

# Geotermikus távhőszolgáltatás és villamosenergia-termelésre alkalmas egység modellje

## Geothermal district heating and electricity generation unit model

GIANONE János<sup>1</sup>, Dr IMRE Attila<sup>2</sup>

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék,  
[gianone.janos@eszk.org](mailto:gianone.janos@eszk.org) (hallgató), [imreattila@energia.bme.hu](mailto:imreattila@energia.bme.hu) (tanszékvezető)

### Abstract

*The research topic is built around the study of geothermal systems, with a focus on the parallel production of electricity and district heating. Electricity generation offers the possibility of high plant utilisation during periods of low heat demand. A system of distributed generation points optimised for both types of production will be presented.*

**Keywords:** geothermal, heat source, ORC, district heating, electricity generation

### Kivonat

*Geotermikus hőforrás egyidejű használata villamosenergia-termelésre és távhőszolgáltatásra. A kutatási terület a geotermikus rendszerek tanulmányozása köré épül, különös tekintettel a villamos energia és a távfűtés párhuzamos termelésére. A villamosenergia-termelés lehetőséget kínál a magas üzemkihasználtságra az alacsony hőigényű időszakokban. Mindkét termelési típusra optimalizált, elosztott termelési pontokból álló rendszer kerül bemutatásra.*

**Kulcsszavak:** geotermikus, hőforrás, ORC, távhő, villamosenergia-termelés

Napjainkban a fenntarthatóság kiemelkedően fontos társadalmi és szakpolitikai elvárás, mely az energiaszektor elé komoly kihívásokat állít a villamosenergia-termelésben. Cél a fenntartható energiatermelés oly módja, ahol a termelés kiszámítható, az ellátás állandó és a kibocsátás minimális, valamint előnyös, ha a termelés elosztott. Magyarországon a geotermikus energia kedvező adottságú energiaforrásnak számít a fent felsoroltak alapján, éppen ezért logikus bevonni a villamosenergia-termelésbe. Ugyanakkor a természetes hőforrást elsődlegesen hőigények kielégítésére célszerű és hatékonyabb használni, amennyiben arra van igény. A villamosenergiát szerves Rankine-cikluson (ORC) alapuló berendezéssel lehet megtermelni, mivel a hagyományos villamosenergia-termelésre alkalmatlan a geotermikus hő a közeg alacsony entalpiája miatt. Az elsődleges tervek alapján számos ilyen berendezést lehetne összekapcsolni, melyek egyben távhőrendszerként is tudnának üzemelni amellet, hogy saját villamos igényükkel párhuzamosan más fogyasztókat is képesek kiszolgálni. Az ily módon megalkotni kívánt rendszer más-más tulajdonsággal rendelkező kutakat tartalmazhat, ami miatt célszerű egy olyan környezet kialakítása, mely a bemeneti paraméterek alapján képes az egyes telephelyekre tervezendő erőművek sajátosságait megbecsülni. Az elemzés kifejezetten Magyarországra vonatkozik, ahol a területi vizsgálatok földtani adatokon, vagyis a termálvíz elérhetőségén, valamint a fogyasztási igényeken alapszanak. Fontos a hő és villamosenergia termelés arányának meghatározása optimumkereséssel, mely az egyes rendszercsoportok esetében eltérően alakulhat. A vizsgálat, valamint számítási metódus elkészítésének célja új geotermikus erőmű telepítésének előkészítése, mely távhőt és villamosenergiát szolgáltat párhuzamos üzemben.

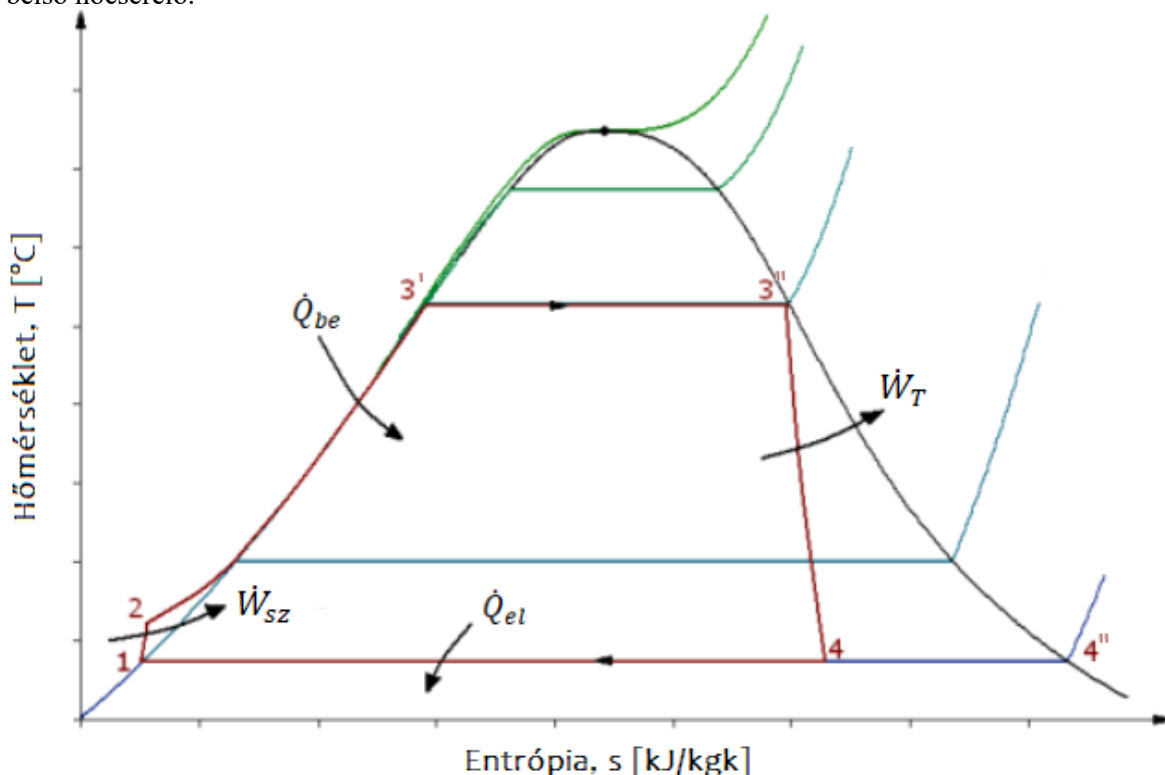
## 1. A HŐFORRÁS HASZNOSÍTÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI

### 1.1. Villamosenergia-termelés – szerves Rankine-ciklus technológiai

A szerves Rankine-körfolyamat (ORC) egy páratlan műszaki megoldás az alacsony és közepes (50–340 °C) hőmérsékletű, korlátozott kapacitású hőforrásokból történő villamos energia előállítására. Ezen alacsony hőmérsékletű és entalpiájú hőforrásokból szerves Rankine-cikluson alapuló erőművekkel lehet átalakítani a hőt villamos energiává. A hő forrása eltérő lehet: előfordulhat geotermikus kútból származó termálvíz, napenergiából származó hő, valamiféle hővisszanyerés alapú hő, akár biomassa, de még hulladék hő is. Ezen hőforrásokat ideális esetben alacsony hőmérsékletű hőt igénylő folyamatokhoz, akár az iparban, de legelterjedtebben távhőként vagy hévízes fürdőkben használják fel. Azonban gyakran az igények nem helyben jelentkeznek vagy a helyi igények kiszolgálásánál jóval nagyobb mennyiségű potenciál áll rendelkezésre. Ez esetben a hőforrást, célszerű úgy átalakítani és olyan terméket létrehozni belőle, amit aztán máshol is fel lehet használni. Energiaátalakítás során a hőből először valamilyen hőerőgéppel mechanikai energiát, majd abból generátorral villamos energiát állítanak elő, aminek szállításához és kereskedéséhez létező infrastruktúra és piac áll rendelkezésre. Jellemzően a hőforrás minőségileg nem ad lehetőséget a klasszikus Rankine-ciklus használatára, vagyis a geotermikus (vagy más) hő hőmérséklete nem éri el azt a kritikus hőmérsékletet, amivel a célszerű lenne a tradicionális körfolyamatot alkalmazni. Így kerül előtérbe az ORC rendszer, melyben a hagyományos víz-gőz munkaközeg helyett olyan szerves anyagot használnak, melynek forráspontja a víz forráspontja alatt található.

## 1.2. Az ORC technológia felépítése

A szerves Rankine-körfolyamat (ORC) egy páratlan műszaki megoldás az alacsony és A szerves Rankine-körfolyamat termodinamikai értelemben gyakorlatilag egyenértékű a Rankine-körfolyamattal, vagyis az adiabatikus kompresszió (1-2) után izobár hőbevezetés (2-3), majd adiabatikus expanzió (3-4) és végül izobár hőelvonás (4-1) történik. Emiatt a berendezés főbb építő elemei sokban hasonlítanak a hagyományos gőzkörfolyamatok berendezéseire. Ugyanakkor túlhevítő nem található meg ezen rendszerekben, valamint a turbinán sincsen megcsapolás. Az utóbbinak az az oka, hogy a munkaközeg jellegéből adódóan nincsen szükség a fajlagos gőztartalom csökkentésére általában, így a teljes tömegáram keresztüláramlik a turbinán, amit ebben az esetben jellemzően expandernek hívunk. Ugyanakkor előmelegítő ebben az esetben is gyakran előfordul, amit gyakran belső hőcserélő beépítésével oldanak meg. A belső hőcserélő a kondenzátor előtt helyezkedik el és akkor alkalmazható, ha az expanzió a száraz (gáz) mezőben ér véget. Ekkor az izobár hűtést a telített gőz fázist egy olyan hőcserélővel oldják meg, ami a kompresszor (szivattyú) utáni előmelegítést végzi, ez a belső hőcserélő.



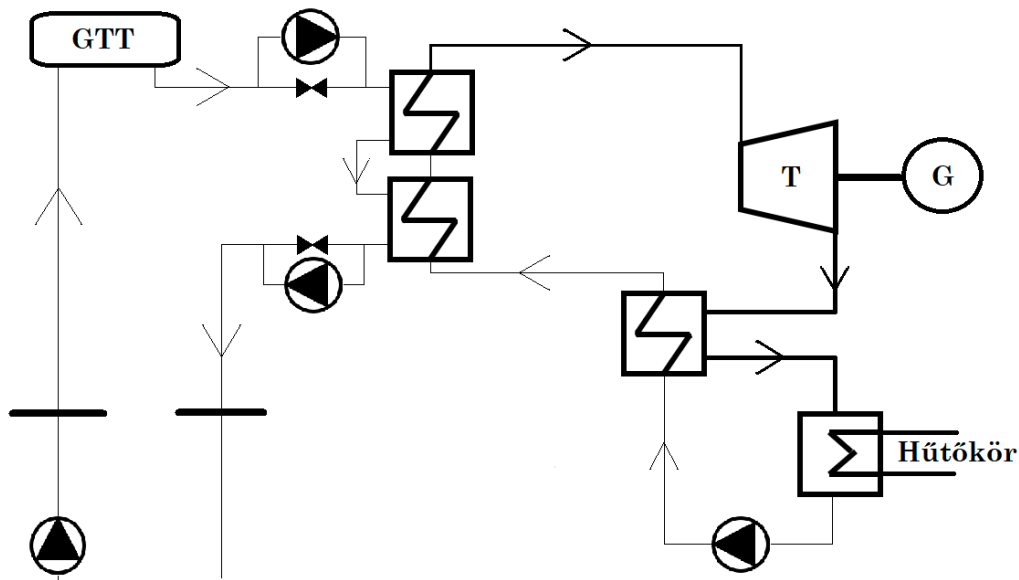
1. ábra: ORC körfolyamat a T-s diagrammja [1]

Az ORC berendezések „kazánja” egy köpenyes hőcserélő, ennek feladata a hőforrás hőjének közlése közvetett módon a munkaközeg felé. A frissgőz mindig telített gőz fázisú. A hőcserélő után az expander van

kötvé, melyen a munkaközeg expandál, létrejön a tengelyteljesítmény, amivel a generátort meg lehet forgatni, és ezen keresztül áramot lehet termelni. Ezután a közeget a kondenzátorba kell vezetni, ahol a szerves munkaközeg a hőelvonás hatására cseppfolyós fázisba kerül. A legutolsó, alapvetően szükséges eleme egy ORC-nek a szivattyú, melynek feladata a nyomásnövelés, kondenzációs nyomásról a hőbevezetés nyomására. Ezek mellett egy ilyen rendszert is számtalan kiegészítéssel, szükség esetén belső hőcserélővel, különböző kapcsolásokkal, biztonsági és a különböző üzemvitel szempontjából fontos berendezéssel lehet felszerelni (2. ábra).

### 1.3. A geotermikus alapú áramtermelés egyéb berendezései

A szerves Rankine-ciklus két különböző hőmérsékletű közeg alkalmazásával képes áramot termelni, de a villamosenergia előállításához további rendszerek elhelyezése is szükségszerű. Ezen rendszereket két részre lehet bontani, egyrészt a hőforrás oldali – vagyis a geotermikus kútra közvetlen épített – rendszer, másrészt pedig a hűtőkör. Ezen felül természetesen a villamos alrendszer, valamint a szabályozási és biztonsági rendszerek. A geotermikus kút vizét kitermelő szivattyú az egyik, ha nem a legfigyelemigényesebb berendezés mindenféle geotermikus rendszerben. A szivattyút nyomásnövelése hozza a felszínre a hasznosítandó termálvizet, ugyanakkor ez a víz nem tiszta: szennyeződések, gázok találhatóak meg benne, ami a berendezést igénybe veszi. Emiatt nagyon fontos megfelelő minőségű szivattyút elhelyezni, hogy az élettartam ne csökkenjen. A szivattyú jellemzően 5-10 éves élettartammal rendelkezik, de a közegetől és a használat módjától nagyon függ a tönkremenetele. Egy-egy geotermikus rendszerben ezen (búvár)szivattyúkat a teljes élettartam alatt többször is cserélni kell. Azért is fontos megfelelően megválasztani ezt a szivattyút, mert jelentős áramfelvétellel rendelkezik, így nagyon fontos a megfelelő munkapontban járattani, így ezzel rengeteg energiát megspórolni az évek során. A víz felszínre hozása után a szennyeződések el kell választani, a gázokat le kell választani. Ezen lépés során ügyelni kell, hogy a leválasztott – sokszor üvegházhatású, illetve szennyező hatású – anyagok ne jussanak ki a környezetbe. Miután a gáztalanítás megtörtént, már be lehet vezetni a közeget a hőcserélőbe, ahol immár jó hatékonysággal adható le a hő. A visszasajtolás szintén szivattyúval történik az eredeti kúttól megfelelő távolságra (akár több kilométerre is, de jellemzően 1-2 km elegendő távolság). A hűtőkör – ahogy a hagyományos erőműveknél, úgy itt is – lehet frissvíz- vagy levegőhűtésű, de akár ezek kombinációja is. A hűtési rendszereknél figyelni kell a környezeti paraméterek határértéken tartására, ezért célszerű egy frissvízhűtést is kiegészíteni levegőhűtésű rendszerrel. A villamos alrendszer alatt a turbina után következő rendszereket értjük, vagyis ide tartozik a generátor és a hálózati kapcsolódáshoz szükséges minden villamos berendezés.

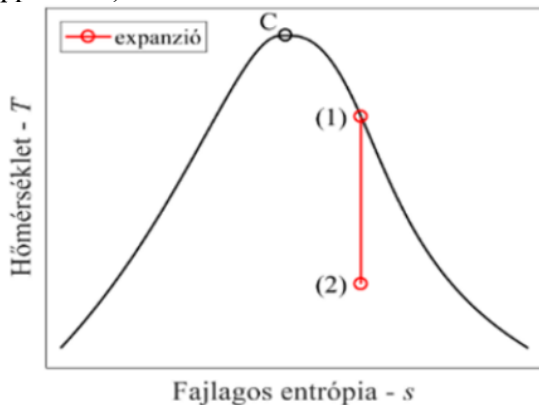


2. ábra: Geotermikus forrásra épült ORC kapcsolása (belső hőcserélővel)

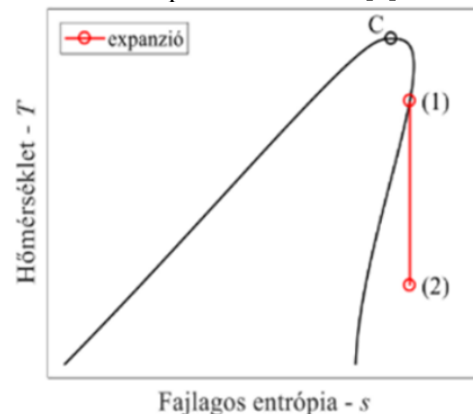
### 1.4. A munkaközeg

Az ORC elnevezésben a szerves jelző a munkaközeg típusára utal, ami ugyanakkor számos kivívást is jelent, mivel a szerves munkaközegek környezetükre gyakorolt hatása gyakran jelentősen eltér a víz-gőz körfolyamatban megszokottaktól. Ezen anyagok telítési görbéjének jellege nemcsak más alakú– amivel majd

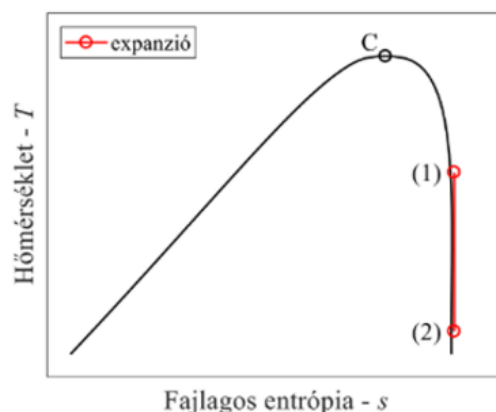
a munkaközeg kiválasztásánál lesz részletesen szó –, de ami lehetővé teszi az alacsony hőforrás használatát, az az alacsony elpárolgási hőmérséklet. Ez egy relatív fogalom, hiszen adott nyomáshoz tartozik egy adott szaturációs hőmérséklet. Viszont a víz-gőz munkaközeggel fenntarthatatlanul alacsony nyomáson kellene üzemelnie a rendszernek. A szerves közegeknél is figyelni kell ugyanakkor, hogy a kondenzátor nyomása ne legyen túlságosan alacsony. A szerves folyadékokat úgy választják ki, hogy az – a termodinamikai tulajdonságait tekintve – a lehető legjobban illeszkedjen a hőforráshoz, így mind a ciklus, mind az expander hatékonysága javítható. Ezen munkaközegek legtöbbször igen toxikus tulajdonságokkal rendelkeznek, emiatt szigorú szabályok és biztonsági előírások érvényesek használatukra. Ezenkívül figyelembe kell venni azt is, hogy a leszálló ágbeli adiabata vége belép-e a kétfázisú tartományba (száraz, nedves, vagy izentropikus munkaközeg), mert ekkor a nedvesség apró cseppek formájában jelentkezik és könnyedén erodálhatja a turbinalapátokat (csepp-erózió). Az adiabatikus szakaszok a T-s diagrammon különféle képet mutathatnak [1].



2. ábra: Nedves munkaközeg expanzíója [2]  
**Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**



3. ábra: Száraz munkaközeg expanzíója [2]  
**Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**



4. ábra: Izentropikus munkaközeg expanzíója [2]

Az elmúlt években a Budapesti Műszaki Egyetem néhány kutatója ugyanakkor honosította a munkaközeg új szerű osztályozását, melyben a fázisgörbén elhelyezett karakterisztikus pontok alapján adhatók meg a munkaközegek típusai. Az eddigi 3 karakterisztikus pontot kiegészítették további 2-vel, így ezen pontok entrópiáit sorba téve jóval több fajta közeg állapítható meg. Ezzel a típusú osztályozási rendszerrel – melyet jelen dolgozatban is alkalmaztam – a munkaközeg kiválasztása optimalizálható [2]. Tipikus munkaközegnek számítanak az egyenesláncú alkánok (pl. propán, bután...), valamint a legtöbb hűtőrendszerben alkalmazott közeg is (pl. R134a, R-123) [3]

### 1.5. A moduláris ORC

Manapság egyre több rendszerrel kapcsolatban lehet hallani moduláris egységek építéséről. Nincs ez másként az ORC-nél sem, hiszen ezen rendszerek gyakran kis teljesítmény leadására képesek, így nem mindig lehet a méretgazdaságossággal javítani a beruházás megtérülését. Ezzel szemben létezik, hogy kisebb egységeket egyben gyártanak le, így a gyártás meggyorsítása mellett, az erőmű összeszerelésekor is csak néhány blokkot kell illeszteni a hőforrásra. A kis beruházás hátránya ugyanakkor, hogy sokszor nagyon eltérő

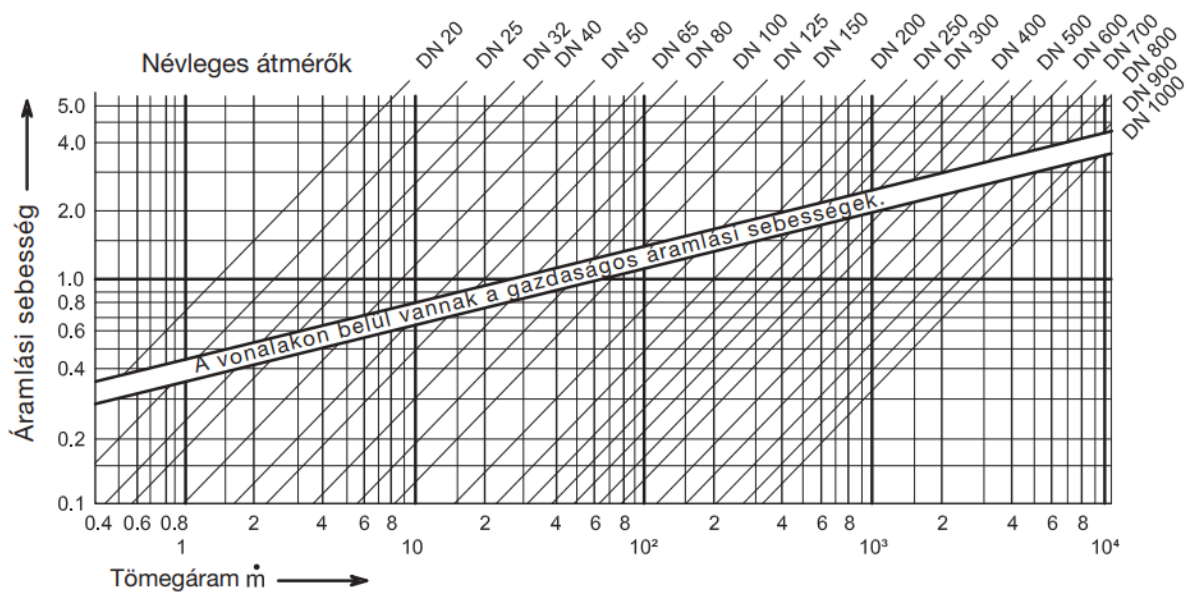
igényekkel találkoznak a fejlesztők. Ilyen kis egységek találhatóak Nagyváradon is, ahol az összteljesítmény 50 kWel, de van tehergépjárműhöz kötött rendszer is.

## 1.6. Megvalósult geotermikus projektek

A világ legnagyobb szerves Rankine-ciklusú (ORC) geotermikus erőműve az új-zélandi Ngatamariki, amely 2013 óta működik. A négy párhuzamosan beépített egységet az Ormat gyártotta, és összesen 96 MW elektromos teljesítménnyel rendelkezik. Ugyanakkor jelenleg építés alatt áll az ennél jóval nagyobb beépített teljesítménnyel rendelkező Sarulla, amely Indonéziában található, és ha elkészül, akkor a három egysége összesen 150 MW-ot fog a hálózatra termelni. Ez utóbbi erőművet is a nevadai székhelyű Ormat Technologies Inc. gyártotta, mely nemzetközi cég a világon a legnagyobb geotermikus energiaforrásra épülő ORC berendezéseit tervezi és építi. Ebből világosan látszik, hogy komoly potenciál rejlik a berendezésben, ugyanakkor nem csak hatalmas méretekben, de kisebb egységekben is. Jelenleg Magyarországon mindössze egy ilyen erőmű, a Turai Geotermikus erőmű termel a hálózatra villamos energiát. Ez az egy egység 3,35 MWel beépített villamos teljesítménnyel rendelkezik, de felmerült már az egység bővítése [4], [5].

## 1.7. A hőforrás felhasználása távhőszolgáltatásban, valamint kapcsolt termelés: távhő és villamosenergia párhuzamos szolgáltatása

A geotermikus energia hasznosításának legoptimálisabb módja, amikor a hőt hasznosítják. Ez a hőhasznosítás történhet valamilyen ipari vagy mezőgazdasági folyamatban, hiszen ez esetekben nagy mennyiségű hő szükséges egy helyen. Azonban ahol ilyen alkalmazása nincsen a hőforrásnak, ott a távhőszolgáltatás továbbra is fennmarad, mint opció. Bevett szokás, hogy geotermikus kutak hőjéhez kapcsolnak különböző technológiákat, de akár szolgáltatásokat is. Ipari folyamatok hőjének biztosítása mellett alkalmas üvegházak fűtésére, de kifejezetten a forrás lokációjához kötődnek például a termálfürdők. Ezek többnyire felemesztik a geotermikus kútból származó víz hőjének nagy részét, de van, hogy kisebb fogyasztói igényeket akarunk kiszolgálni. Ez esetben össze kell szedni a kút környezetében elegendő kisfogyasztót (intézményt, háztartást), amelyre érdemes a rendszert tervezni. Értelmszerűen, ha van kiépített távhőrendszer, akkor az tekinthető egy nagy fogyasztónak abban az értelemben, hogy nem kell a megvalósítás során a hálózat kiépítésével törődni. Ugyanakkor amennyiben a távhőrendszert ki kell építeni, olyankor a beruházás költsége és így a megtérülés ideje jelentősen eltérhet. Ráadásul meg kell állapítani azt az optimális távolságot, ameddig megéri kiépíteni. Ez gyakorlatilag a kút középpontjától vett távolság, mely meghatározza azt a kört, amelyen belül keresni lehet a fogyasztási igényt. Ha nincsen elegendő igény, akkor érdemes lehet a villamosenergia-termelés arányát növelni. A távhő kiterjesztése – viszonylag kicsi volumenben – ugyanis nem számít gazdaságosnak. A veszteségek – csőűrlődés, hővesztés, extra szivattyú – ugyanis nagyon megnövekednek.



5. ábra: csőátmérő megállapítása a tömegáram és az áramlási sebesség grafikonja alapján [6]

A távhőszolgáltatásban úgy kalkuláltam, hogy bármilyen kútról is beszélünk a várható tömegáram igen alacsony lesz, 10-50 liter per másodperc között ingadozhat a térfogatáram. Alább átlagosan 20 l/s térfogatáramos vízhozammal számoltam. A kalkulációt szabvány szerint végeztem, az Isoplus katalógusa alapján. A 20 l/s-hoz rövid számolás után és a méretezési táblázat segítségével a KR50 típus lett kiválasztva csővezetéknek, így konkrét típusadatokkal lehet tovább haladni. Valószínűsíthető, ha nem is ezt a típust választják ki a megvalósításhoz, akkor is közel azonos paramétereket ad a későbbiekhez, esetleges változtatásokhoz. Ahogy az 4. ábrán is látszódik, a választott csőtípus duplacső, szigeteléssel ellátva, mely a tömegáram és az áramlási sebesség alapján lett kiválasztva.



6. ábra: KR50 csőtípus [6]

A KR50 típusú csővezeték esetében a belső (előremenő) és külső (környezeti) hőmérsékletek, valamint a hővezetési tényezőtől kiszámítható, hogy megközelítőleg 20 W/m hővesztéssel kell számolni, így kilométerenként nem jelentős, mindössze 0,24 °C-os előremenő lehűlés várható. Ráadásul ez a minimális lehűlés visszahat a hővesztésre: kis mértékben tovább csökkenti azt is. Ami ugyanakkor kérdéses és befolyásolja a számítást, hogy a távhő milyen mélyen van földbe ásva, ha egyáltalán van erre lehetőség. Amennyiben nincs beásva, akkor a hővesztések jelentősen növekednek, ugyanakkor a beruházás méretét tekintve nem biztos, hogy megtérül a földbe fektetett távhőhálózat. A mechanikai veszteségeket ugyancsak figyelembe kell venni a csőidomok következtében fellépő csősúrlódás miatt. Ez ugyan valamelyest növeli a hőmérsékletet, de a szivattyúzási munkát is. A csősúrlódás a távolság függésében növekszik, illetve szakaszonként – a hőtágulás miatt – kompenzátorokat kell elhelyezni, amelyek további nyomásesést okoznak. A pontos értéket a csősúrlódás okozta veszteségről, illetve az emiatt bekövetkező nyomásesésről csak konkrét helyszíni tervek alapján, a terep ismeretével lehet nyilatkozni [6].

## 2. A VILLAMOSENERGIA-TERMELÉS ELŐIRÁNYZATA

### 2.1. Konceptió ismertetése

A kutatás céljaként megfogalmazott, és a magyar energiastratégiával összhangban lévő törekvés részeként, alapvetően egy elosztott rendszerű távhőt és villamos energiát egyaránt szolgáltató rendszer tervezése a cél [7]. Alapvető felvetés, hogy a párhuzamosan hőt és villamos energiát termelő rendszert tervezésekor kettő részre lehet elkülöníteni. Jelen fejezet elsősorban a villamos energia termelésére koncentrálna. A távhőellátás bevezetésével ugyanis a kisebb hőteljesítmény a tömegáram csökkenésében jelentkezik. Ennek megfelelően, ahol lehetett, ott fajlagosított értékek kerültek kiszámításra. A számolás első felét a FluidProp segítségével végeztem, melyben olyan összehasonlító modell elkészítése volt a cél, ahol a különböző lehetőségek paramétereit könnyen lehet egymáshoz viszonyítani. A bemenő, változtatható paraméterek a geotermikus hőforrás hőmérséklete és a hőelvonó közeg hőmérséklete. Első körben a körfolyamat tömegárama, illetve a hőforrás és hőelvonó közeg anyaga nem lett megadva, illetve kalkulálva, mivel alapvetően a termodinamikai folyamat fajlagos paramétereinek meghatározása volt a cél. Ezen adatok a hőcserélőkben végbemenő hőközlési folyamatokat, így a végső teljesítményt befolyásolják. Mindezek meghatározása azonban csak később, a számolás második felében, a Cycle-Tempo programmal készített

modellnél kerül elő. Ugyanakkor már e számítás kialakításánál figyelembe lett véve a kompresszor (szivattyú) és a turbina (expander) hatásfoka, melyek a számolást kis mértékben befolyásolják. A számolásokban a különböző bemeneti paraméterek alapján összesen 4 típusú telephely került meghatározásra, ugyanakkor ezen értékek változtatásával továbbiak létrehozása lehetséges. Minden telephelyen külön kiszámítható a választott munkaközegre a hősemához szükséges összes paraméter. A kalkuláció során meghatározott karakterisztikus pontok paramétereinek meghatározása történik első körben. Ezen pontok jellemzően az egyes folyamatok végpontjaihoz, valamint az anyag szaturációs görbéjén jól vizualizálható (8. ábra: bután telítési görbéjére felvett ORC körfolyamat). A (3'') pont gyakorlatban a (3) pontnak felel meg, kitevők használatánál csak 3 pontként lesz hivatkozva. A (3') pont a hőbevezetés azon pontja, ahol az izobár vonal metszi a telítési görbe folyadék felét. A (4'') pont valóságban nem feltétlen része a körfolyamatnak (csak akkor, ha az expanszió a kétfázisú részben ér véget), de azt a pontot jelöli, ahonnan a hőelvonás indulna, ha pontosan telített gáz fázisvonalról beszélünk e hőelvonás kiindulásakor. A karakterisztikus pontok közül ismert fajlagos gőztartalom az (1) és (3') pontokban 0%, a (3'') és a (4'') pontban 100%, míg a (2) pontról azt tudjuk, hogy csak folyadék fázisban van, a (4)-es pont, ha nem esik egybe (4'')-el akkor kétfázisú, vagy túltelített mezőben is lehet a munkaközeg típusától függően. A hőmérsékleteket a hőelvonás, illetve hőbevezetés esetében a 5 fokos hőfokrést vettem fel alapértelmezetten, vagyis a hűlő és felmelegedő közeg között ekkora a minimális hőmérsékletkülönbség, de ez is egy változtatható paraméter, akár 2 fokos hőrésig is le lehetne menni megfelelő hőcserélő méretezéssel és választással. Ez alapján a geotermikus forrás hőmérséklete és a hőelvonó közeg hőmérséklete alapján meghatározhatóak a körfolyamat egyes pontjainak a hőmérsékletei a (2)-es és a (4)-es pontok kivételével.

## 2.2. A körfolyamat sarokpontjainak meghatározása

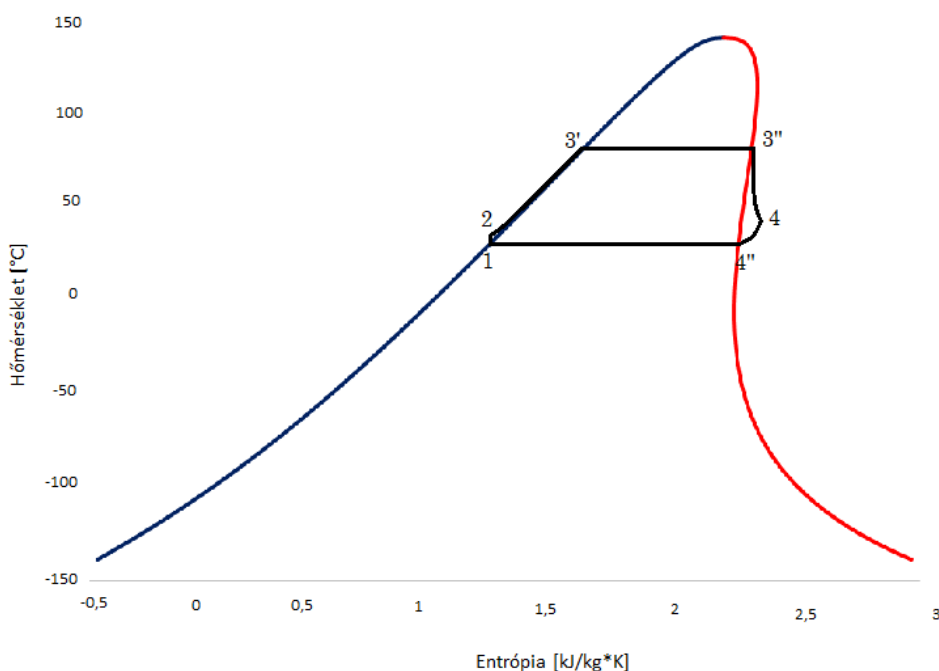
A számolás első lépéseként azoknak a pontoknak a nyomásértékei kerültek meghatározásra, melyek a telítési görbére esnek. Ezek az (1), (3'), (3'') és (4'') pontok, ahol a nyomás értéke a  $p(T,q)$  függvény alapján lett meghatározva, vagyis az izotermák és a fázisgörbe alapján – melyen ismert a fajlagos gőztartalom – a két görbe metszése egyértelműen meghatározza az adott pontot. (2) pont nyomásáról tudni lehet, hogy megegyezik a (3') és a (3'') pontok nyomásával, hiszen a hőbevezetés állandó nyomáson, izobár módon történik. Természetesen a hőcserélőben minimális nyomásesés lép fel, de az jelen esetben elhanyagolhatónak tekinthető és majd csak a Cycle-Tempo-ban végzett körfolyamati szimulációnál lesz számításba véve. A (4) pont nyomását a kondenzátorban és a hőcserélőben szintén állandó nyomású hőelvonás alapján vettem fel, tehát eme pont nyomása az (1) és a (4'')-vel egyezik meg. Az entalpia és entrópia értékei az (1), (3'), (3'') és (4'') pontokra szintén a hőmérsékletből és a fajlagos gőztartalomból lettek kiszámolva. Mivel a kompresszor (szivattyú) és a turbina (expander) hatásfoka figyelembe lett véve, így a (2) és (4) pontok entalpiájához először a reverzibilis pontok entalpiái –  $h_{2,iz}$  és  $h_{4,iz}$  – a nyomásból és entrópiából a  $h(p,s)$  függvénnyel lettek meghatározva, hogy aztán a gépek hatásfokával korrigálva kijöjjön a valós (irreverzibilis) pontok entalpiája. Ez az alábbi függvények szerint valósult meg:

$$h_2 = \frac{(h_{2,iz} - h_1)}{\eta_K} + h_1 \quad (1)$$

$$h_4 = (h_{4,iz} - h_3) \cdot \eta_T + h_3 \quad (2)$$

Miután mindez ki lett számolva – vagyis az (1), (3'), (3'') és (4'') pontokra minden adott, valamint a (2) és (4) pontoknál adott a nyomás és az entalpia – a (2) és (4) pont hőmérsékletét és entrópiáját a nyomásból és az entalpiából ki lehet kalkulálni a  $T(p,h)$  és  $s(p,h)$  függvények segítségével. Minden FluidProp-ban végzett számításhoz a munkaközeg a FreeStanMix-ből lett behívva. A FreeStanMix modell a PRSV állapotegyenletet valósítja meg, amely az egyik legpontosabb köbös állapotegyenlet a nem ideális gázok és folyadékok tulajdonságainak előrejelzésére. A hivatkozott munkaközegknél különösen jó eredményeket ad a telítettségi tulajdonságok becslésére, továbbá kiemelkedő olyan folyadékok esetében, amelyekre a RefProp nem áll rendelkezésre, mivel a folyadék modellezéséhez csak egyetlen paraméterre van szükség. Végző soron a (4) pont fajlagos gőztartalma került kiszámításra, az alábbi képlettel:

$$x = \frac{s_4 - s_1}{s_{4''} - s_1} \quad (3)$$



8. ábra. A bután telítési görbéjére felvett ORC körfolyamat

Természetesen ez csakis, akkor értelmezhető, ha a kétfázisú részben ér véget az expanzió. Erre külön vizsgálat került felállításra számolások során, így, ha az expanzió nem a kétfázisú részben ér véget, azt is megjeleníti a program. Ennek előnye, hogy az adott hőmérsékletpár között a használt munkaközeg típusát jelöli. A munkaközeg újraszűrésével nagy előrelépés történt a közeg optimális kiválasztásához, ezzel ugyanis az adott hőmérséklet-tartományban a használt anyag fázisgörbéjének a karakterisztikáját lehet megjeleníteni. A fázisgörbéhez való közelséget a kétfázisú részben az mutatja meg, mennyire közelít a szám (a fajlagos gőztartalom) a 100%-hoz, míg a gázhalmazállapotban ezt a (4) és a (4'') pontok hőmérsékletének különbsége jelzi. Ez a kettő típus a körfolyamati elemek összeállításánál is fontos lesz, hiszen utóbbi esetben mindenképpen célszerű belső hőcserélőt alkalmazni. A számolás gyakorlatilag akárhány munkaközegre elvégezhető, a termodinamikai körfolyamat paramétereit és – a munkaközeg újraszűrésének értelmében – az expanzió jellege alapján kiválasztható a megfelelő munkaközeg. A különböző munkaközeg típusokra kiszámolva megfigyelhető, hogy az adott hőmérsékletpár között a bután száraz, míg a propán nedvesítő munkaközegként viselkedik, ezért az első esetben belső hőcserélő beépítése szükséges, míg a másodikonál ez elhagyható, mivel az expanzió a kétfázisú részben ér véget, 95%-os telítettséggel [2].

freeStanMix; butane					
	t [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg·K]	x [-]
1	35,0	3,287	-349,172	-1,290	0%
2	35,5	11,368	-347,646	-1,290	-
3'	85,0	11,368	-209,727	-0,876	0%
3''	85,0	11,368	76,673	-0,077	100%
4	50,8	3,287	35,422	-0,045	-
4''	35,0	3,287	6,614	-0,136	100%



### 2.3. Különböző paraméterek, telepítések és telephelyek megadása

A számítások kialakításánál figyelembe lett véve, hogy az eredeti projekt célja több kisebb termelőegység összekapcsolása. Ugyanis tervben volt, illetve hosszú távon továbbra is tervezik egy nagyjából 100 MW-os virtuális geotermikus erőmű létrehozását. Éppen ezért nagyon fontos, hogy a különböző erőművekre könnyen kiszámíthatók legyenek a várható termelés paraméterei. Ennek köszönhető az is, hogy könnyen lehet változtatni a pontos kialakítás, a kapcsolás, illetve a hőforrás, valamint a környezeti hőmérsékletek változtatásának függvényében a bemeneti paramétereket. Mint korábban említésre került, alapértelmezetten 4 telephely lett pontos paraméterekkel megadva, melyekből különböző összehasonlítások készültek.

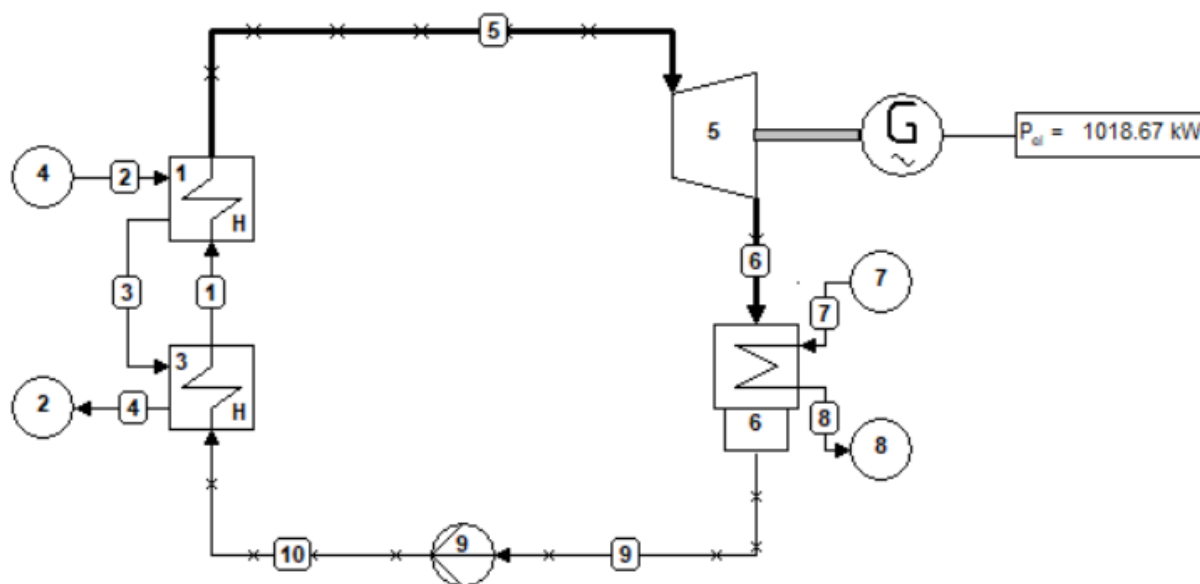
1. telephely						
	$w_p$ [kJ/kg]	$w_T$ [kJ/kg]	$w_{net}$ [kJ/kg]	$q_{be}$ [kJ/kg]	$q_{el}$ [kJ/kg]	$\eta_{th}$ [-]
Izopentán	1,187	40,047	38,860	415,627	376,767	9,35%
Bután	1,525	41,252	39,726	424,320	384,594	9,36%
Pentán	0,567	42,854	42,287	443,667	401,380	9,53%
Propán	5,028	32,567	27,539	331,075	303,536	8,32%
n-Hexán	0,229	43,260	43,031	449,369	406,338	9,58%

Fontos kiemelni, hogy pontos teljesítmények nem lettek meghatározva ennél a számításnál, mindössze a fajlagos értékek, aminek az az oka, hogy a pontos tömegáram nem csak a telephelyen megtalálható kúton múlik. Eredetileg a tömegáram is bemeneti paraméter lett volna, ugyanakkor azzal, hogy párhuzamos villamosenergia- és távhőszolgáltatást szeretnénk fenntartani, így az üzemviteltől függővé vált a tömegáram, tehát az igények kielégítésére lett optimalizálva a termelés, nem pedig a maximális hatásfokra. Ezek miatt a hőségében a fajlagos értékek használata sokkal célravezetőbb. Fontos, hogy minimális villamosenergiaigény mindig van, mivel, ha magas a hőigény, akkor a távhőszolgáltatásban alkalmazott szivattyúk teljesítményfelvétele is magas. Értelemszerűen az összhatófok változni fog a pontos tömegáram függvényében, ezért is nagyon fontos, hogy minél inkább rugalmasá lehessen tenni a szabályozást. A komprimálást végző egységet, a szivattyút, valamint az expandert is úgy kell megválasztani, hogy képes legyen a szabályozást lekövetni.

### 2.4. Cycle-Tempo hőszámító környezetben

A kiszámolt körfolyamati pontok és az azokból levont következtetések alapján a Cycle-Tempo program alapján lehet összeállítani a megfelelő modellt. Bár a FluidProp-ban végzett számolás célja az összehasonlítás, a modellezés során is lehet a többféle összeállítás tulajdonságaiból fakadó eltéréseket vizsgálni. Ugyanakkor nagy könnyebbséget jelent az modellezésben, hogy ismert a termodinamikai körfolyamat sarokpontjainak, valamint a berendezéseknek közel összes paramétere. Ez segíti a pontos berendezések összetételének meghatározását: az expanzió végpontjának helye szerint szükség van-e belső hőcserélőre vagy más kialakítás is jó. Emellett természetesen az értékek pontosabb bemeneti adatainak meghatározásában is segíthet, valamint kiemelten az ellenőrzésben, a hibás számítások feltérképezésében. A 4. telephelyen 60 literes másodpercenkénti, 100 °C fokos termálvízzel a szimulációban közel 1 MWel lehet elérni. A távhőrendszer felállításával a tömegáram megszlik, így az éppen optimális arányú hő- és

villamosenergia-termelési pont megtalálása után a tömegáramot kell szabályozni.



9. ábra: ORC propán munkaközeg alkalmazásával a 4. típusú telephelyre

### 3. ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBLÉPÉSI JAVASLATOK

Ahhoz, hogy az energiastratégiában megfogalmazott irányokat követni lehessen – már ami a geotermikus energiatermelést illeti – nemcsak a potenciál ismerete szükséges. Ebben a tanulmány olyan irányban igyekszik előre lépni, hogy a további esettanulmányokban használható számítási eljárást dolgozott ki. A széleskörű technológiai elemzés alapvetően a villamos energia termelésére tér ki, a távhőszolgáltatást kevésbé taglalja, ennek, valamint a rendszer kiépítésének költségeit a következő lépésben pontosítani, illetve meghatározni szükséges. A pontos telephelyek meghatározása – a fogyasztói igények figyelembevételével – szakértő csapat kooperációjával történik, így a jelen dolgozat mögött álló projekt remélhetőleg ténylegesen a megvalósulás fázisába kerülhet. A termelés optimalizálása alapvetően a gazdasági környezettől függő, így – amellett, hogy fel kell készülni a várható munkapontokra – logikusabb annak biztosítása, hogy minden helyzetre legyen elképzelés a várható termelés alakulásáról. Ugyanakkor a dolgozat szempontjából megfogalmazott kiemelkedő fontosságú tényezőket, a villamosenergia termelés módját és a mögötte lévő technológiát lefedte az elemzés, így arra is választ lehet kapni, hogy miért szükséges a termelés meghatározásához több variációval kiszámolni a lehetséges kimeneteket.

### IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Imre Attila R. Energiaátalakítási folyamatok: 3. előadás: Körfolyamatok. Central European Journal of Engineering. Springer, 2014, 4(2), 186-191.
- [3] Imre Attila R., Kustán Réka, Groniewsky Axel, Energies 12 (10): 2028. Thermodynamic Selection of the Optimal Working Fluid for Organic Rankine Cycles (2019).
- [4] C. Liu et al. "The environmental impact of organic Rankine cycle for waste heat recovery through life-cycle assessment," Energy, vol. 56, pp. 144–154, (2013), doi: 10.1016/j. energy.2013.04.045.
- [5] ORC World Map [online]. Elérhető: <https://orc-world-map.org/> Utolsó elérés dátuma: 2022.08.09
- [6] Isoplus. Merev csövek. [online] Elérhető: [https://www.isoplus.hu/fileadmin data /downloads/documents/hungary/manuals/ Merev\\_csovek.pdf](https://www.isoplus.hu/fileadmin/data/downloads/documents/hungary/manuals/Merev_csovek.pdf). Utolsó elérés dátuma: 2022.10.09
- [7] Innovációs és Technológiai Minisztérium. Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig (2020).