az is egyértelműen látható, hogy a gáz-előmelegítéshez felhasznált energiaigény is arányosan nő. A gázkazán energiaigénye csaknem minden esetben a befektetett energiaszükséglet 99 %-át jelenti, de ez a szállítórendszeren belüli technológiai célú földgáz-felhasználást jelent. A szivattyú teljesítménye egyik esetben sem haladja meg az $1,0\text{ kW}$ értéket. A táblázatban feltüntetett adatokból látható, hogy $10\,000\text{ m}^3/\text{h}$ gázáram esetében közel 520 kW hőteljesítmény szükséges

433 kW hasznosítható elméleti teljesítményhez. Így összességében 520 kW-433 kW=87 kW saját energia befektetés szükséges.

A nyomásszabályozóval üzemelő ág esetében nincs energiatermelés, a gáz-előmelegítés céljára pedig 87 kW hőteljesítmény szükséges annak érdekében, hogy az elosztói rendszerbe történő tápláláshoz előírt 0 °C és 6 bar kiadási értékek tarthatók legyenek.

Turbó-expanderrel történő szabályozás esetén a vizsgálati tartomány maximumánál, 22 000 m³/h-nál 1 143 kW teljesítmény-igény jelentkezik a földgáz előmelegítés miatt és 953 kW mechanikai, illetve ennél valamivel kisebb villamos teljesítménnyel lehet számolni. termelés valósítható meg a generátorral, amelyek különbsége 190 kW.

Ha a hőmérsékletfüggést vizsgáljuk a gázátadó állomások energiamérlegének felállítása során, láthatóvá válik, hogy ahogyan növekszik a nagynyomású szállítóvezetésekről érkező földgáz hőmérséklete, úgy csökken a gáz-előmelegítés energiaigénye. Ennek magyarázata egyszerű, hiszen a magasabb hőmérsékletű földgázt már kisebb mértékben kell előmelegíteni az ún. hideg energia kinyeréséhez. Egyértelműen látható, hogy egy adott szállítási kapacitás esetében a hőmérsékletének a növekedése nem befolyásolja a turbó-expanderrel kinyerhető teljesítmény nagyságát. Ugyanakkor a gázhőmérséklet növekedése esetén csökken a kazán teljesítmény-igény. Amíg 10 000 m³/h földgáz esetében 4 °C mellett közel 520 kW teljesítmény-igény jelentkezett a gáz-előmelegítés során, addig 12 °C esetében ez az érték 480 kW-ra csökken. Ugyanakkor mindkét esetben 433 kW teljesítmény nyerhető ki turbó-expanderrel, a „hideg energia” kinyerésével. Míg az előbbi esetben 87 kW különbség jelentkezik a fűtőkör teljesítménye és a kinyerhető teljesítmény között, addig ez utóbbi esetben 47 %-kal csökkenve, csupán 47 kW értéken adódik.

A 4. táblázatban a 3. táblázathoz hasonló módon kerültek feltüntetésre az energiamérleg felállításához szükséges adatok azzal a különbséggel, hogy a gázátadó állomásra érkező nyomást 50 bar értéken vettük figyelembe. A vizsgálat alá vont paraméterek, hőmérsékletek és szállítási kapacitások változatlanok maradtak az előző táblázathoz képest.

4. táblázat: Elméleti energiamérleg összehasonlítása 50 bar érkező nyomáson és emelkedő földgáz hőmérséklet mellett

$p=50\text{ bar}$	Mértékegység	$Q=10\,000\text{ m}^3/\text{h}$		$Q=14\,000\text{ m}^3/\text{h}$		$Q=18\,000\text{ m}^3/\text{h}$		$Q=22\,000\text{ m}^3/\text{h}$	
		Exp.	Szab.	Exp.	Szab.	Exp.	Szab.	Exp.	Szab.
$T=4\text{ }^\circ\text{C}$									
Kazán teljesítmény	kW	558,0	100,0	781,0	140,0	1005,0	181,0	1230,0	222,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,45	0,15	0,58	0,19	0,66	0,23	0,75	0,27
Össz. ráfordítás	kW	558,45	100,15	781,58	140,19	1005,66	181,23	1230,75	222,27
Megtermelt energia	kW	458,0	0,0	642,0	0,0	825,0	0,0	1009,0	0,0
Különbség	kW	100,45	100,15	139,58	140,19	180,66	181,23	221,66	222,27
$T=8\text{ }^\circ\text{C}$									
Kazán teljesítmény	kW	537,0	80,0	752,0	112,0	967,0	144,0	1182,0	176,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,45	0,15	0,57	0,19	0,66	0,23	0,75	0,27
Össz. ráfordítás	kW	537,45	80,15	752,57	112,19	967,66	144,23	1182,75	176,27
Megtermelt energia	kW	458,0	0,0	642,0	0,0	825,0	0,0	1009,0	0,0
Különbség	kW	79,45	80,15	110,57	112,19	142,66	144,23	173,75	176,27
$T=12\text{ }^\circ\text{C}$									
Kazán teljesítmény	kW	517,0	59,0	723,0	83,0	930,0	107,0	1137,0	131,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,45	0,15	0,57	0,19	0,66	0,23	0,75	0,27
Össz. ráfordítás	kW	517,45	59,15	723,57	83,19	930,66	107,23	1137,75	131,27
Megtermelt energia	kW	458,0	0,0	642,0	0,0	825,0	0,0	1009,0	0,0
Különbség	kW	59,45	59,15	81,57	83,19	105,66	107,23	128,75	131,27

Az előzőekben tett megállapítások a hőmérséklet változását, illetve az állandó hőmérséklet melletti földgáz mennyiségének növekedését illetően ugyanolyan szabályok mellett változtak. Az előzőekben vizsgált változathoz képest 5 bar-ral megnövelt gázátadó állomásra érkező nyomás esetén növekedés jelentkezett mind a generátorral megtermelt, mind a fűtőkör teljesítményének tekintetében.

Ha összehasonlítjuk a $10\,000\text{ m}^3/\text{h}$ mennyiségű és $4\text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékletű földgáz nyomásszabályozásának teljesítmény mérlegét 45 bar és 50 bar nyomáson, akkor láthatóvá válik, hogy a nagyobb érkező nyomás következtében nagyobb teljesítmény-szükséglet jelentkezik, viszont a kinyerhető kW-ok száma is növekedni fog. Amíg az előző változat esetén 520 kW előmelegítő-kör teljesítmény mellett 433 kW kinyerhető teljesítmény adódik, addig az utóbbi esetben 558 kW teljesítményigény jelentkezik (6,8 % növekedés) és 458 kW kinyerhető teljesítmény (5,5 % növekedés).

$22\,000\text{ m}^3/\text{h}$ mennyiség és $12\text{ }^\circ\text{C}$ mellett az alábbiak szerinti változás tapasztalható: 45 bar nyomáson 1 054 kW teljesítményigény az előmelegítés folyamatából kifolyólag és 953 kW nyerhető ki a turbó-expander segítségével. 50 bar esetében 1 137 kW szükséges a földgáz melegítése céljára (7,3 % növekedés) és 1 009 kW teljesítmény nyerhető ki (5,6 % növekedés). Ez a nagyobb nyomás miatt jelentkező, nagyobb mennyiségű hideg energia kinyerésével magyarázható, a turbó-expanderes gépegysséggel történő nyomáscsökkentés folyamata során. A nagyobb

érkező nyomás miatt nagyobb hőmérséklet tartása szükséges az előmelegítés folyamatában, ami a nyomásemelés miatt nagyobb vízmennyiséget igényel a gázátadó állomás kimeneti pontjához tartozó peremfeltételek teljesítéséhez.

5. táblázat: Elméleti energiamérleg összehasonlítása 55 bar érkező nyomáson és emelkedő földgáz hőmérséklet mellett

$p=55 \text{ bar}$	Mértékegység	$Q=10\,000 \text{ m}^3/\text{h}$		$Q=14\,000 \text{ m}^3/\text{h}$		$Q=18\,000 \text{ m}^3/\text{h}$		$Q=22\,000 \text{ m}^3/\text{h}$	
		Exp.	Szab.	Exp.	Szab.	Exp.	Szab.	Exp.	Szab.
$T=4\text{ }^\circ\text{C}$									
Kazán teljesítmény	kW	595,0	114,0	832,0	160,0	1070,0	206,0	1308,0	252,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,53	0,15	0,62	0,19	0,71	0,26	0,80	0,30
Össz. ráfordítás	kW	595,53	114,15	832,62	160,19	1070,71	206,26	1308,80	252,30
Megtermelt energia	kW	481,0	0,0	673,0	0,0	866,0	0,0	1059,0	0,0
Különbség	kW	114,53	114,15	159,62	160,19	204,71	206,26	249,80	252,30
$T=8\text{ }^\circ\text{C}$									
Kazán teljesítmény	kW	573,0	93,0	803,0	130,0	1032,0	167,0	1263,0	204,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,53	0,15	0,62	0,19	0,71	0,26	0,80	0,30
Össz. ráfordítás	kW	573,53	93,15	803,62	130,19	1032,71	167,26	1262,80	204,30
Megtermelt energia	kW	481,0	0,0	673,0	0,0	866,0	0,0	1059,0	0,0
Különbség	kW	92,53	93,15	130,62	130,19	166,71	167,26	204,80	204,30
$T=12\text{ }^\circ\text{C}$									
Kazán teljesítmény	kW	552,0	72,0	773,0	101,0	995,0	130,0	1217,0	159,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,53	0,15	0,62	0,19	0,70	0,26	0,80	0,30
Össz. ráfordítás	kW	552,53	72,15	773,62	101,19	995,70	130,26	1217,80	159,30
Megtermelt energia	kW	481,0	0,0	673,0	0,0	866,0	0,0	1059,0	0,0
Különbség	kW	71,53	72,15	100,62	101,19	129,70	130,26	158,80	159,30

Az 5. táblázatban a földgáz gázátadó bemeneti nyomása 55 bar, a bemeneti hőmérséklet és a gázáram az előző táblázatban szereplő értékekkel azonos. A táblázat alapján megállapítható, hogy a bemeneti ponton nagyobb hőmérsékletű földgáz esetében kisebb előmelegítési igény jelentkezik, így kisebb a nyomásszabályozás teljesítmény- és energiaszükséglete. Ezek alapján kijelenthető, hogy nagyobb földgáz hőmérséklet mellett a turbó-expanderrel megvalósított nyomásszabályozás folyamata gazdaságosabban üzemeltethető.

5.2.2. Közepes kapacitású gázátadó állomás vizsgálata

Az alábbi alfejezetben a Gázátadó-II. jelű csoportba tartozó gázátadó állomások vizsgálata kerül bemutatásra. Ebben a csoportban a gázátadó állomás jellemző bemeneti paraméterei, a bementi ponton az áramló gáz nyomása, továbbá a gázáram lényegesen kisebb, mint a Gázátadó-I. csoportban vizsgált esetekben. A csoportba tartozó gázátadó a feltételezés szerint távolabb helyezkedik el a kompresszorállomástól, és az ellátott fogyasztói kör is kisebb. A

modellszámításokhoz feltételezett érkező nyomás 35 – 40 bar közötti érték, a gázátadó állomás maximális kapacitása 3 000 m³ és 6 000 m³ órai mennyiség tartományába esik.

6. táblázat: Közepes érkezőnyomású és közepes földgázkapacitású gázátadó állomás elméleti energiamérlege

		35 bar				40 bar			
		Q=3 000 m ³ /h		Q=6 000 m ³ /h		Q=3 000 m ³ /h		Q=6 000 m ³ /h	
	Mértékegység	Exp.	Szab.	Exp.	Szab.	Exp.	Szab.	Exp.	Szab.
T= 4 °C									
Kazán teljesítmény	kW	130,0	18,0	259,0	36,0	143,0	22,0	286,0	44,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,35	0,10	0,41	0,11	0,42	0,12	0,48	0,13
Össz. ráfordítás	kW	130,35	18,10	259,41	36,11	143,42	22,12	286,48	44,13
Megtermelt energia	kW	113,0	0,0	225,0	0,0	122,0	0,0	244,0	0,0
Különbség	kW	17,35	18,10	34,41	36,11	21,42	22,12	42,48	44,13
T= 8 °C									
Kazán teljesítmény	kW	124,0	93,0	248,0	24,0	137,0	16,0	275,0	32,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,35	0,15	0,39	0,16	0,43	0,17	0,51	0,17
Össz. ráfordítás	kW	124,35	93,15	248,39	24,16	137,43	16,17	275,51	32,17
Megtermelt energia	kW	113,0	0,0	225,0	0,0	122,0	0,0	244,0	0,0
Különbség	kW	11,35	93,15	23,39	24,16	15,43	16,17	31,51	32,17
T= 12 °C									
Kazán teljesítmény	kW	118,0	7,0	236,0	13,0	131,0	10,0	263,0	20,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,35	0,15	0,40	0,19	0,45	0,23	0,54	0,26
Össz. ráfordítás	kW	118,35	7,15	236,40	13,19	131,45	10,23	263,54	20,26
Megtermelt energia	kW	113,0	0,0	225,0	0,0	122,0	0,0	244,0	0,0
Különbség	kW	5,35	7,15	11,40	13,19	9,45	10,23	19,54	20,26

A 6. táblázatban megfigyelhető, hogy ugyanolyan törvényszerűség alapján változnak a felvázolt energiamérleg egyes elemei a közepes földgáz mennyiségek és nyomások esetén, mint ahogyan a nagyobb nyomású és kapacitású állomások esetében jelentkeztek.

Megfigyelhető, hogy 35 bar érkező nyomás mellett, 4 °C-on és 3 000 m³/h földgázterhelés esetében már csupán 130,0 kW gáz-előmelegítési teljesítmény adódott. Az összes energiaráfordítás is jelentős mértékben csökkent a kisebb nyomások és földgáz mennyiségek következtében, 130,35 kW kazán-teljesítmény mellett 113,0 kW teljesítmény nyerhető ki turbó-expanderrel. Így 17,35 kW különbség jelentkezett a teljesítményszükséglet és a kinyerési lehetőség között, amely érték a hagyományos nyomásszabályozó berendezés működésénél 18,35 kW. Ugyanezen feltételek mellett 12 °C-on már csak 118,35 kW ráfordítás jelentkezett az előmelegítési technológia energiafelhasználásnak csökkenése miatt – hiszen a nagyobb földgáz hőmérséklet következtében nincs olyan mértékű energiaigény a gáz előmelegítésére, és mivel a gázátadó állomás terhelése változatlan maradt 113,0 kW

kinyerhető teljesítmény jelentkezett. Összességében 30,8 %-ára csökkent a folyamat részére biztosítandó és a kinyerhető energia különbsége, amely pontosan 5,35 kW. A hagyományos módon történő nyomáscsökkentés esetén ugyanezen feltételek mellett 7,12 kW a rendszer üzemeltetéséhez szükséges teljesítmény-igény és természetesen energia kinyerésre nincs lehetőség.

A 5.2.1. fejezetben megállapításra került, hogy adott földgázterhelés mellett kedvezőbben alakul az elméleti energiamérleg, ha nagyobb az érkező földgáz hőmérséklete, hiszen ennek következtében csökken a gáz-előmelegítés teljesítmény-igénye. Ha megvizsgáljuk a 6 000 m³/h max. terhelésű gázátadó állomást 35 bar érkező nyomás mellett, 225,0 kW a turbó-expanderrel elméletileg kinyerhető teljesítmény, viszont ehhez 236,40 kW teljesítményt igényel a gáz-előmelegítő kazán, amelyek különbsége 11,40 kW. 40 bar érkező nyomás mellett 244,0 kW elméletileg kinyerhető teljesítmény jelentkezik, ami 19,0 kW-tal több, mint 35 bar érkező nyomás esetén. Viszont a gázfűtő egység 263,54 kW teljesítmény-igénye 27,14 kW-tal haladja meg az előző esetet. Elmondható, hogy nagyobb nyomás esetén nagyobb a folyamatból elméletileg kinyerhető teljesítmény, viszont ehhez nagyobb energiáfordítás is szükséges. A változás tehát kedvezőtlen irányú.

5.2.3. Kis teljesítményű, kis érkező nyomású gázátadó állomás vizsgálata

A Gázátadó-III. csoportba tartozó azok a gázátadó állomások tartoznak, amelyek a kompresszorállomástól távol helyezkedik el, az állomás bemeneti pontján az érkező nyomás az előző kategóriákhoz képest kicsi, feltételezés szerint 25-30 bar közötti nyomástartományba esik. Ehhez kis maximális terhelés is társul, 1 000 – 2 000 m³ órai földgázmennyiséget feltételezve.

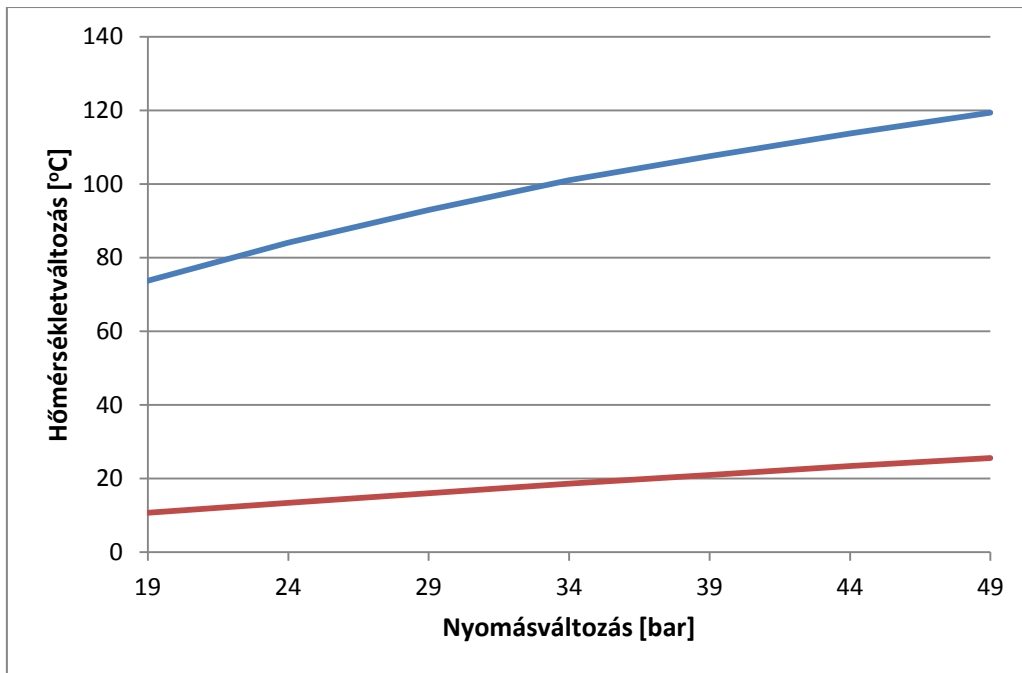
A 7. táblázatban látható, hogy - az előző 2 vizsgált kategóriához viszonyítva - nagyon alacsony értékek jelentkeztek az elméleti energiamérleg minden egyes elemében. Megfigyelhető, hogy 25 bar nyomáson és 1 000 m³ órai földgázmennyiség esetén csupán 30,0 kW-nyi az elméletileg kinyerhető teljesítmény turbó-expander alkalmazásával. Ez a mennyiség 30 bar nyomáson 34,0 kW-ra nő, ami változatlanul nem számottevő. 2 000 m³/h földgázterhelés és 30 bar nyomásérték mellett is csak 68,0 kW az elméletileg kinyerhető teljesítmény, ha a nyomásszabályozó berendezések helyett turbó-expandert alkalmaznak.

7. táblázat: Kis érkező nyomású és kis földgázkapacitású gázátadó állomás elméleti energiamérlege

	Mértékegység	25 bar				30 bar			
		Q=1 000 m ³ /h		Q=2 000 m ³ /h		Q=1 000 m ³ /h		Q=2 000 m ³ /h	
		Exp.	Szab.	Exp.	Szab.	Exp.	Szab.	Exp.	Szab.
T= 4 °C									
Kazán teljesítmény	kW	33,0	3,5	65,0	7,0	38,0	5,0	75,0	10,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,20	0,10	0,22	0,11	0,22	0,12	0,22	0,13
Össz. ráfordítás	kW	33,20	3,10	65,22	7,11	38,22	5,12	75,22	10,13
Megtermelt energia	kW	30,0	0,0	60,0	0,0	34,0	0,0	68,0	0,0
Különbség	kW	2,20	3,10	5,22	7,11	4,22	5,12	7,22	10,13
T= 8 °C									
Kazán teljesítmény	kW	31,0	1,5	61,0	2,5	37,0	3,0	71,0	6,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,20	0,10	0,20	0,10	0,22	0,12	0,21	0,13
Össz. ráfordítás	kW	31,20	1,60	61,20	2,60	37,22	3,12	71,21	6,13
Megtermelt energia	kW	30,0	0,0	60,0	0,0	34,0	0,0	68,0	0,0
Különbség	kW	1,20	1,60	1,20	2,60	3,22	3,12	3,21	6,13
T= 12 °C									
Kazán teljesítmény	kW	30,0	0,5	60,0	1,0	34,0	1,0	64,0	2,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,20	0,10	0,20	0,08	0,21	0,11	0,20	0,12
Össz. ráfordítás	kW	30,20	0,15	60,20	1,08	34,21	1,11	64,20	2,12
Megtermelt energia	kW	30,0	0,0	60,0	0,0	34,0	0,0	68,0	0,0
Különbség	kW	0,20	0,15	0,20	1,08	0,21	1,11	4,20	2,12

Megállapítható tehát, hogy a kis érkező nyomású és terhelésű gázátadó állomások esetén a turbó-expanderes gépegyeségekkel történő energiatermelés jelentősége elhanyagolható. Kijelenthető, hogy ilyen feltételek mellett üzemelő gázátadó állomásokon a nyomásszabályozó berendezések turbó-expanderrel történő kiváltása energetikai szempontból értelmetlen.

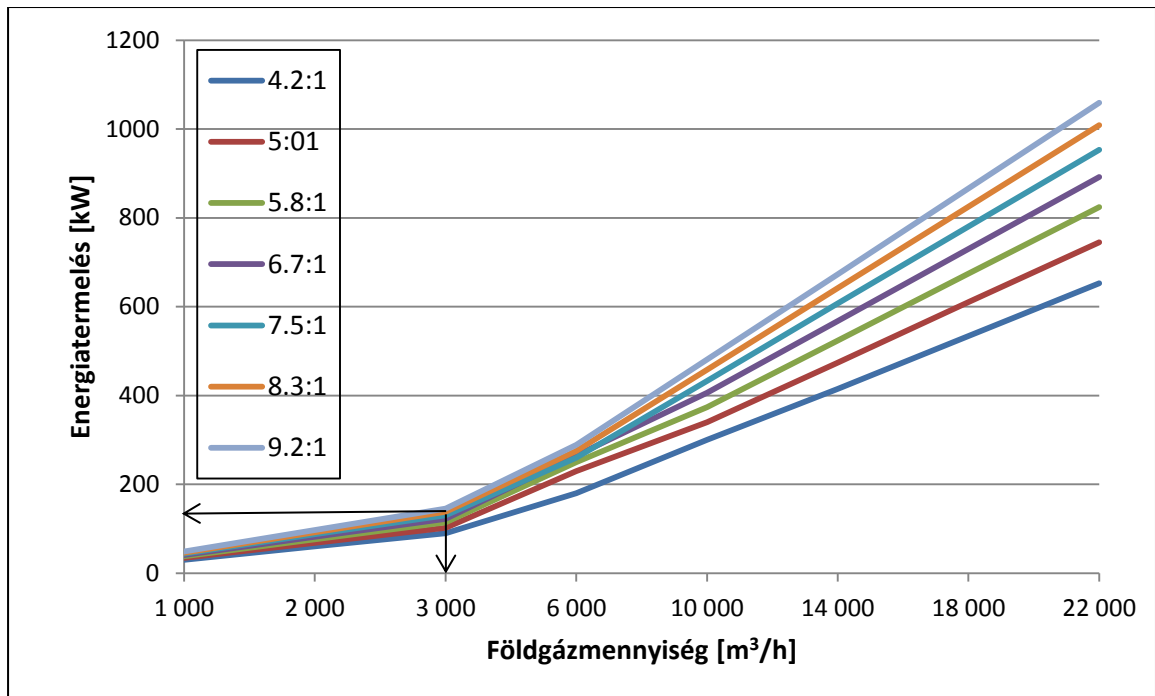
A 9. táblázatban szereplő értékekből következően a hagyományos nyomásszabályozóval történő nyomáscsökkentés megfelelő üzemelést biztosít, és láthatóan nem is igényel nagy teljesítményt.



9. ábra: Hőmérsékletváltozás a nyomásváltozás függvényében turbó-expanderrel és nyomásszabályozó szeleppel

A 9. ábrán a turbó-expanderrel (kék szín) és a hagyományos nyomásszabályozó szeleppel (piros szín) történő nyomásszabályozó folyamattal járó hőmérsékletváltozás-görbéket ábrázoltuk a nyomásváltozás függvényében. A turbó-expander bemeneti pontján lényegesen nagyobb hőmérséklet szükséges annak érdekében, hogy az izentrópikus folyamat végén a földgáz hőmérséklete $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ legyen. Az ábrából látható, hogy 19 bar-os nyomáscsökkenés mellett az izentalpikus fojtás során mellett csupán $10,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ csökkenés következik be, addig az izentrópikus expnazió közel $74\text{ }^{\circ}\text{C}$ csökkenést eredményez. Láthatóan a növekvő nyomásváltozás növekvő hőmérsékletváltozással jár. 49 bar-os nyomásváltozás során izentalpikus esetben a hőmérsékletkülönbség alig haladja meg a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot, ez izentrópikus esetben a 6-szorosa, azaz $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ról csökken a hőmérséklet az elosztórendszerbe való betápláláshoz megkövetelt $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra.

A 10. ábrán az eddig bemutatott változatok eredményeinek összefoglalása került feltüntetésre. A függőleges tengelyen a turbó-expanderes gépegyeséggel a folyamat során kinyerhető elméleti teljesítmény olvasható le, kW mértékegységben kifejezve.



10. ábra: Elméleti energiatermelés a nyomásarány és a földgázmennyiség függvényében

A vízszintes tengelyen a gázátadó állomások maximális terhelése szerepel, m³/h mennyiségben. Az egyes görbék azt a nyomásarányt fejezik ki, amely a gázátadó állomásra érkező nyomás, illetve az alapparaméternek tekintett 6 bar végponti nyomásból származtatható. Értelmszerűen a 25 bar-ról 6 bar-ra történő nyomáscsökkentés folyamatához a 4,2:1 nyomásarány tartozik, a 30 bar-ról 6 bar-ra történő folyamathoz az 5:1 nyomásarány, és így folytatva egész a vizsgálatok során bemutatott maximális 55 bar vizsgálati nyomásértékhez, amelyhez a fenti ábrán feltüntetett 9,2:1 nyomásarányú görbe tartozik.

Az ábrán csak a turbó-expanderrel kinyerhető energiamennyiség került ábrázolásra, a földgáz előmelegítéséhez szükséges teljesítmények, illetve a hagyományos nyomásszabályozóval történő folyamathoz tartozó energiamennyiségek nem lettek megjelenítve. Az ábrát megfigyelve minden egyes nyomásarányú görbe szinte egyetlen kezdőpontban helyezkedik el a legminimálisabb, 1 000 m³/h terhelésű gázátadó állomás esetében. Ahogyan növekszik a gázátadó maximális terhelése, úgy növekszik a megtermelhető energiamennyiség. 6 000 m³ maximális órai terheletőség esetében már jelentősebb különbségek jelentkeznek az energiatermelés tekintetében, amely a gázkapacitás növekedésével egyre nagyobb

mértékben nő. Az is megfigyelhető, hogy a nagyobb nyomásarány mellett jelentősebb mértékű energiatermelés érhető el. A maximális 22 000 m³/h kapacitású gázátadó esetén nagyobb energiatermelés adódik, ha a végponti 0 °C-ra és 6 bar-ra történő redukálás 55 bar érkező nyomásról valósul meg, nem pedig a legminimálisabb 25 bar nyomásról, hiszen ekkor értelemszerűen nagyobb mennyiségű hideg energia nyerhető ki a turbó-expander gázátadó állomáson történő elhelyezésének segítségével.

A modellszámítások alapján megállapítható, hogy a turbó-expanderes gépegyesek elhelyezése a nagy érkező nyomással és nagy maximális terheléssel jellemezhető gázátadó állomásokon célszerű, hiszen ekkor nyerhető ki a legnagyobb mennyiségű hideg energia a nyomásssabályozó folyamatokból. Bár ekkor nagy teljesítmény szükséges a gáz előmelegítő-körfolyamatban, de a gázfűtőkazánt saját felhasználású, olcsó áron elszámolható földgázzal ellátva, jelentős energiátöbblet jellemzi a folyamatot, főként ha a földgáz magas hőmérséklettel érkezik a gázipari létesítményhez.

5.3. Az egy- és két turbó-expander gépegyessel megvalósuló nyomásssabályozás összehasonlító vizsgálata

Ebben az alfejezetben az előzőekhez hasonló módon végeztük el az elemzést azzal a különbséggel, hogy a számításoknál a 8. ábrán látható modellt kellett figyelembe venni. A korábbi vizsgálatokból látható volt, hogy turbó-expander alkalmazása során nagy nyomáskülönbség esetén a turbó-expander előtt a földgáz hőmérsékletét 100 °C-ot megközelítő, esetenként meghaladó értékre kellett melegíteni. Ez nagy hő-veszteséget eredményezhet a gáz-előmelegítő rendszerben. Az előzőek szerinti hő-veszteség csökkentésére kézenfekvőnek látszott, hogy a nyomásscökkentésre ne egy, hanem két lépésben kerüljön sor. Természetesen ez többlet költséget jelent, mivel két turbó-expanderre és két hőcserélőre van szükség. Azzal lehetett a folyamat hatékonyságán javítani, hogy a turbó-expanderek előtt lévő hőcserélőket nem sorba, hanem párhuzamosan kapcsoltuk.

Az előzőeknek megfelelően a gázáram nyomásscökkentése két turbó-expanderrel is elvégezhető. A modelltől látható, hogy az első turbó-expander után a

nyomás lényegesen nagyobb a 6 bar-os értéknél, de arra ügyelni kell, hogy az áramló gáz hőmérséklete ebben a köztes pontban sem csökkenhet $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alá. A modellvizsgálatok során a két hőcserélő vízáramát azonos nagyságúnak vettük fel, azaz a kazánból kilépő vízáramot 50-50 %-ban osztottuk meg a két hőcserélő irányába. A második hőcserélőben az áramló gáz hőmérsékletét akkor értékre kell növelni, hogy a második turbó-expander kimeneti pontján a földgáz nyomása 6 bar és $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ legyen.

Az alábbiakban tehát a legfontosabb célkitűzés azt meghatározni, hogy energetikai szempontból érdemes-e két turbóexpander gépegyeség beépítése egy egység helyett a nyomásszabályozás feladatát ellátó gázátadó állomásokon.

5.3.1. Nagy kapacitású, nagy érkező nyomású gázátadó állomás vizsgálata

Elsőként a nagy kapacitással és nagy érkező nyomással rendelkező Gázátadó-I. jelű kategóriájú állomás típus vizsgálata kerül bemutatásra. Az előzőleg meghatározott gázátadó állomás típusok felhasználásával valósul meg ebben az esetben is az energetikai analízis, amely során az előzőleg bemutatott, egy turbóexpander gépegyeség beépítése mellett jelentkező értékek lettek összehasonlítva azzal a változattal, ha már 2 gépegyeség elégíti ki a nyomásszabályozás feladatát.

A 8. táblázatban a nagy maximális terhelésű gázátadó állomások esetén meghatározott szállítási tartomány 2 szélső értéke került bemutatásra: $10\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ és $22\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ mennyiségek, amelyekhez a már ismertett nyomástartomány 2 szélső értékéhez: 45 bar és 55 bar nyomásokhoz tartozó értékek kerültek feltüntetésre. Ezen kiválasztott feltételek mellett is egyértelmű következtetések vonhatóak le az egy- és két turbó-expanderrel történő nyomáscsökkentő folyamat elméleti energetikai modelljének felállításakor. Feltüntetésre kerültek az eddig bemutatott paramétereken túl a földgáz előmelegítő-körfolyamatának fizikai adatai is, mint a rendszerben keringő vízmennyiség m^3 -ben, illetve annak hőmérséklete $^{\circ}\text{C}$ -ben kifejezve.

8. táblázat: Az egy - és két turbó-expanderrel megvalósított nyomásszabályozás összehasonlítása nagy nyomású és nagy kapacitású gázátadó állomáson

		45 bar				55 bar			
		Q=10 000 m ³ /h		Q=22 000 m ³ /h		Q=10 000 m ³ /h		Q=22 000 m ³ /h	
	Mérték-egység	1 Exp.	2 Exp.	1 Exp.	2 Exp.	1 Exp.	2 Exp.	1 Exp.	2 Exp.
T= 4 °C									
Kazán teljesítmény	kW	519,0	485,0	1143,0	1072,0	595,0	556,0	1318,0	1226,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,48	1,10	0,72	1,22	0,53	1,30	0,75	1,21
Össz. ráfordítás	kW	519,48	489,10	1143,72	1073,22	595,53	557,30	1318,75	1227,21
Megtermelt energia	kW	433,0	404,0	953,0	882,0	481,0	444,0	1068,0	978,0
Különbség	kW	86,48	85,10	190,54	191,22	114,53	113,30	250,75	249,21
Hőcserélő közeg térf.	m ³	11	30	17	32	13	34	17	31
Hőcserélő közeg hőm.	°C	127	70	155	80	151	76	163	89
T= 8 °C									
Kazán teljesítmény	kW	499,0	466,0	1099,0	1027,0	573,0	535,0	1265,0	1180,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,49	0,90	0,71	1,22	0,53	1,10	0,71	1,20
Össz. ráfordítás	kW	499,49	466,90	1099,71	1028,22	573,53	536,10	1265,71	1181,20
Megtermelt energia	kW	433,0	404,0	953,0	882,0	481,0	444,0	1068,0	978,0
Különbség	kW	66,49	62,90	146,71	146,22	92,53	92,10	197,71	203,20
Hőcserélő közeg térf.	m ³	11	24	17	32	13	29	17	31
Hőcserélő közeg hőm.	°C	127	70	155	79	150	74	162	89
T= 12 °C									
Kazán teljesítmény	kW	479,0	446,0	1054,0	982,0	552,0	514,0	1211,0	1134,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,49	0,90	0,70	1,22	0,52	1,00	0,70	1,19
Össz. ráfordítás	kW	479,49	46,15	1054,70	983,22	552,52	515,00	1211,70	1135,19
Megtermelt energia	kW	433,0	404,0	953,0	882,0	481,0	444,0	1068,0	978,0
Különbség	kW	46,49	46,15	101,70	101,22	71,57	71,00	144,70	157,19
Hőcserélő közeg térf.	m ³	11	23	17	32	13	27	17	31
Hőcserélő közeg hőm.	°C	125	68	153	79	150	74	160	89

Megfigyelhető, hogy egy helyett két darab turbóexpander gépegység beépítése esetén csökkenő tendenciát mutat a földgáz előmelegítéséhez használt gáz-előmelegítő kazán teljesítménye. Egy példán keresztül bemutatva, 10 000 m³ órai földgázmennyiség esetében, 45 bar érkezőnyomás és 4 °C mellett 485,0 kW a kazáneljesítmény 2 gépegység üzemelése esetén, ami 7 %-kal kevesebb, mint az egy gépegység üzemelése mellett jelentkező 519,0 kW-os teljesítmény. Ez amiatt jelentkezik, mert az előmelegítő-körben keringetett víz 2 egyenlő részre lett szétválasztva, így nem volt szükséges olyan magas hőmérsékletre melegíteni az adott vízmennyiséget a hőcserélőn keresztül történő hőátadáshoz, mint ha csak egy hőcserélőn kellene keresztüláramolnia a hőátadásra szolgáló közegnek. Az is látható a táblázatban szereplő adatokból, hogy egy turbó-expander üzemelése esetében jóval kisebb térfogatú víz kerül keringetésre a földgáz előmelegítésére szolgáló rendszerben, mint 2 gépegység esetében. Számszerűsítve kb. 40-50 %-kal kevesebb fűtővíz szükséges az előbbi esetben, viszont ekkor jóval nagyobb értékre történik a keringő víz hőmérséklet emelése, ami minden esetben 50-55 %-kal nagyobb értéket jelent, ha egy gépegység végzi el a nyomáscsökkentés folyamatát.

Az egyik legmértékadóbb paraméternek az energiatermelés tekinthető. Összehasonlítva, bármely feltüntetett esetben megállapítható, hogy 2 db turbó-expander üzembeállításával 8 %-kal kevesebb energia termelhető meg, mint egy gépegység üzemeltetésével. Ez azzal magyarázható, hogy mivel kisebb hőmérsékleten érkezik a földgáz a turbó-expanderhez, ezért kisebb mennyiségű hideg energia nyerhető ki a nyomásszabályozó folyamat során.

Megállapítható tehát, hogy nagy nyomáson és nagy szállítási feladat esetén nem érdemes két turbó-expander sorbakapcsolásával elvégezni az elosztórendszerbe történő betápláláshoz szükséges szabályozás feladatát, hiszen jóval kisebb energiamennyiség állítható elő, mintha csak egy turbó-expanderrel történne meg a nyomásszabályozó berendezés kiváltása.

5.3.2. Közepes kapacitású gázátadó állomás vizsgálata

Az előre meghatározott gázátadó állomás típusok között a közepes, 3 000 és 6 000 m³ órai kapacitások esetén is elvégeztük a vizsgálatok abból a célból, hogy meghatározásra kerüljön, hogy egy- vagy két expanziós turbina beépítése költséghatékonyabb energetikai szempontból. A vizsgálatok közepes érkező nyomásértéken, 35 bar és 40 bar nyomáson lettek elvégezve. Az eredmények a 9. táblázatban kerültek összefoglalásra.

9. táblázat: Az egy - és két turbóexpanderrel megvalósított nyomásszabályozás összehasonlítása közepes nyomású és közepes kapacitású gázátadó állomáson

	Mértékegység	35 bar				40 bar			
		Q=3 000 m ³ /h		Q=6 000 m ³ /h		Q=3 000 m ³ /h		Q=6 000 m ³ /h	
		1 Exp.	2 Exp.	1 Exp.	2 Exp.	1 Exp.	2 Exp.	1 Exp.	2 Exp.
T= 4 °C									
Kazán teljesítmény	kW	130,0	107,0	259,0	243,0	143,0	133,0	286,0	268,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,35	0,50	0,41	0,81	0,42	0,70	0,48	1,0
Össz. ráfordítás	kW	130,35	107,50	259,41	243,81	143,42	133,70	286,48	269,00
Megtermelt energia	kW	113,0	96,0	225,0	210,0	122,0	114,0	244,0	226,0
Különbség	kW	17,35	11,50	34,41	33,81	21,42	19,70	42,48	43,00
Hőcserélő közeg térf.	m ³	9	16	10	21	10	18	10	25
Hőcserélő közeg hőm.	°C	103	56	110	59	110	60	120	58
T= 8 °C									
Kazán teljesítmény	kW	124,0	101,0	248,0	220,0	137,0	128,0	275,0	256,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,35	0,50	0,39	0,70	0,43	0,53	0,51	0,91
Össz. ráfordítás	kW	124,35	101,50	248,39	220,70	137,43	128,53	275,51	256,91
Megtermelt energia	kW	113,0	96,0	225,0	210,0	122,0	114,0	244,0	226,0
Különbség	kW	11,35	5,50	23,39	10,70	15,43	14,53	31,51	30,91
Hőcserélő közeg térf.	m ³	9	12	10	20	10	16	10	23
Hőcserélő közeg hőm.	°C	102	47	110	54	110	57	120	58
T= 12 °C									
Kazán teljesítmény	kW	118,0	95,0	236,0	220,0	131,0	122,0	263,0	244,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,35	0,48	0,40	0,70	0,45	0,50	0,54	0,82
Össz. ráfordítás	kW	118,35	95,48	236,40	220,70	131,45	122,50	263,54	244,82
Megtermelt energia	kW	113,0	96,0	225,0	210,0	122,0	114,0	244,0	226,0
Különbség	kW	5,35	-0,48	11,40	10,70	9,45	8,50	19,54	18,82
Hőcserélő közeg térf.	m ³	9	14	10	20	10	15	10	22
Hőcserélő közeg hőm.	°C	102	40	109	54	109	56	119	58

Az előzőleg tett megállapításokhoz hasonlóan ebben az esetben is elmondható, hogy két gépegység beépítésével nem érhető el nagyobb energiatermelés, amely a zöld színnel jelzett sávban olvasható le. Az alacsonyabb földgázkapacitások és érkező nyomások következtében már az előmelegítő rendszerben kisebb térfogatú hőcserélő közeg szükséges, ahol például 35 bar nyomáson és 3 000 m³/h mennyiségű földgázterhelés esetében 9 m³ víz elegendő a keringető rendszerben, ami 7 m³-rel kevesebb, mint két turbóexpanderrel megvalósított kivitelezés esetén. Szintén elmondható, hogy utóbbi esetben viszont 103-120 °C vízhőmérséklet elérése bizonyult elégséges feltételnek 0 °C és 6 bar gázátadó végponti kritériumok teljesítéséhez, ami két expander beépítése esetében csupán ennek fele, 40-58 °C-nak adódott. A megtermelhető energiameennyiségek mérlege ezen gázátadó állomás típus esetében is az egy turbó-expanderrel megvalósított üzemmenetnek kedvez, ahol szinte minden esetben 5-7 %-kal több hideg energia nyerhető ki a nyomáscsökkentő folyamatból.

5.3.3. Kis érkező nyomású, kis kapacitású gázátadó állomás vizsgálata

Megállapításra került, hogy a nagy- és közepes földgázterheléssel és érkező nyomással rendelkező gázátadó állomásokon célszerűbb kettő turbó-expander helyett csupán egy gépegyeséggel kiváltani a hagyományos nyomásszabályozó berendezéseket. Ez a vizsgálat a harmadik kategóriára (Gázátadó-III.), a kis kapacitású, kis érkező nyomású gázátadó állomásra is elkészült, amelynek eredményeit a 10. táblázat foglalja össze.

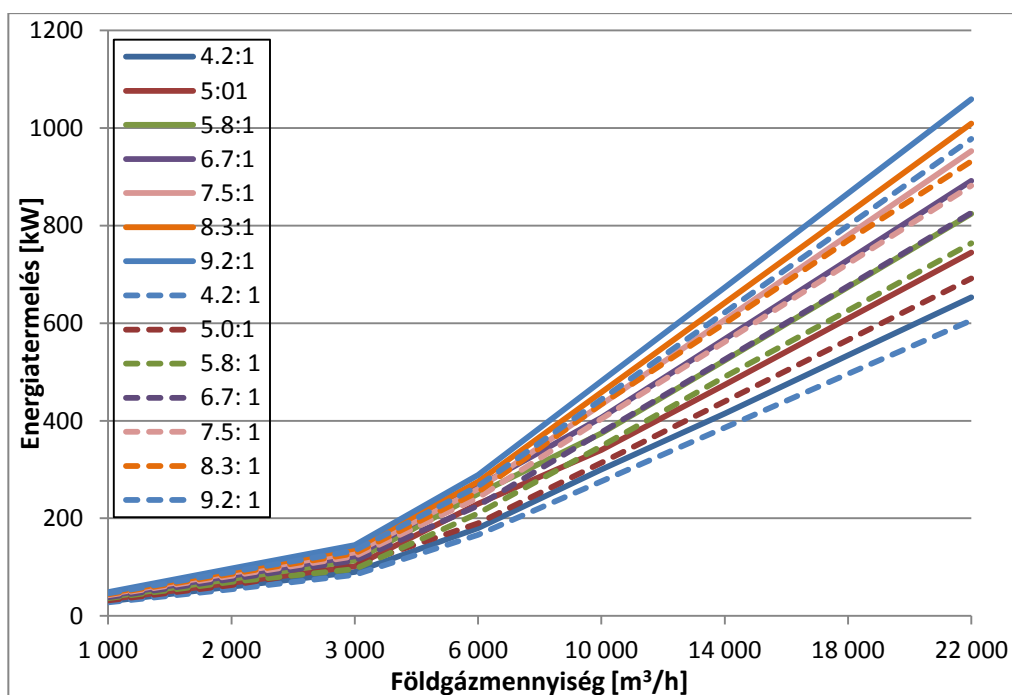
10. táblázat: Az egy- és két turbóexpanderrel megvalósított nyomásszabályozás összehasonlítása kis nyomású és kis kapacitású gázátadó állomásokon

	Mértékegység	25 bar				30 bar			
		Q=1 000 m ³ /h		Q=2 000 m ³ /h		Q=1 000 m ³ /h		Q=2 000 m ³ /h	
		1 Exp.	2 Exp.	1 Exp.	2 Exp.	1 Exp.	2 Exp.	1 Exp.	2 Exp.
T= 4 °C									
Kazán teljesítmény	kW	33,0	29,0	65,0	61,0	38,0	35,0	76,0	71,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,20	0,81	0,22	0,82	0,22	0,61	0,22	0,83
Össz. ráfordítás	kW	33,20	29,81	65,22	61,82	38,22	35,61	76,22	71,83
Megtermelt energia	kW	30,0	28,0	60,0	55,0	34,0	32,0	68,0	63,0
Különbég	kW	2,20	1,81	5,22	6,82	4,22	3,61	8,22	8,83
Hőcserélő közeg térf.	m ³	5	27	6	22	5	17	7	22
Hőcserélő közeg hőm.	°C	80	54	85	52	90	50	91	52
T= 8 °C									
Kazán teljesítmény	kW	31,0	28,0	61,0	55,0	37,0	33,0	74,0	65,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,20	0,81	0,20	0,80	0,22	0,45	0,21	0,82
Össz. ráfordítás	kW	31,20	28,81	61,20	55,80	37,22	33,45	74,21	65,82
Megtermelt energia	kW	30,0	28,0	60,0	55,0	34,0	32,0	68,0	63,0
Különbég	kW	1,20	0,81	1,20	0,80	3,22	1,45	6,21	2,82
Hőcserélő közeg térf.	m ³	5	14	6	22	5	11	6	22
Hőcserélő közeg hőm.	°C	78	38	82	52	89	44	89	50
T= 12 °C									
Kazán teljesítmény	kW	30,0	27,0	60,0	53,5	35,0	33,0	70,0	62,0
Szivattyú teljesítmény	kW	0,20	0,40	0,20	0,78	0,21	0,35	0,19	0,80
Össz. ráfordítás	kW	30,20	27,40	60,20	54,28	35,21	33,35	70,19	62,80
Megtermelt energia	kW	30,0	28,0	60,0	55,0	34,0	32,0	68,0	63,0
Különbég	kW	0,20	0,60	-0,20	-0,72	1,21	0,65	2,19	-0,20
Hőcserélő közeg térf.	m ³	5	10	6	22	5	10	6	19
Hőcserélő közeg hőm.	°C	78	38	81	52	89	44	89	44

Megfigyelhető, hogy ezen feltételek mellett sem billen az energiamérleg a két turbó-expanderrel üzemelő nyomásszabályozó ág oldalára. Minden vizsgált változat esetén az egy gépegyeség segítségével kinyerhető hideg energia jelent nagyobb energiamennyiséget. Habár már a kis szállítási mennyiségek és nyomások hatására 2 – 5 kW különbségek jelentkeznek az egy- és két turbó-expanderes megoldás között -

természetesen az előbbi javára -, az még mindig kb. 7 %-os eltérést jelent a két érték esetében. A kis földgázkapacitás miatt már az egy turbó-expanderrel ellátott nyomásszabályozó ágon is 100 °C alá csökken a előmelegítő-körben keringetett közeg indító hőmérséklete.

A 11. ábrán összefoglalásként az egy- és két turbó-expanderrel megvalósuló energiatermelés mennyisége látható az érkező és a végponti (6 bar) nyomásarányok függvényében. A függőlegesen tengelyen a megtermelt energia olvasható kW-ban kifejezve, amíg a vízszintes tengelyen a gázátadó állomások maximális terhelhetősége került jelölésre, m³/h –ban.



11. ábra: Az egy – és két turbó-expanderrel megvalósuló energiatermelés

A jelmagyarázatban szereplő nyomásarányok között az egyenes vonallal jelölt az egy gépegység, míg a szaggatott vonallal jelölt a 2 gépegység esetén megtermelhető elméleti energiámmennyiséget ábrázolja. Az azonos nyomásarányal történő nyomáscsökkentő folyamat azonos színnel lett jelölve, egyenes és szaggatott vonallal. Az ábrát elemezve látható, hogy a legalsó, tehát legalacsonyabb érkező nyomásról (25 bar) 6 bar-ra történő leszabályozás esetében már jól elkülönül a megtermelt energia mennyisége az egy- és a két gépegységgel történő nyomáscsökkentés

esetében, ahol természetesen az előbbi esetben állítható elő nagyobb energiamennyiség (sötétkék egyenes vonal). Ugyanez elmondható a bordó színnel jelzett, 30 bar érkező nyomású gázátadó állomások esetén. A 40 bar érkező nyomásról 6 bar-ra törő szabályozás esetében már egy érdekes dolog figyelhető meg (lila szín), a két sorbakapcsolt turbó-expanderrel előállítható energiamennyiség egy egyenesre esik az 5 bar-ral kisebb, azaz 35 bar érkezőnyomású, egy db turbó-expanderrel üzemelő gázátadó állomás energiatermelésével. 50 és 55 bar-ról a végponti feltételre történő csökkentő folyamat esetében már elmondható, hogy a 2 turbó-expanderrel kinyerhető hideg energia még az annál 5 bar-ral kisebb érkező nyomású, egy expanderrel történő energiatermeléstől is nagymértékben elmarad.

Összefoglalásként egyértelműen kijelenthető, hogy habár a 2 gépegységgel ellátott folyamatban kisebb hőmérsékletek szükségesek a hőcserélő közeg esetében, viszont kb. 50 %-kal nagyobb víztérfogatra van szükség. Emellett a legfontosabb szempont, hogy egy turbó-expander gépegységgel nagyjából 7 %-kal több energia nyerhető ki a gázátadó állomáson történő nyomáscsökkentő folyamatból, mint két gépegység alkalmazásával.

6. Összefoglalás

A gázátadó állomásokon telepített nyomásszabályozók turbó-expanderekkel való kiváltása nem újkeletű dolog, már az 1980-as évek óta alkalmazzák. A izentrópikus nyomásszabályozó folyamat során kinyerhető hideg energiát felhasználva, hozzákapcsolt generátor segítségével villamos energia állítható elő, melynek felhasználása széleskörű.

Jelen tanulmányban vizsgálat alá vontuk a hazai gázátadó állomásokon telepített turbó-expanderek energetikai hatékonyságát, amelyhez a HYSYS szimulációs szoftvert alkalmaztuk. Alapfeltételnek tekintettük az ÜKSZ-ben megfogalmazott $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ és 6 bar kritériumok teljesítését annak érdekében, hogy a gázátadó állomásról szabályozott keretek között valósuljon meg a nagyközép nyomású elosztói hálózatba történő betáplálás. A szimuláció két modell segítségével valósulhatott meg, egy illetve két turbó-expanderes gépegység szabályozó ágon való telepítésével. Mindkét esetben – az összehasonlíthatóság érdekében - párhuzamos szabályozó ágon valósult meg a hagyományos nyomásszabályozó szelep működése.

A dolgozatban megállapítottuk, hogy a nyomásszabályozó szelepek kiváltása nagy érkezőnyomású, nagy terhelésű gázátadó állomásokon érdemes. Nagy ($22\ 000\ \text{em}^3/\text{h}$) szállítási feladat esetén akár 1 MW elméleti energia is kinyerhető a nyomásszabályozó folyamatból. Közepes- és kis érkezőnyomású és kapacitású állomások esetében viszont kisebb mértékű energiatermelés jelentkezik, amelyek miatt nem célszerű a turbó-expanderek telepítése.

Megállapítottuk, hogy a turbó-expanderes nyomásszabályozás – mivel izentrópikus folyamatról van szó – nagyon nagy hőmérsékleteket igényel a gépegység előtt annak érdekében, hogy teljesülhessen a kimenő oldali $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Emiatt a földgázt nagyobb hőmérsékletre kell melegíteni, mint az izentalpikus fojtás esetében. Így az előmelegítésre szolgáló fűtőkazán jóval nagyobb teljesítményt igényel, mint a szabályozó szeleppel való szabályozás esetében. Mivel gázfűtőkazánokról van szó, nem villamosenergiát használ fel, hanem saját felhasználási célú gázt.

Vizsgálat alá vontuk azt az esetet is, ha két expanziós turbinával valósul meg a nyomásszabályozás. Egyértelműen kijelenthető, hogy két gépegység mellett kisebb energiamennyiség termelhető meg. A melegítő közeg szétválasztása miatt kisebb

hőmérsékletek jelentkeztek, azaz kisebb teljesítménnyel üzemelt a gázfűtőkazán, viszont ebből kifolyólag a kinyerhető hideg energia mennyisége is csökkent.

Az expanziós turbinák gázátadókon való elhelyezése egyre elterjedtebb a világban, számos példa szolgál bizonyítéku. Egyre több projekt és tanulmány foglalkozik a témával világszerte, hiszen a folyamatban rejlő látens energia kinyerése energiagazdálkodási szempontból indokoltnak látszik.

7. Irodalomjegyzék

1. A Magyar Földgázrendszer Üzemi és Kereskedelmi Szabályzata (2015) Letöltve:https://fgsz.hu/sites/default/files/dokumentumok/jogszabalyok/publikalt_torz_6454-2015_mekh_hat_alapjan.pdf
2. Bisio, G. (1995) Thermodynamic Analysis of the Use of Pressure Exergy of Natural Gas, Energy folyóirat, 20. évf. 2. szám, 161-167.o.
3. Bloch, H. – Soares, C. (2001) Turboexpanders and Process Applications, Gulf Professional, ISBN 978-0-88415-509-6
4. Csete, J. (2010) A földgázellátó rendszer felépítése és működése; file:///C:/Users/Bella/Downloads/EPGEP_2010_11_16_Csete_Jeno_eloadas_2010%20.pdf
5. Degado-Calin, G. (2010) Turboexpanders Application to Power Generation in the Natural Gas Expansion, Letöltve:
6. Elsobki, M. (2014) Boosting Capacity of Electric Generation through the use of Turbo-Expanders in Natural Gas Network, Egyptian German High Level Joint Committee for Renewable Energy, Energy Efficiency and Environmental Protection
7. Farzaneh, M.-Manzari, M.-Magrabi, M.-Hahemi, S. (2007) Using pressure exergy of natural gas in Bandar-Abbas refinery gas pressure drop station, The second International conference on Modeling, Simulation, And Applied optimization, Abu Dhabi
8. Interstate Natural Gas Association of America (2008) Waste Energy Recovery Opportunities for Interstate Natural Gas Pipelines, Letöltve: <http://www.ingaa.org/file.aspx?id=6210>
9. Pozivil, J., 2004, Use of Expansion Turbines in Natural Gas Pressure Reduction Stations, Acta Montanistica Slovaca 9(3), 258-260. o.
10. Rahman, M. (2010) Power generatio from pressure reduction in the natural gas supply chain in Bangladesh, Journal of Mechanical Engineering, 41. évf. 2. sz., 89-95. o.
11. Rheuban, J. (2009) Turbo-Expanders, Harnessing the Hidden Potential of Our Natural Gas Distribution System, Letöltve: <http://iacobrheuban.com/2009/03/09/turboexpanders-harnessing-the-hidden-potential-of-our-natural-gas-distribution-system/>
12. Tihanyi, L. – Zsuga, J. (2012) Földgázszállító rendszerek tervezése és létesítése; Miskolci Egyetem, ISBN 978-963-661-999-2
13. Tihanyi, L. – Chován, P. (2015) Gázszállító rendszerek energetikai elemzése, Magyar Energetika, 22. évf. 4. sz., 40-43. o.