# 3. modul
# Hőtermelés

A SHaKE távfűtési és -hűtési rendszerekről szóló oktatási csomag része

# Útmutató

Újrafelhasználható oktatási segédanyag felsőoktatás és szakképzés számára

Verzió: 1.1
Dátum: 2026. június
https://www.shakeproject-dhc.eu/

## Projekt
Sharing Heat and Knowledge on Energy Communities (SHaKE)
Erasmus+ KA220-HED – Együttműködési partnerségek a felsőoktatásban
Projektazonosító: 2023-1-HU01-KA220-HED-000160219

## Fejlesztő intézmények
Universitat Jaume I de Castellón, Spanyolország
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország

## Szerzők és közreműködők
Ghad Alarnaout-Alarnaout, Dr. Adrián Mota-Babiloni (Universitat Jaume I de Castellón)
Balázs Bokor (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem)

## Szerkesztők
Szalma Éva

## EU-finanszírozási nyilatkozat és felelősségkizárás
Az Európai Unió által finanszírozott. A kifejezett nézetek és vélemények azonban kizárólag a szerző(k) véleményei, és nem feltétlenül tükrözik az Európai Unió vagy a Tempus Public Foundation véleményét. sem az Európai Unió, sem a támogató hatóság nem vonható felelősségre ezekért.

## Koordinátor
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország

## Partnerintézmények
Universitat Jaume I de Castellón, Spanyolország
Mines Paris – PSL, Franciaország

## Elismerés
Ez a kiadvány a SHaKE projekt részeként készült. A konzorcium köszönetet mond minden oktatónak, kutatónak, szakembernek és érintettnek, akik hozzájárultak az oktatási anyagok fejlesztéséhez, áttekintéséhez és fejlesztéséhez.

## Engedély
Amennyiben másképp nincs feltüntetve, az anyag a Creative Commons Attribution 4.0 International Licence (CC BY 4.0) alatt érhető el. A felhasználók megoszthatják és átdolgozhatják az anyagot, amennyiben megfelelően feltüntetik a SHaKE projektet és a szerzőket, megadják a licencre mutató linket, valamint jelzik az esetleges változtatásokat.
Javasolt hivatkozás:
Universitat Jaume I de Castellón és Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. 3. modul: Hőtermelés. SHaKE projekt, 2026.
https://www.shakeproject-dhc.eu/

# Útmutató a 3. modul használatához

Ez a modul a SHaKE oktatási csomag része, amelyet a távfűtési és -hűtési (DHC) rendszerek felsőoktatási és szakmai képzési környezetben történő oktatásának támogatására fejlesztettek ki.
A 3. modul a távfűtési hálózatok hőtermelési technológiáira összpontosít. Egyesíti a megújuló és alacsony szén-dioxid-kibocsátású hőforrásokat, a hulladékhő-hasznosítást, a hőszivattyús technológiákat, a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelést (CHP), valamint a hőtermelő rendszerek gazdasági és környezeti értékelését.
Az útmutató elsősorban oktatási segédanyagként szolgál oktatók, előadók és trénerek számára. Használható előadások, kevert tanulási tevékenységek, tantermi megbeszélések, gyakorlati feladatok, esettanulmányi munka és folyamatos szakmai továbbképzések támogatására. A kísérő prezentációs diák, a kérdésbank, az önellenőrző kvíz, a gyakorlati feladatok és az esettanulmányi anyagok célja, hogy segítsék az oktatókat a tartalom saját tanítási kontextusukhoz való igazításában.
A modult diákok és szakemberek önálló tanulásra is használhatják, különösen akkor, ha már rendelkeznek alapvető termodinamikai, hőátadási, energiarendszer-, távfűtés- és épületgépészeti ismeretekkel.

## A modulban tárgyalt főbb témák

- Primer energiaellátási és települési hőtermelési stratégiák
- Biomassza elégetése, hulladékból történő energianyerés és biogáz előállítása
- Napkollektoros távfűtés és hőenergia-tárolás
- Geotermikus távfűtés és termálvíz kaszkádos hasznosítása
- Hulladékhő osztályozási, leválasztási és hasznosítási technológiák
- Hőcserélők és aktív hulladékhő-visszanyerési technológiák
- A hőszivattyúk termodinamikai alapelvei és technológiái
- Hőszivattyús alkalmazások hulladékhő-feldolgozáshoz és távfűtéshez
- Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő (CHP) rendszerek és azok integrálása a távfűtési hálózatokba
- Hőtermelő rendszerek gazdasági és környezeti értékelése
- Az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hőtermeléssel kapcsolatos szakpolitikai eszközök, piaci trendek és jövőbeli szempontok

## A 3. modul tanulási eredményei

A modul a következő készségek és kompetenciák fejlesztését kívánja támogatni. A modul elvégzése után a tanulóknak képesnek kell lenniük a következőkre:

- azonosítani és osztályozni a távfűtési hálózatokban alkalmazott hőtermelési technológiákat;
- ismertesse a megújuló és alacsony szén-dioxid-kibocsátású hőforrások szerepét a hőellátás dekarbonizációjában;
- összehasonlítani a biomassza-tüzelés, az elgázosítás, a biogáz, a napkollektoros és a geotermikus hőtermelés lehetőségeit;
- azonosítani, osztályozni és számszerűsíteni a hulladékhő-forrásokat a származás és a hőmérsékleti profil alapján;
- ismertesse a hőszivattyú működését szabályozó termodinamikai elveket;
- hőszivattyús technológiák értékelése hőtermelés és hulladékhő-feldolgozás céljából;
- ismertesse a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek működési elveit és távfűtési integrációját;
- a technológiai konfigurációk összehasonlítása hatékonyság, költség és környezeti hatás alapján;
- valós esettanulmányok elemzése a megújuló hő, a hulladékhő-visszanyerés, a hőszivattyúk és a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) távfűtési rendszerekbe való integrálásának megvalósíthatóságának és előnyeinek felmérése érdekében.

## Becsült óraszám

Ez a modul körülbelül 8,4 tanulási órát képvisel, beleértve az elméleti asszimilációt, a gyakorlati alkalmazást, az esetelemzést, az önálló kutatást és az értékelést.
Az oktatók a kurzus szintjétől, a kiválasztott anyagoktól és az oktatási formátumtól függően módosíthatják az óraszámot. A modul használható teljes oktatási egységként, kiválasztott előadásanyagok gyűjteményeként, kevert tanulási komponensként, gyakorlati feladatcsomagként, esettanulmány-csomagként vagy meglévő kurzusok kiegészítő forrásaként.

## Tevékenységek és tanórák

| Tevékenység típusa | Időelosztás | Leírás |
|---|---|---|
| Elméleti asszimiláció | 4,0 óra | Az előadások anyagainak mélyreható tanulmányozása, valamint szakmai cikkek és szakpolitikai dokumentumok kritikus elolvasása. |
| Gyakorlati alkalmazás | 1,0 óra | Hatékonysági számításokat, termodinamikai szimulációkat és gazdasági elemzéseket magában foglaló technikai gyakorlatok. |
| Esettanulmány | 0,5 óra | A megújuló energiára és a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerekre összpontosító valós megvalósítások kritikai értékelése. |
| Független kutatás | 2,5 óra | Autonóm szakirodalmi áttekintés és környezeti hatásvizsgálat. |
| Értékelés | 0,4 óra | Folyamatos értékelés és záró szakmai projekt vagy értékelési feladat a megszerzett ismeretek megszilárdítására. |
| Teljes óraszám | 8,4 óra | |

## Célcsoportok

Ez az útmutató elsősorban olyan oktatóknak, előadóknak és trénereknek szól, akik a SHaKE anyagokat saját oktatási vagy képzési tevékenységeikben szeretnék használni vagy adaptálni.

- felsőoktatási előadók mérnöki tudományok, épületgépészet, energiarendszerek, távfűtés és -hűtés, HVAC és fenntartható energiarendszerek területén;
- távfűtési és -hűtési rendszerekkel kapcsolatos szakmai vagy továbbképzésben részt vevő oktatók;
- kevert, moduláris vagy gyakorlatorientált tanulási tevékenységeket kidolgozó pedagógusok;
- a fenntartható távenergia-rendszerekkel kapcsolatos oktatási forrásokat kereső akadémiai személyzet;
- a megújuló hőtermelés, a hulladékhő-visszanyerés, a hőszivattyúk és a távfűtési hálózatokban használt kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) iránt érdeklődő diákok, kutatók és szakemberek.

Önálló használathoz alapvető előzetes ismeretek ajánlottak a releváns mérnöki területeken.

## Oktatók és trénerek által ajánlott használat

A 3. modul rugalmasan használható teljes oktatási egységként vagy kiválasztott oktatási segédanyagok gyűjteményeként. Az oktatók a kurzus szintje, a rendelkezésre álló tanítási idő és a kívánt tanulási eredmények szerint kombinálhatják az anyagokat.

| Tanítási igény | Javasolt 3. modul forrásanyag |
|---|---|
| A téma bemutatása | A modul áttekintése és a bevezető diák segítségével mutassa be a távfűtési hálózatokban a hőtermelés hatókörét, kulcsfogalmait és relevanciáját. |
| A tanulók felkészítése az óra előtt | Jelölje ki a kiválasztott kalauzrészleteket előolvasásként a fordított osztálytermi vagy kevert tanulási tevékenységekhez. |
| Előadások vagy szemináriumok támogatása | A prezentációs diák segítségével ismertesse a megújuló hőforrásokat, a hulladékhő-visszanyerést, a hőszivattyúkat, a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelést (CHP) és a gazdasági vagy környezeti értékelést. |
| A megértés ellenőrzése | Használja a kérdésbankból kiválasztott kérdéseket megbeszélésre, rövid órai ellenőrzésekre, formatív értékelésre vagy LMS-alapú kvízekre. |
| Alkalmazott mérnöki készségek fejlesztése | Használja a gyakorlati feladatot csoportmunkához, házi feladathoz, termodinamikai számítási feladatokhoz, gazdasági összehasonlításhoz vagy projektalapú tanuláshoz. |
| Esettanulmány-munka támogatása | Használja az esettanulmányi anyagokat a megújuló hő, a hulladékhő-visszanyerés, a hőszivattyúk és a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő berendezések integrációjának valós példáinak megvitatására. |
| Független felülvizsgálat támogatása | Miután a tanulók áttanulmányozták a vonatkozó anyagokat, irányítsd őket a modulszintű önellenőrző teszthez. |
| Alkalmazkodás a helyi tanítási környezethez | Válassza ki, kombinálja vagy módosítsa az útmutató részeit, diákat, kérdéseket, gyakorlatokat és esettanulmányokat a tananyagnak, a résztvevők szintjének és a szakmai kontextusnak megfelelően. |

## Ajánlott tanulási stratégia önálló tanulók számára

A modult önállóan használó diákok és szakemberek az alábbi sorrendet követhetik.

**Tekintse át a bevezető prezentációt**

Ismerkedjen meg a modul főbb fogalmaival, terminológiájával és felépítésével.

**Tanulmányozza az útmutató anyagait**

Olvassa el a kézikönyvben bemutatott részletes magyarázatokat, mérnöki alapelveket és esetpéldákat.

**Nézze meg a modul videóját**

Használja a rövid videót a modul fő témáinak és tanulási fókuszának bemutatására.

**Töltse ki az önellenőrző kvízt**

Tesztelje a modulban tárgyalt főbb fogalmak és technikai alapelvek megértését.

**Próbálja meg a gyakorlati feladatot**

Alkalmazza a megszerzett tudást mérnöki orientációjú számítási, összehasonlítási vagy értékelési feladatokon keresztül.

**Tekintse át az esettanulmányokat**

Elemezzen kiválasztott valós példákat, és reflektáljon azok műszaki, gazdasági és környezeti átadhatóságára.

## Elérhető segédanyagok

A támogató anyagok a következők:

- a modul altémáihoz tartozó prezentációs diák;
- egy kérdésbank és válaszkulcs;
- egy modulszintű önellenőrző kvíz;
- gyakorlati mérnöki feladat;
- esettanulmányi anyagok;
- és egy rövid támogató modulvideó.

# Tartalomjegyzék


Projekt ..... 2
Fejlesztő intézmények ..... 2
Szerzők és közreműködők ..... 2
Szerkesztők ..... 2
EU-finanszírozási nyilatkozat és felelősségkizárás ..... 2
Koordinátor ..... 2
Partnerintézmények ..... 2
Elismerés ..... 2
Engedély ..... 2
Útmutató a 3. modul használatához ..... 3
1. Megújuló hőtermelés ..... 8
1.1 A települések primerenergia-ellátása ..... 8
1.1.1 Szilárd tüzelőanyagok értékelése ..... 9
1.1.2 Biomassza-égetés és energiatermelés hulladékból ..... 10
1.1.3 Éghető biomassza-potenciál Magyarországon ..... 11
1.1.4 Faapríték- és szalmatüzelésű fűtőblokk a Pécsi Erőműben ..... 13
1.2 A BIOMASSZA GÁZOSÍTÁSA ..... 14
1.2.1 A hazai biogáztermelés lehetőségei ..... 14
1.2.2 A biogáztermelés folyamata ..... 15
1.2.3 A szennyvíztisztítás és a biogáztermelés folyamata ..... 16
1.2.4 A güssingi biomassza erőmű ..... 16
1.2.5 Települési szilárd hulladék lerakása és hulladéklerakói gáztermelés ..... 18
1.2.6 Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés biogázüzemű motorral ..... 19
1.2.7 A biomassza-tüzelés és -gázosítás összehasonlítása energiatermelés céljából ..... 20
1.3 NAPKOLLEKTOROS TÁVFŰTÉS ..... 21
1.3.1 Síkkollektor ..... 21
1.3.2 "Sydney-cső" vákuumcső ..... 22
1.3.3 Hőcsöves vákuumcső ..... 23
1.3.4 A nagyméretű napenergia-termelés kihívása: a teljesítménycsúcsok tárolása ..... 23
1.4 Geotermikus távfűtés ..... 24
1.4.1 Integrációs módszerek a geotermikus távfűtésben ..... 25
1.4.2 Fogyasztói csatlakozási módok ..... 27
1.4.3 A víz hasznosításának lehetőségei a víz minőségétől és hozamától függenek ..... 27
1.4.4 Geotermikus távfűtési rendszer kiépítése ..... 28

1.4.5 Kihívások a geotermikus rendszer megvalósítása során ..... 29
1.4.6 A geotermikus gradiens ..... 29
1.4.7 GeoDH térkép – Geotermikus potenciál és távfűtés Európában ..... 30
1.4.8 Geotermikus potenciál Magyarországon ..... 31
1.5 Megújuló energiaforrások hasznosítása a távfűtésben: fókuszban a geotermikus energia ..... 33
1.5.1 A termálvíz hasznosításának gyakorlati szempontjai a távfűtési rendszerekben ..... 34
1.5.2 A vízhozam növelése ..... 35
1.5.3 Kitermelt termálvíz gáztalanítása ..... 35
1.5.4 A termálkutak hasznosítása Magyarországon ..... 36
2. Hulladékhő hasznosítása és hőszivattyú ..... 49
2.1 Hulladékhő háttér ..... 49
2.2 Hulladékhő osztályozása ..... 49
2.2.1 A hulladékhő leválasztására és hasznosítására szolgáló technológiák ..... 50
2.2.2 Hulladékhő hasznosítása ..... 56
2.3 Kiválasztott városi hulladékhőforrások távfűtéshez ..... 65
2.3.1 Adatközpontok hulladékhője ..... 66
2.3.2 Metróalagutakból származó hulladékhő ..... 66
2.3.3 Csatornahálózatokból származó hulladékhő hőszivattyúk használatával ..... 66
2.3.4 Hulladékhő hasznosítása : a fogyasztóból termelő-fogyasztó lesz ..... 67
3. Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) ..... 68
3.1 Bevezetés a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerekbe ..... 68
3.2 A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek szerepe a hőtermelésben és integrációjuk különböző technológiákba, például a távfűtésbe (DHN) ..... 72
3.3 Távfűtésbe (DHN) történő integrálásának működési és technikai kihívásai ..... 75
4. A hőtermelő távfűtési hálózatok gazdasági és környezeti vonatkozásai ..... 78
4.1 Bevezetés ..... 78
4.2 A hőtermelő rendszerek mélyreható gazdasági elemzése ..... 79
4.3 A hőtermelő rendszer környezeti hatása ..... 82
4.4 Piaci és iparági trendek, árazás és piaci verseny a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelésben (CHP) és a hőszivattyúkban ..... 86
4.5 A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) és a hőszivattyúk szakpolitikai eszközei és szabályozási keretei ..... 90
5. Következtetések ..... 98
6. Hivatkozások ..... 99

# 1. Megújuló hőtermelés

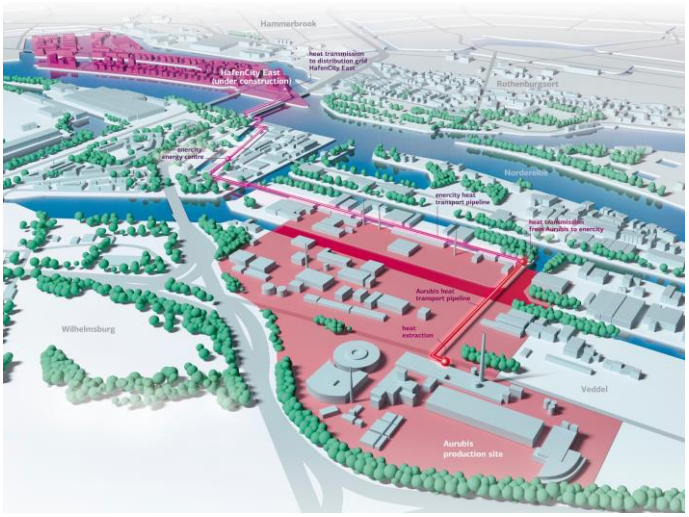
## 1.1 A települések primerenergia-ellátása

A távfűtési rendszerek fejlesztésének egyik kulcskérdése a legmegfelelőbb primer energiaforrás meghatározása – mind a jelenlegi igények, mind a hosszú távú jövő szempontjából. Az primer energiaellátás kiválasztása nemcsak a helyi energiarendszer hatékonyságát és környezeti teljesítményét befolyásolja erősen, hanem a település energiabiztonságát és gazdasági stabilitását is.

Magyarországon a kiterjedt földgázhálózat évtizedek óta domináns szerepet játszik a hőellátásban. Kiépített infrastruktúrája és megbízhatósága tette a legkényelmesebb és legszélesebb körben használt energiaforrássá mind lakossági, mind távfűtési célokra. A fenntarthatóságra helyezett növekvő hangsúly, az Európai Unió dekarbonizációs céljai, valamint a fosszilis tüzelőanyagok árának ingadozása azonban rávilágít a földgáztól való függőség fokozatos csökkentésének szükségességére.

Amikor egy önkormányzat jelentős primerenergia-fogyasztású ipari telephellyel rendelkezik, kölcsönös érdek fűződik egy közös energiastratégia kidolgozásához. Az összehangolt energiatervezés lehetővé teszi az erőforrások optimalizálását, az általános energiaköltségek csökkentését és a helyi energiapotenciál jobb kihasználását. Ilyen esetekben az integrált energiarendszerek – amelyek ötvözik az ipari folyamatokat, a városi hőhálózatokat, valamint a megújuló vagy hulladékenergia-forrásokat – jelentős környezeti és gazdasági előnyöket teremthetnek.

Különösen értékes lehetőség rejlik az ipari hulladékhő felhasználásában. Számos ipari létesítmény jelentős mennyiségű alacsony vagy közepes hőmérsékletű hulladékhőt bocsát ki a környezetbe. Azáltal, hogy ezt az energiát megkötik és a távfűtési hálózatokba integrálják, az önkormányzatok jelentősen csökkenthetik az primer energiaigényt és a szén-dioxid-kibocsátást, miközben javítják a rendszer általános hatékonyságát.



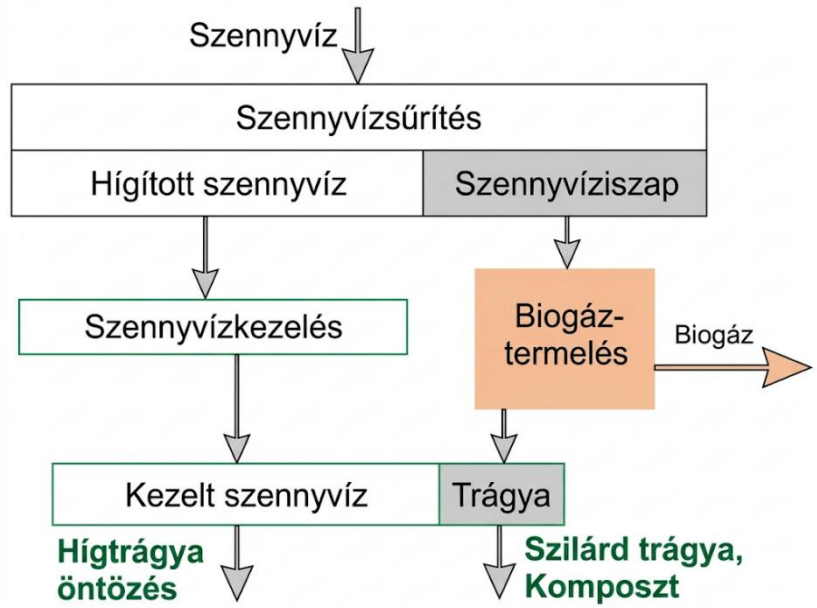

*1. ábra 1ábra 2ábra 3ábra 4ábra 5ábra 6ábra 7ábra 8ábra  A biogáztermelés folyamata[2]*

A fermentációs folyamat során a biomasszában lévő kórokozó mikroorganizmusok száma jelentősen csökken, az anyag kevésbé szagossá válik, a visszamaradó fermentlé pedig kiváló tápanyagban gazdag műtrágyaként szolgál mezőgazdasági felhasználásra. Így a biogáztechnológia nemcsak a megújuló energiatermeléshez járul hozzá, hanem környezetbarát hulladékkezelési megoldást is kínál.

### 1.2.3 A szennyvíztisztítás és a biogáztermelés folyamata

A települési szennyvíztisztítás során a városi szennyvíz szervesanyag-tartalmát először besűrítik, hogy koncentrált iszapot képezzenek. Ezt a besűrített iszapot ezután egy anaerob lebontórendszerbe vezetik, ahol

oxigén hiányában biológiai gázosításon megy keresztül. Ennek eredményeként energetikailag értékes biogáz és stabilizált szilárd maradék (fermentátum) keletkezik.
A kezelt és hígított szennyvíz megfelelő tisztítás, szagtalanítás és fertőtlenítés után mezőgazdasági felhasználásra alkalmassá tehető. Azokban az esetekben, amikor a tisztítási folyamat nem teljes körű, a részben kezelt szennyvíz továbbra is felhasználható energiatermelő növények öntözésére, hozzájárulva a körforgásos erőforrás-felhasználáshoz.
A szilárd fermentátum szárítás után szerves trágyaként vagy üzemanyagként szolgálhat, összetételétől és energiatartalmától függően. Ezzel az integrált megközelítéssel a szennyvíztisztító telepek nemcsak hulladékkezelő létesítményként, hanem megújuló energiatermelőként is működhetnek, hozzájárulva a fenntartható energia- és tápanyag-gazdálkodáshoz a településeken belül.




*10. ábra 9ábra 10ábra . A 11ábra 12ábra 13ábra 14ábra 15ábra 16ábra 17ábra 18ábra 19ábra 20ábra 21ábra 22ábra 23ábra 24ábra 25ábra 26ábra 27ábra 28ábra 29ábra A geotermikus gradienst, a geotermikus hőáram és az inszoláció nagyságát bemutató vázlatos blokkdiagram Dánia átlagértékeivel, valamint a hőmérséklet-ingadozás szezonális zónájával.[11]*

### 1.4.7 GeoDH térkép – Geotermikus potenciál és távfűtés Európában

A GeoDH Map egy interaktív eszköz, amely alapvető információkat nyújt a geotermikus távfűtési rendszerek tervezéséhez és megvalósításához Európa-szerte. Három kulcsfontosságú adathalmazt egyesít:

#### *1.4.7.1 Geotermikus hőforrások becslése*

A térkép geológiai felmérések és hőmérsékleti gradiensek alapján azonosítja a jelentős geotermikus potenciállal rendelkező régiókat. Ez segít a fejlesztőknek olyan területek megtalálásában, ahol a fúrás elegendő hőt termelhet a távfűtéshez.

#### *1.4.7.2 Meglévő geotermikus távfűtési rendszerek*

A térképen jelölt operációs rendszerek betekintést nyújtanak a sikeres projektekbe és a legjobb gyakorlatokba. Ezek a példák referenciaként szolgálnak az új fejlesztésekhez.

#### *1.4.7.3 Hőigénytérkép*

A geotermikus potenciál és a városi hőigény összehasonlításával a térkép kiemeli azokat a területeket, ahol a geotermikus energia a leghatékonyabban integrálható a távfűtési hálózatokba.
A GeoDH Térkép 14 európai országot fed le, amelyek aktívan részt vesznek a geotermikus távfűtési projektekben:
Olaszország, Németország, Franciaország, Hollandia, Írország, Egyesült Királyság, Szlovákia, Szlovénia, Csehország, Románia, Bulgária, Lengyelország, Dánia és Magyarország.
Ez az eszköz a megújuló energiaforrások és a fogyasztói igények összehangolásával támogatja a stratégiai döntéshozatalt, elősegítve a fenntartható fűtési megoldásokat Európa-szerte.

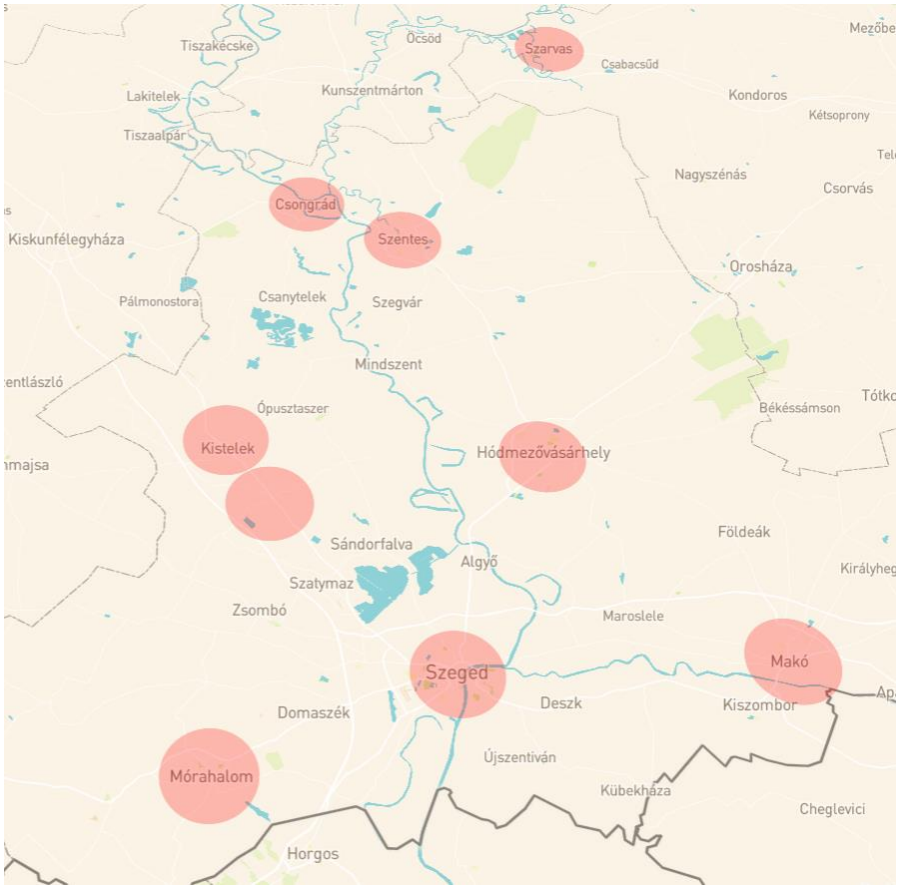



*32. ábra 30ábra 31ábra 32ábra 33ábra 34ábra 35ábra 36ábra 37ábra . A 38ábra Szegedi távfűtési rendszer[19]*

### Regionális geotermikus potenciál

50 km-es körzetben 9 település hasznosít geotermikus energiát távfűtésre, közepes entalpiájú források alapján. A legtöbb rendszer a következő tervet követi:

- 1 termelő kút,
- 1–2 visszasajtoló kút,
- Néhány rendszer balneológiai célú felhasználást is támogat.




*42. ábra 39ábra 40ábra 41ábra 42ábra 43ábra . A 44ábra 45ábra 46ábra 47ábra  Megújuló és hulladékenergia a FŐTÁV hőmixében 2022-ben és a jövőben[21]*

# 2. Hulladékhő hasznosítása és hőszivattyú

## 2.1 Hulladékhő háttér

A hulladékhő olyan hőenergiára utal, amelyet ugyan termelnek, de nem hasznosítanak hatékonyan ipari, kereskedelmi vagy lakossági folyamatokban. Ez a hő gyakran a környezetbe kerül kipufogógázokon, hűtőfolyadékokon stb. keresztül. Azonban, bár ezeket a hőáramokat hulladéknak tekintik, gyakran nagy mennyiségű exergiát tartalmaznak, és a számos hulladékhő-hasznosítási technológia egyikével profitálhatnának belőle [1] . Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület a hulladékhő-visszanyerési technológiákat az energiahatékonyság javításának eszközeként tekinti [2] , csökkentve az ipari folyamatok energiafogyasztását, és ezáltal az üvegházhatású gázok kibocsátását. Ily módon a hulladékhő egy olyan lehetőséget jelent az energiahatékonyság javítására, amely gyakran kiaknázatlan marad.

## 2.2 Hulladékhő osztályozása

Hulladékhő eredete alapján kategorizálható, mivel a különböző ipari, kereskedelmi és természetes folyamatok különböző hőmérsékleteken termelnek felesleges hőt. Az alábbiakban a főbb források alapján osztályozzuk:

1. Ipari hulladékhő:
    a) Acél-, cement- és üveggyártás.
    b) Vegyipari és kőolajfinomítás.
    c) Élelmiszer-feldolgozás és papírgyártás.
2. Energiatermelés hulladékhője:
    a) Hőerőművek (szén, földgáz, biomassza).
    b) Belső égésű motorok és gázturbinák.
3. Kereskedelmi és lakossági hulladékhő:
    HVAC rendszerek, hűtés és vízmelegítés.
4. Közlekedési hulladékhő:
    Motor kipufogógázok és súrlódási veszteségek járművekben.

Még a megújuló hulladékhő is tekinthető hulladékhőnek, mivel még a megújuló energiarendszerek is termelnek hulladékhőt, amely visszanyerhető. A hőmérsékleti szinttől függően a hulladékhő különböző hőmérsékleti szintekbe sorolható a felhasználhatósága és a visszanyerés lehetősége alapján. Az osztályozás jellemzően három vagy négy kategóriába sorolható (52. ábra):

### Alacsony hőmérsékletű hulladékhő (<100°C)

Példák: Hűtőtornyok és HVAC-rendszerek kipufogógázai; Ipari szennyvízből származó hulladékhő; Hűtő- és légkondicionáló rendszerekből származó hő; Alacsony hőmérsékletű füstgázok (pl. élelmiszer-feldolgozás, sörfőzdék).

### Közepes hőmérsékletű hulladékhő (100°C – 300/400°C)

Példák: Belső égésű motorok és turbinák kipufogógázai; Kazánok, kemencék és szárítási folyamatok hulladékhője; Vegyi feldolgozási és finomítási műveletek; Acél- és fémöntési folyamatok.

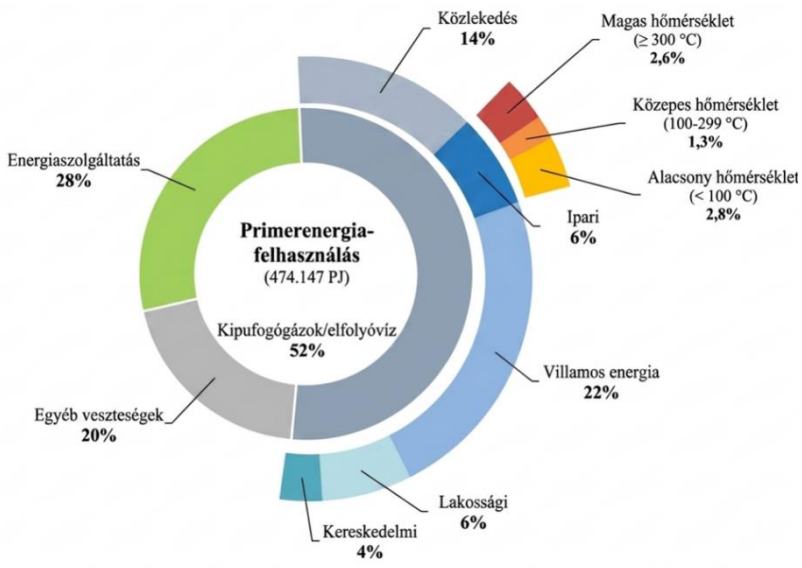
### Magas hőmérsékletű hulladékhő (>300/400°C)

Példák: Acél-, cement- és üvegipar kipufogógázai; Fémolvasztás és -finomítás hője; Erőművek és hulladékégetők füstgázai; Magas hőmérsékletű kemencék és reaktorok.

| Ultra-alacsony minőségű ($T_{környe}$–60) | Alacsony minőségű (60–100 °C) | Közepes minőségű (100–400 °C) | Magas minőségű (>400 °C) |
|---|---|---|---|
| • Adatközpontok<br>• Energiatároló rendszer<br>• HVAC-létesítmény (klimatizálás)<br>• Szennyvíz-csatornázás<br>• Geotermikus<br>• Biológiai lebomlás<br>• Naptermikus | • Belső égésű motor (hengerköpeny-hűtőfolyadék)<br>• Ipari technológiai áram (gyártás)<br>• Hidrotermális<br>• Anaerob emésztés | • Belső égésű motor (kipufogógáz)<br>• Erőművi füstgáz, ipari technológiai áram (vegyipar & élelmiszeripar)<br>• Geotermikus (vulkáni területek)<br>• Fermentációs folyamatok | • Ipari technológiai áram (vas- & acélgyártás)<br>• Erőművi füstgáz (gázturbina)<br>• Hulladékégetési folyamatok |

52. ábra. Hulladékhő hőmérsékleti szint szerint osztályozva

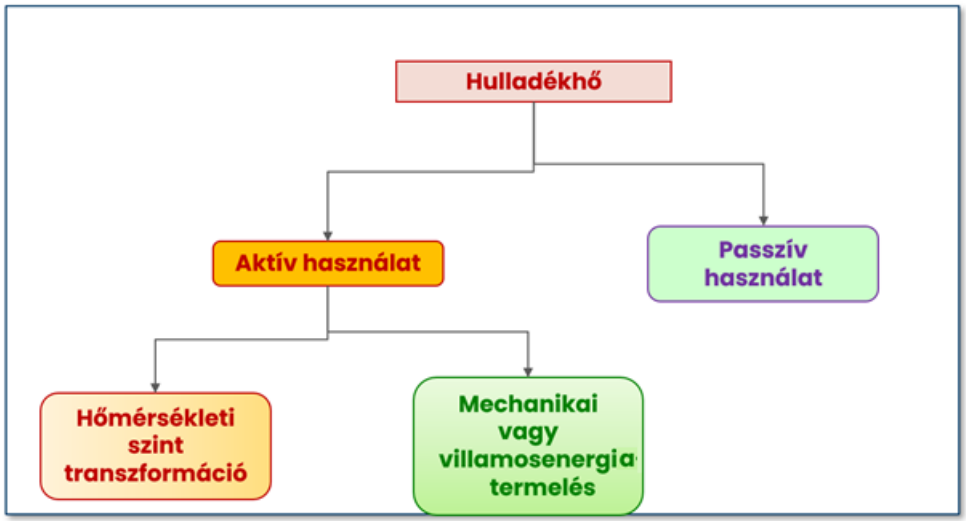
Végül, a hulladékhővel kapcsolatban kevés adat áll rendelkezésre. Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma 2008-ban közzétett egy jelentést a hulladékhő hasznosításáról [3], amelyben kijelenti, hogy az ipari gyártási folyamatok során felhasznált energia 20-50%-a hulladékhőként vész el, körülbelül 60%-a pedig alacsony minőségű hulladékhőként szabadul fel 230 °C alatti hőmérsékleten. 2009-ben az Enova SF (egy norvég kormányzati vállalat, amely a környezetbarát energiatermelés és -fogyasztás előmozdításáért felelős) szintén megad egy hőmérsékleti tartomány szerinti eloszlást, ahol a hulladékhő 37%-a 140 °C felett van, a fennmaradó 63% közel fele pedig 40-60 °C tartományban van [4]. Egy későbbi tanulmányban [5] összefoglalja a különböző adatokat, és összegyűjti a hulladékhő formájában keletkező hőteljesítmények szerinti eloszlást, valamint a hőmérséklet szerinti eloszlását a különböző ágazatokban (beleértve a közlekedést, az ipart, a kereskedelmi, a lakossági és az elektromos szektort), amelyet kompakt módon az 53. ábra mutat be.




53. ábra. Hulladékhő eloszlása szektor és hőmérséklet szerint [5].

### 2.2.1 A hulladékhő leválasztására és hasznosítására szolgáló technológiák

A hulladékhő közvetlenül felhasználható passzív módon (egyszerűen hőcserélő segítségével), vagy átalakítható aktív technológiákkal (a hőmérséklet átalakításával vagy mechanikai vagy elektromos energia előállításával), ahogy az az 54. ábrán látható.




54. ábra. A hulladékhő leválasztására használt technológiák osztályozása.

### *2.2.1.1 Hőcserélők*

A hulladékhő befogására és felhasználására szolgáló technológiákat alkalmazó folyamatot hulladékhő-visszanyerésnek nevezik. Mindenesetre (passzív vagy aktív felhasználásról legyen szó) ez magában foglalja a hulladékhő átvitelét, hogy azt hő vagy energia előállításával újraértékeljék. A hulladékhő-visszanyerés első lépése minden esetben egy hőcserélő, amely befogja a hulladékhőt.

A hőcserélők olyan eszközök, amelyeket arra terveztek, hogy hőt vigyenek át egyik közegből a másikba, általában anélkül, hogy azok összekeverednének. Széles körben használják őket különféle alkalmazásokban, például fűtésben, hűtésben és energia-visszanyerésben. A hőcserélő alapelve, hogy lehetővé tegye a hőáramlást egy melegebb folyadékról egy hidegebbre. Többféle hőcserélő létezik, de a hővisszanyerésre leggyakrabban a következőket használják [ 3 , 6 ] :

1. Lemezes hőcserélő
2. Csőköteges hőcserélő
3. Levegő-levegő hőcserélők
4. Tápvízelőmelegítők (Economiser) vagy Füstgáz-hőhasznosítók/Tápvízelőmelegítők (Economiser) vagy Füstgáz-hőhasznosítók
5. Regeneratív hőcserélők
6. Közvetlen érintkezésű hőcserélők

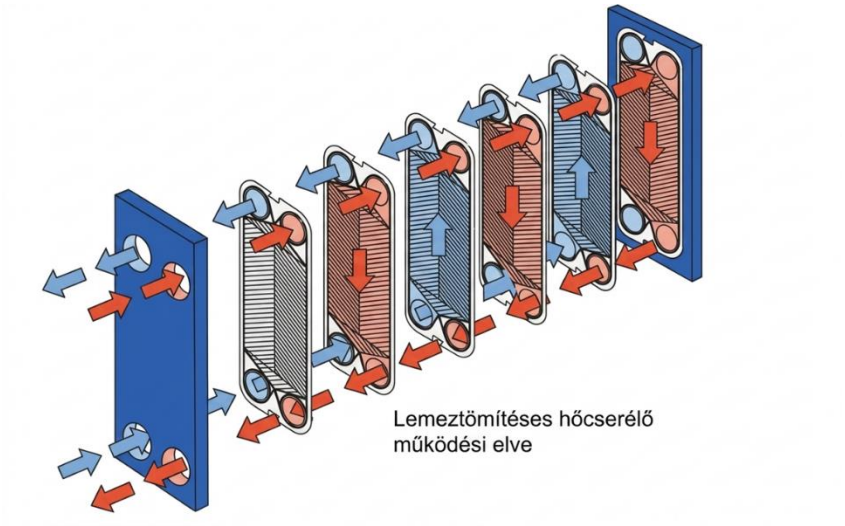
#### 1. Lemezes hőcserélő

A lemezes hőcserélő egy olyan hőcserélő típus, amely fémlemezeket használ, amelyeket párhuzamosan egymásra raknak vagy forrasztanak, üreges fémhéjat képezve a két folyadék közötti hőátadáshoz. Ezek a lemezek nagy felületet hoznak létre a hatékony hőátadás érdekében, miközben a folyadékokat fizikailag elválasztják. A fő alkatrészek a lemezek, tömítések vagy forrasztás és a keret (55. ábra).

**Előnyök:**

1. Rendkívül hatékony hővisszanyerésre ipari folyamatokban és HVAC rendszerekben.

2. Gyakran használják alacsony és közepes hőmérsékletű folyadékokból származó hő visszanyerésére.
3. Kompakt és méretükhöz képest nagy hőcserélő felülettel rendelkeznek.



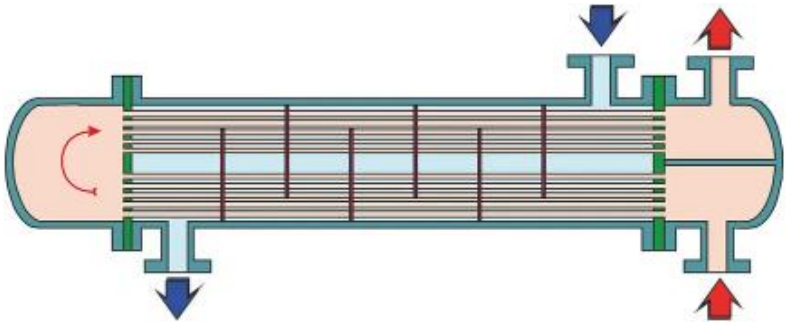

55. ábra. Lemezes hőcserélő működése [7].

### 2. Csőköteges hőcserélő

A csőköteges hőcserélő (56. ábra) úgy működik, hogy két folyadék között hőt visz át egy hengeres héjban elhelyezkedő csősorozaton keresztül. Az egyik folyadék a csöveken keresztül mozog, míg a másik folyadék a csövek külseje körül kering a héj belsejében. Az ilyen típusú hőcserélő fő alkotóelemei a csövek, a héj, a terelőlemezek és a csőlemezek.

**Előnyök:**

1. Ipari alkalmazásokban használják magasabb nyomású és hőmérsékletű folyadékokhoz.
2. Robusztus és alkalmas nagy áramlási mennyiségekhez és igényesebb körülményekhez.
3. Folyadékok és gázok, például ipari folyamatokból származó kipufogógáz kezelésére is alkalmas.



56. ábra. Csőhéjas hőcserélő működése [8].

### 3. Levegő-levegő hőcserélő (rekuperátor)

A levegő-levegő hőcserélőket, amelyeket gyakran rekuperátoroknak is neveznek, két különálló légáram közötti hőátadásra használják, azok keverése nélkül. A hővisszanyerésre általában három fő típust használnak:

1. Fix lemezes hőcserélő.

2. Forgódobos hőcserélő.
3. Hőcsöves hőcserélő.

### a) Fix lemezes hővisszanyerő vagy Keresztáramú/ellenáramú lemezes hőcserélő

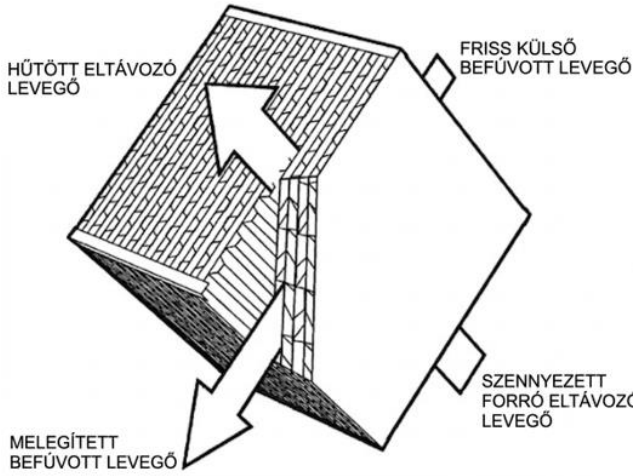
Ez a típus több vékony, lapos lemezből áll, amelyek között kis rések vannak. A kifújt levegő váltakozó csatornákon keresztül áramlik, míg a friss levegő a közeli csatornákon keresztül az ellenkező irányba (ellenáramlásba) áramlik (57. ábra).

### Előnyök:

1. Egyszerű kialakítás jellemzi, mozgó alkatrészek nélkül.
2. Magas termikus hatásfokot ér el ellenáramú vagy keresztáramú rendszerekben.

### Korlátozások:

Nem képes nedvességet átadni; csak érzékelhető hőt (száraz hőt) cserél.




57. ábra. Fix lemezes hőcserélő [9].

### b) Forgódobos hőcserélő

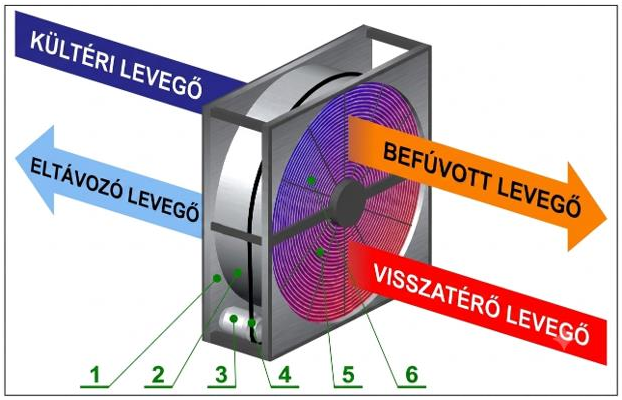
Ez a típus egy forgó kerékkel (vagy rotorral) rendelkezik, amely hőelnyelő anyagból, például alumíniumból készült, és a kifújt levegő és a friss levegőáramok között forog. Forgás közben a rotor felveszi a hőt a kifújt levegőből, és átadja azt a beáramló friss levegőnek (58. ábra).

### Előnyök:

1. Egyaránt szállítja az érzékelhető hőt (hőmérséklet) és a látens hőt (nedvességet), ami segít javítani a beltéri levegő minőségét és a komfortérzetet.
2. Különösen párás környezetben, nagy hatékonysággal működik.

### Korlátozások:

1. Mozgó alkatrészeket tartalmaz, ami több karbantartást igényel.
2. Fennáll a keresztszennyeződés lehetősége a légáramok között.




58. ábra. Forgódobos hőcserélő [10].

### c) Hőcsöves hőcserélő

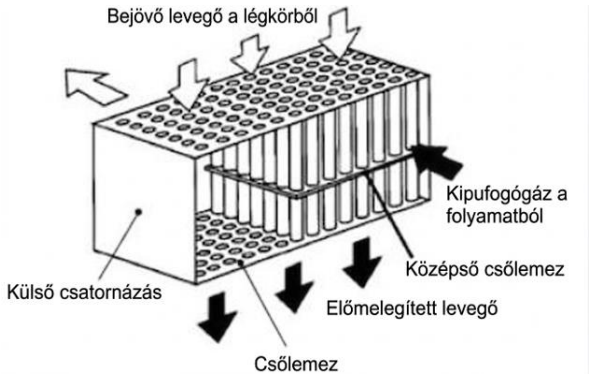
A hőcsövek lezárt csövek, amelyek hűtőközeget vagy munkaközeget tartalmaznak. A hőcső egyik vége a kipufogó levegőáramban (forró oldalon) helyezkedik el, ahol a folyadék elpárolog és hőt nyel el. A keletkező gőz ezután a hidegebb végbe (bejövő friss levegőáram) jut, ahol lecsapódik és leadja az elnyelt hőt. A folyadék ezután kapilláris hatás vagy gravitáció révén visszatér a forró oldalra, és ez a körforgás folytatódik (59. ábra).

### Előnyök:

1. Nincsenek mozgó alkatrészeik, ami nagyon megbízhatóvá teszi őket.
2. Hatékonyan szállítják az érzékelhető hőt.
3. Különböző hőmérsékleteken és nyomásokon működhetnek a munkaközeg változtatásával.

### Korlátozások:

1. Csak érzékelhető hőt adnak át.
2. Nem lehetséges nedvességtartalom átadása.
3. A hatékony működéshez megfelelő telepítési tájolás szükséges.



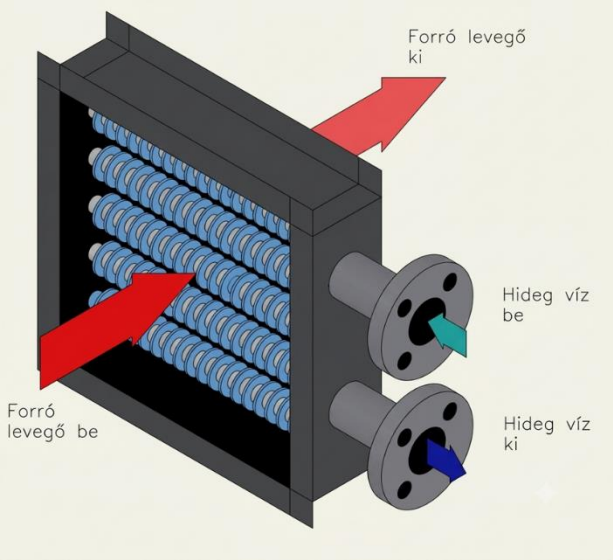

59. ábra. Hőcsöves hőcserélő [11].

4. Tápvízelőmelegítők (Economiser) vagy Füstgáz-hőhasznosítók/Tápvízelőmelegítők (Economiser) vagy Füstgáz-hőhasznosítók

A Tápvízelőmelegítők (Economiser) vagy Füstgáz-hőhasznosítóket alacsony és közepes hőmérsékletű füstgázokból nyerik ki a hőt folyadékok melegítéséhez. Csőkötegből állnak, amelyeken keresztül a tápvíz kering (60. ábra).

Előnyök:

1. Általában erőművekben vagy kazánokban használják őket a füstgázok hőjének kinyerésére és a tápvíz előmelegítésére, ami javítja a hőhatásfokot.
2. Úgy tervezték őket, hogy felfogják az égéstermékekből származó maradék hőt.




60. ábra. Tápvízelőmelegítők (Economiser) vagy Füstgáz-hőhasznosítók/Economizer [11].

.

5. Regeneratív hőcserélők

A regeneratív hőcserélők ideiglenesen tárolják a hőt az egyik folyadékból, majd átadják azt egy másik folyadéknak, megkönnyítve a hővisszanyerést és növelve az energiahatékonyságot. A tipikus hőcserélőkkel ellentétben, ahol a hőátadás egyidejűleg történik két folyadék között, a regeneratív hőcserélők anyagokat (például fémet vagy kerámiát) használnak a hő felváltva történő elnyelésére és leadására [12] .

A regeneratív hőcserélőknek két fő típusa van: a statikus és a dinamikus. Mindkét típus kissé eltérő módon működik, de az alapelv ugyanaz marad: az egyik áramból származó hő tárolása és egy másikba történő átadása.

Előnyök:

1. Magas hőmérsékletű alkalmazásokhoz, például ipari kemencékhez vagy gázturbinás rendszerekhez alkalmasak.
2. Úgy működnek, hogy hőt halmoznak fel egy szilárd közegben, amely ezt a hőt átadja egy munkafolyadéknak.

6. Közvetlen érintkezésű hőcserélők

A közvetlen érintkezésű hőcserélők két folyadékot hoznak közvetlen fizikai érintkezésbe, lehetővé téve a hő közvetlen átadását közöttük elválasztó gát nélkül. Ez ellentétben áll a hagyományos hőcserélőkkel, amelyekben a folyadékok között szilárd falak találhatók. A hőátadás hővezetéssel és konvekcióval történik, és bizonyos esetekben fázisváltozások, például kondenzáció vagy párolgás is végbemehet [13] .

A közvetlen érintkezésű hőcserélőket általában olyan helyeken használják, ahol a két folyadék nem elegyedik (nem keveredhetnek), vagy amikor az egyik fluidum gáz vagy gőz. Különösen hatékonyak bizonyos alkalmazásokhoz, például víz hűtéséhez levegővel vagy gőz kondenzálásához.

**Előnyök:**

1. Ezekben a hőcserélőkben a meleg és hideg folyadékok közvetlenül érintkeznek egymással, így alkalmasak hűtőtornyokban vagy bizonyos geotermikus hővisszanyerő rendszerekben való használatra.
2. Hatékony hőátadást biztosítanak olyan speciális alkalmazásokban, ahol a folyadékok keverése nem jelent problémát.

### 2.2.2 Hulladékhő hasznosítása

Ahogy korábban említettük, a hőcserélők a hulladékhő begyűjtésére használt leggyakoribb technológiák. Miután a hulladékhőt begyűjtötték, közvetlenül felhasználható **(újrafelhasználás )** , vagy számos **aktív technológia** alkalmazható más hőmérsékleti szinten hőenergiává, illetve mechanikai vagy elektromos energiává alakítására.

**Újrafelhasználás**

A hőcserélőket nemcsak a hulladékhő leválasztására, hanem a már megkötött hő felhasználására is használják. Alkalmazhatók primer vagy szekunder rendszerekben:

1. Primer rendszerek: Ebben a rendszerben a hőcserélő közvetlenül a hulladék hőközegből a fő közegbe juttatja a hőt további átvitel és felhasználás céljából.

2. Szekunder rendszerek: Itt a hulladék hőközegből hőt nyernek ki egy szállítófolyadékba (például vízbe vagy olajba), amely ezután egy szekunder hőcserélőbe kerül, hogy felmelegítse a fő közeget felhasználás céljából.

A hulladékhő újrahasznosításának példái:

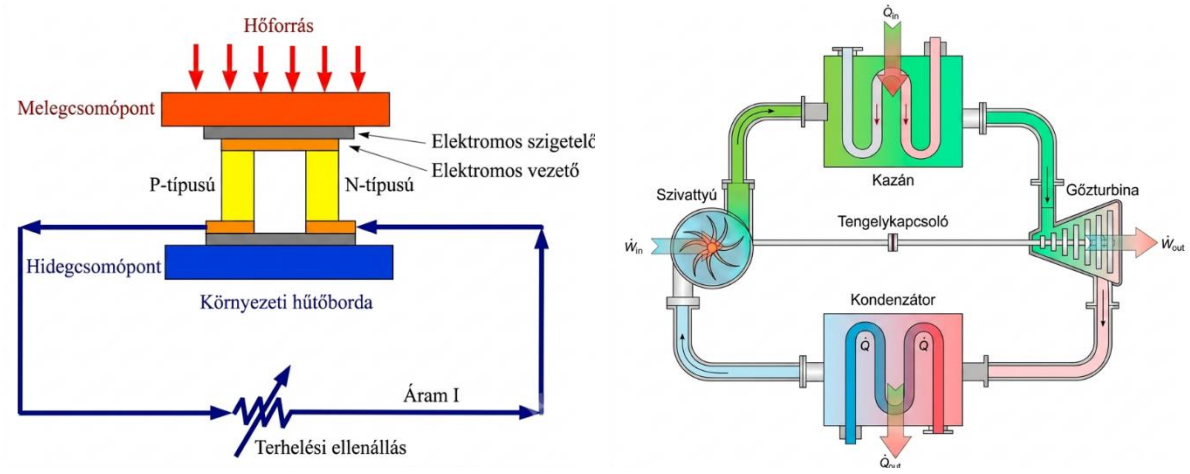
1. Hővisszanyerő gőzfejlesztők (HRSG): hőcserélő, amely a forró füstgázokból származó hulladékhőt felfogja és felhasználja gőz előállítására.
2. Economiser (füstgáz-hőhasznosító): olyan berendezés, amely a kipufogógázokból vagy technológiai folyadékokból visszanyeri a hulladékhőt a víz vagy a levegő előmelegítéséhez.
3. Hővisszanyerős kazánok: Olyan rendszer, amely hasonlóan működik, mint egy gázkazán, de gáz helyett hulladékhőt használ egy hasznos közeg, jellemzően víz melegítésére.

#### *2.2.2.1 Aktív technológiák*

Amikor az elnyelt hulladékhőt termodinamikai ciklus aktiválására használjuk, azt mondjuk, hogy hulladékhő-visszanyerési aktív technológiákat alkalmazunk. Ily módon a hőt felhasználhatjuk hő előállítására egy másik hasznos hőmérsékleti szinten , vagy mechanikai vagy elektromos energia előállítására.

A hulladékhő hasznosítása két fő megközelítést követhet. Az első a hulladékhő mechanikai vagy elektromos energiává alakítása hulladékhő-energiát előállító technológiák segítségével. A leggyakoribb rendszerek a Rankine-cikluson alapulnak, vagy vizet használva a gőz Rankine-ciklusban (SRC), vagy szerves folyadékokat a szerves Rankine-ciklusban (ORC). Termoelektromos generátorokat is alkalmaznak a hő közvetlen villamos energiává alakítására. A második megközelítés a hulladékhő felhasználását jelenti hőenergia előállítására különböző hőmérsékleti szinten. Ez magában foglalja a hűtés előállítására szolgáló technológiákat, például az abszorpciós ciklusokon alapuló termikusan aktivált hűtőrendszereket, valamint a hő magasabb hőmérsékletre történő felfűtésére szolgáló technológiákat, például a hőszivattyúkat. Ezek a hőszivattyúk lehetnek termikusan meghajtottak (abszorpciós ciklusokat használva) vagy gőzkompressziós mechanizmusokon alapulhatnak.

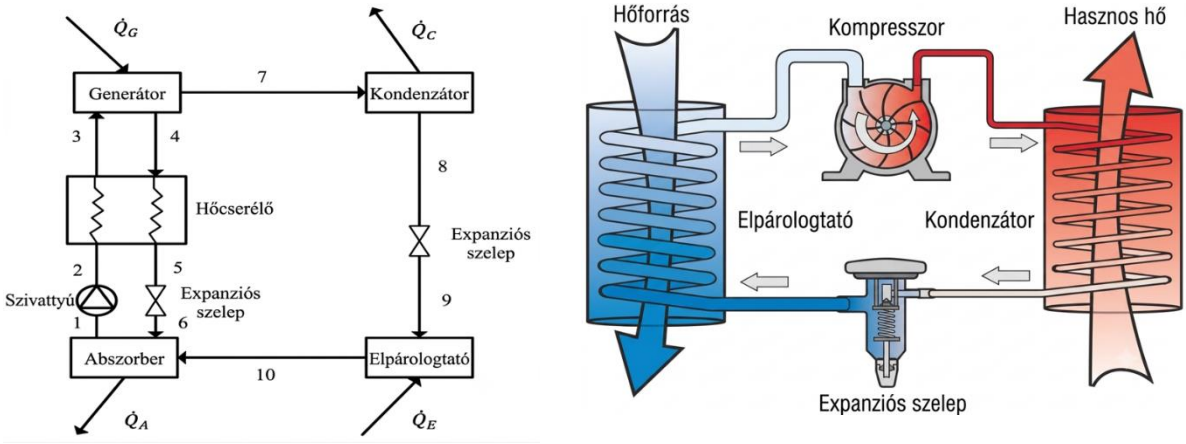
A leggyakrabban használt technológiák a Rankine-ciklus, más néven Rankine-gőz-ciklus (SRC), amely általában gazdaságilag előnyösebb, ha a forrás hőhőmérséklete meghaladja a 400 °C-ot, valamint a szerves Rankine-ciklus (ORC) vagy Kalina-ciklus mérsékelt hőmérsékleti tartományokban. Valamint a termoelektromos generátorok, amelyek alacsonyabb hatásfokkal rendelkeznek, de alkalmasak olyan alkalmazásokhoz, amelyek kis mennyiségű energiát igényelnek egy minimális karbantartást igénylő generátortól (61. ábra).




a) b)

61. ábra. Aktív technológiák, amelyek hulladékhőt használnak fel energiatermelésre , a) termoelektromos, b) gőzös Rankine-ciklus [14,15].

Termikusan vezérelt vagy gőzkompressziós ciklusok. A termikusan vezérelt technológiák, mint például az abszorpciós ciklusok, hideg előállítására (hűtőrendszerek) vagy magasabb hőmérséklet elérésére (hőszivattyúk) használhatók. A magasabb hőmérséklet elérésére összpontosítva a gőzkompressziós ciklus a leggyakoribb technológia (62. ábra).




a) b)

62. ábra. Az aktív technológiák hőt alakítanak hideggé vagy meleggé, a) abszorpciós ciklus, b) gőzkompressziós ciklus [16-18].

A hőszivattyú működésének termodinamikai alapelvei:

A hőszivattyú alapvető termodinamikai elvek alapján működik. Külső energia, jellemzően elektromos vagy mechanikai munka segítségével hőt szállít egy alacsonyabb hőmérsékletű forrásból egy magasabb hőmérsékletű elnyelővel.

A termodinamika második főtétele (Clausius-állítás): A hő természetes módon áramlik egy magasabb hőmérsékletű helyről egy alacsonyabb hőmérsékletű helyre. A hőszivattyú megfordítja ezt a folyamatot azáltal, hogy külső munkát használ fel a hő hideg tartályból egy meleg tartályba történő mozgatására.

A termodinamika első főtétele (energiamegmaradás): Egy rendszerben lévő teljes energia állandó marad:

$Q_{be} + W = Q_{ki}$

$Q_{=}$ Az alacsony hőmérsékletű forrásból (elpárologtatóból) elnyelt hő

W = Munkaráfordítás (kompresszorenergia)

$Q_{ki}$ = A magas hőmérsékletű elnyelőknél (kondenzátornál) felszabaduló hő

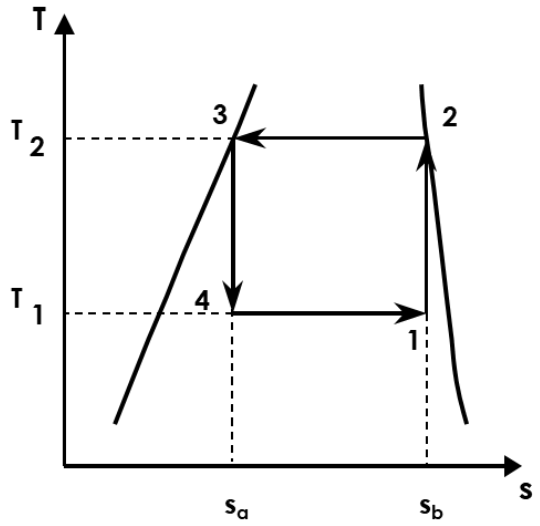
- Hőszivattyúk

Az ideális kompressziós ciklus egy olyan hőerőgép koncepcióján alapul, amely ciklikusan működik két hőforrás között T2 > T1 hőmérsékleten, hőt von el az alacsonyabb hőmérsékletű közegből (Q1 ), és a külső munka révén hőt (Q2) ad át a magasabb hőmérsékletű közegnek.

A Carnot-ciklus a hőszivattyú két hőmérséklet között változó maximális teljesítményét mutatja be, és a Ts-diagramon (63. ábra) vázolt megfordítható átalakulásokból áll.

1-2; a diagram kétfázisú gőzzónájában izentropikus (adiabatikus és reverzibilis) kompresszió megy végbe munka összeadásával.
2-3; a gőz teljes kondenzációja állandó nyomáson és hőmérsékleten, reverzibilis hőátadással megy végbe.
3-4; izentropikus expanzió a telített folyadékponttól (3) a hideg hőmérsékletnek megfelelő nyomásig, ezáltal kétfázisú keveréket (4) hozva létre, és a rendszer bizonyos mennyiségű energiát szállít.

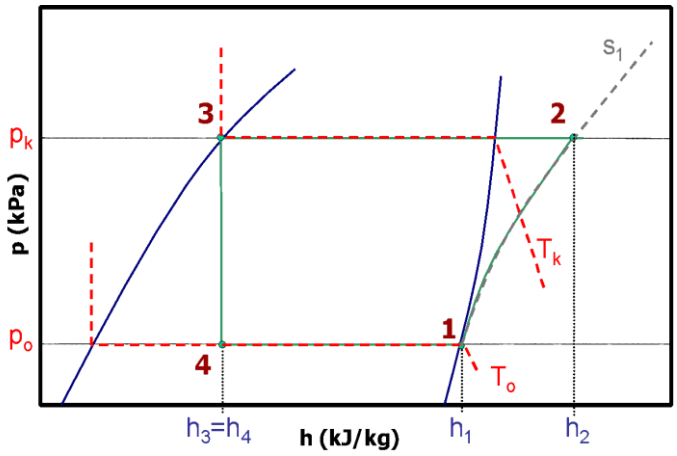
4-1; a (4) állapotban jelen lévő folyadék részleges elpárologtatása, állandó nyomáson és hőmérsékleten.




63. ábra. Ideális (Carnot-) ciklus a Ts diagramon [19].

Az ideális Carnot-ciklus nem megvalósítható, az azzal egyenértékű ideális ciklus számos módosítást foglal magában: 1-2: A kompressziót gázon hajtják végre, ezért legalább az 1. pontnak telített gőznek kell lennie a folyadéklökések elkerülése érdekében. 2-3: A kompresszorból kilépő gázokat telítési hőmérsékletre hűtik, majd egy ideális végtelen felületi hőcserélőben kondenzálják. 3-4: Az egyszerűség és a megbízhatóság kedvéért irreverzibilis izentalpiás expanzió következik be a Carnot-ciklusban bekövetkezett helyett. 4-1: A 4. pontot elérő kétfázisú folyadék egy végtelen hőcserélőben elpárolog, amíg el nem éri a telített gőzt, lezárva az ideális ciklust.

Így a Ph-diagramon ábrázolt ekvivalens ideális ciklus a következő lenne (64. ábra):



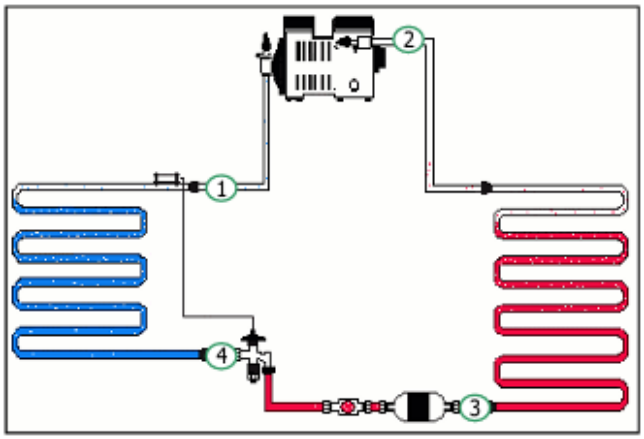

64. ábra. Valós ciklus a Ts diagramon [19].

Végül a párolgási ($T_e$) és kondenzációs ($T_k$) hőmérsékleteknek alacsonyabbnak és magasabbnak kell lenniük, mint a megfelelő források hőmérsékletei ($T_1$ és $T_2$), a kompresszor bemeneténél a gőz túlhevül, a kondenzátor kimeneténél pedig a folyadék túlhűl. Ezenkívül a tényleges kompresszió eltér az izentropikustól. Ezért a kompressziós ciklus a következő:

Amint azt megfigyeltük, gőzkompressziós rendszerekben a munkaközeget alacsony hőmérsékleten forráspontra kell hozni a hideg előállításához, magas hőmérsékleten pedig kondenzációs (vagy hűtési) körülmények közé kell hozni a hő előállításához.

Ezért a gőzkompressziós rendszerek számos folyamatot alkalmaznak egy olyan ciklus befejezéséhez, amely folyamatosan eléri a kívánt célt (hűtés vagy melegítés). A rendszer fő alkotóelemei a munkaközeg (hűtőközeg) mellett az elpárologtató, a kompresszor, a kondenzátor és az expanziós berendezés (65. ábra).

*„A hűtőközeg az az anyag, amely ciklikusan áramlik a rendszer különböző elemein keresztül, alacsony hőmérsékleten hőt nyel el a párologtatóban, és magasabb hőmérsékleten hőt ad le a kondenzátorban. Általában ezek a folyamatok a folyadék halmazállapotának megváltozásával járnak.”*




65. ábra. Gőzkompressziós ciklusvázlat [19].

### 1. Párologtató

Ez egy hőcserélő, amelybe a hűtőközeg kétfázisú keverékként, alacsony hőmérsékleten érkezik. A folyadék a párologtatóban uralkodó nyomásnak megfelelő telítési hőmérsékleten elpárolog, elnyelve a környezetből a párolgáshoz szükséges látens hőt.

### 2. Kompresszor

A hűtőközeg gőz halmazállapotban (általában túlhevített gőzként), alacsony nyomáson és hőmérsékleten érkezik a kompresszorhoz. A kompresszor mechanikusan beszívja a párologtatóban keletkező gőzöket azáltal, hogy alacsonyabb nyomást hoz létre, mint a párologtató, és útja során érzékelhető hőt nyel el. Ezt követően ezeket a gőzöket mechanikusan összenyomják, növelve nyomásukat és hőmérsékletüket.

### 3. Kondenzátor

A hűtőközeg a kompresszor kimenetéből magas nyomáson és hőmérsékleten túlhevített gőzként érkezik a kondenzátorba. Mivel a környezeti hőmérséklet alacsonyabb lesz a hűtőközeg telítési hőmérsékleténél, lehűlés, majd kondenzáció következik be. Ily módon az elpárologtatóban elnyelt látens hő és a sűrítés során elnyelt hő a kondenzátorban átkerül a környezetbe (érzékelhető hűtési hő és a látens kondenzációs hő, amely fűtési alkalmazásokban felhasználható). A hűtőközeg folyadékként (általában túlhűtve) hagyja el a kondenzátort, és az expanziós berendezés vagy a tárolótartály felé vezet.

### 4. Expanziós szelep

A gőzkompressziós ciklus expandere csökkenti a hűtőközeg nyomását és hőmérsékletét, amely telített gőz vagy túlhevített állapotban érkezik a kondenzátorból nagy nyomáson. Ahogy áthalad az expanderen,

a hűtőközeg gyorsan tágul, ami állapotváltozást okoz, ezzel csökkentve a hőmérsékletét, és lehetővé teszi, hogy gőz és folyadék keverékévé váljon. Ez a folyamat kulcsfontosságú, mivel a hűtőközeg, amely most alacsony nyomáson és hőmérsékleten van, képes hőt elnyelni a környezetből az elpárologtatóban, ezáltal elősegítve a hűtést és befejezve a gőzkompressziós ciklust.

- Hőszivattyús technológiák

### 1. Levegő-levegő hőszivattyúk

Működés: Ezek a szivattyúk úgy működnek, hogy egy ventilátor segítségével beszívják a kültéri levegőt, amely ezután egy párologtatón áthalad, ahol felmelegszik. A felmelegített levegőt ezt követően a beltérben keringtetik.

Hatékonyság: Ezen szivattyúk hatásfokát a teljesítmény-tényezővel (COP) mérik, bár ez nagyon hideg körülmények között 1 alá is eshet.

Gyakori felhasználások: Mérsékelt éghajlaton széles körben használják fűtésre és hűtésre, gyakran légkondicionáló rendszerek részeként.

Karbantartás: A hatékonyság fenntartása érdekében elengedhetetlen a szűrők és a hőcserélő rendszeres tisztítása.

### 2. Levegő-víz hőszivattyúk

Működés: Hasonló a levegő-levegő szivattyúkhoz, de a kinyert hőt nem levegőnek, hanem víznek adják át. Ez a meleg víz ezután felhasználható helyiségfűtésre radiátorokon keresztül, vagy használati meleg víz előállítására.

Hatékonyság: Ezek a szivattyúk meglehetősen hatékonyak, különösen alacsony hőmérsékletű fűtési rendszerekkel, például padlófűtéssel párosítva.

Gyakori felhasználási módok: Családi házak és kereskedelmi épületek fűtésére alkalmasak.

Karbantartás: A szivattyú és a vízkör rendszeres ellenőrzése szükséges a korrózió vagy szivárgások megelőzése érdekében.

### 3. Geotermikus hőszivattyúk

Működés: A talajszondás hőszivattyúk földbe süllyesztett csőhálózatot (kollektorokat) használnak a hő kinyerésére a talajból vagy a talajvízből. Ez a kinyert hő ezután átkerül a fűtési rendszerben keringő vízbe.

Hatékonyság: Ezek a rendszerek magas teljesítménytényezővel (COP) rendelkeznek, mivel a talaj hőmérséklete stabilabb, mint a levegő hőmérséklete. 4-es vagy magasabb COP értéket is elérhetnek.

Gyakori felhasználási módok: A talajszondás hőszivattyúk ideálisak új építésű lakó- és kereskedelmi épületekhez, valamint nagyobb épületekhez.

Karbantartás: Általában kevesebb karbantartást igényelnek az idő múlásával, de a kezdeti telepítési költségek magasabbak lehetnek a földalatti kollektorokhoz szükséges fúrás miatt.

### 4. Víz-víz hőszivattyúk

Működés: A víz-víz hőszivattyúk a víztestekből, például folyókból vagy tavakból nyerik ki a hőt, és azt egy vízkörbe továbbítják fűtési vagy hűtési célokra.

Hatékonyság: Ezek a rendszerek nagyon hatékonyak, különösen olyan környezetben, ahol a víz hőmérséklete viszonylag állandó marad.

Gyakori felhasználási módok: A vízhőszivattyúkat gyakran alkalmazzák ipari létesítményekben, nagy épületekben és távfűtési rendszerekben.

Karbantartás: A vízminőség rendszeres ellenőrzése és a csővezeték-rendszerek karbantartása szükséges az optimális teljesítmény biztosításához.

### 5. Abszorpciós hőszivattyúk

Működés: Az abszorpciós hűtők hűtőközeget és abszorbens anyagot (például vizet vagy lítium-bromidot) használnak elektromos kompresszor helyett. Működésük megkönnyítése érdekében hőforrás, például földgáz működteti őket.

Hatékonyság: Az abszorpciós hűtők kevésbé hatékonyak lehetnek, mint a kompressziós rendszerek, de előnyösek azokban az alkalmazásokban, ahol a hulladékhő könnyen rendelkezésre áll.

Gyakori felhasználások: Ezeket a hűtőberendezéseket gyakran megtalálják nagy épületekben, ipari létesítményekben és különféle ipari folyamatokban használt hűtőrendszerekben.

Karbantartás: Az abszorpciós rendszer összetettsége miatt elengedhetetlen a rendszeres karbantartás, amely biztosítja a megbízható és hatékony működést.

### 6. Hibrid hőszivattyúk

Működés: A hibrid fűtési rendszerek egy hőszivattyút egy gázkazánnal vagy más alternatív fűtési rendszerrel kombinálnak. A hőszivattyú az primer fűtési forrás, míg a kazán alacsony hőmérsékleten kapcsol be, amikor további hőre van szükség.

Hatékonyság: Ezek a rendszerek nagy hatékonyságot érhetnek el azáltal, hogy alkalmazkodnak a változó éghajlati viszonyokhoz és optimalizálják az energiafelhasználást egész évben.

Gyakori felhasználási módok: A hibrid rendszerek különösen jól alkalmazhatók olyan éghajlatokon, ahol hideg tél és forró nyár van.

Karbantartás: A hőszivattyú és a kazán rendszeres karbantartása szükséges az optimális teljesítmény és megbízhatóság biztosítása érdekében.

### 7. Reverzibilis hőszivattyúk

Működés: A Reverzibilis hőszivattyúk szükség szerint képesek fűtés és hűtés között váltani. Fordítószelepeket használnak a hűtőközeg áramlásának megváltoztatására, lehetővé téve mind a fűtési, mind a hűtési üzemmódot.

Hatékonyság: Ezek a rendszerek rendkívül hatékonyak, különösen olyan éghajlatokon, ahol gyakran van szükség fűtésre és hűtésre.

Gyakori felhasználások: Általában fűtést és hűtést igénylő helyiségekben használják őket, például kereskedelmi épületekben és lakóövezetekben található speciális helyiségekben.

Karbantartás: A fűtési és hűtési funkciók zökkenőmentes és hatékony működésének biztosításához elengedhetetlen a rendszeres karbantartás.

## 8. Inverteres hőszivattyúk

Működés: Az inverteres hőszivattyúk inverter technológiát alkalmaznak, amely lehetővé teszi a kompresszor sebességének a fűtési vagy hűtési igény alapján történő beállítását. Ez lehetővé teszi a rendszer hatékonyabb működését a változó körülményekhez igazodva.

Hatékonyság: Ezek a rendszerek a különböző sebességeken való működésnek köszönhetően fokozott hatékonyságot biztosítanak, ami segít csökkenteni az energiafogyasztást a hagyományos rendszerekhez képest.

Gyakori felhasználások: Az inverteres hőszivattyúkat gyakran használják légkondicionáló rendszerekben és épületfűtési alkalmazásokban.

Karbantartás: Általában kevesebb karbantartást igényelnek, mint a hagyományos rendszerek; azonban az inverteres technológia további bonyolultságot okozhat, ami gondosabb felügyeletet igényelhet.

## 9. Hulladékhő-szivattyúk

Működés: A hővisszanyerő rendszerek az ipari folyamatokból vagy hűtőrendszerekből származó hulladékhőt felfogják, és fűtési alkalmazásokhoz hasznosítják újra.

Hatékonyság: Ezek a rendszerek rendkívül hatékonyak, hatékonyan csökkentik az energiapazarlást és maximalizálják a rendelkezésre álló energia felhasználását.

Gyakori felhasználási módok: A hővisszanyerő rendszereket gyakran alkalmazzák ipari környezetben, valamint épületek fűtésére.

Karbantartás: Az optimális teljesítmény biztosítása érdekében ezek a rendszerek gondos tervezést és rendszeres felügyeletet igényelnek a hővisszanyerési folyamat hatékonyságának fenntartása érdekében.

- Hőszivattyúk osztályozása: A termelési hőmérséklet figyelembevételével

A hőszivattyúkat a termelt hő hőmérséklete alapján osztályozzák, ami meghatározza a különböző alkalmazásokhoz való alkalmasságukat. Az osztályozás jellemzően a következőket tartalmazza:

### a) Alacsony hőmérsékletű hőszivattyúk (<45°C):

Tipikus előremenő hőmérséklet: 30°C - 45°C (térfűtés)

### b) Közepes hőmérsékletű hőszivattyúk (45°C – 75/90°C)

Tipikus előremenő hőmérséklet: 45°C - 75°C

Alkalmazások:

1. Használati melegvíz (HMV) előállítása.
2. Radiátoros fűtési rendszerek (régi épületek felújítása).
3. Folyamathűtés élelmiszer-, textil- és vegyipar számára.

### c) Magas hőmérsékletű hőszivattyúk (>75/90°C)

Tipikus előremenő hőmérséklet: 75°C - 150°C és több

Alkalmazások:

1. Ipari feldolgozási melegítés (szárítás, sterilizálás és kémiai feldolgozás).
2. Távfűtési hálózatok.
3. Gőztermelés energiatermelésre és ipari felhasználásra.

- Hőszivattyú alkalmazása hulladékhő esetén

Amint azt korábban említettük, a hulladékhő négy hőmérsékleti szintre sorolható, amelyek közül az alacsony minőségű hő a legalkalmasabb a hőszivattyúkhoz. Az alacsony minőségű hő a 100°C alatti hőmérsékletű hőt jelenti. Bár ezek a hőmérsékletek gyakran túl alacsonyak az ipari folyamatokban való közvetlen felhasználáshoz, mégis értékesek lehetnek lakó- és kereskedelmi épületek fűtésére és vízmelegítésére, vagy bizonyos ipari műveletek hatékonyságának javítására.

A hőszivattyúk alacsony minőségű hőt tudnak hasznosítani azáltal, hogy a hőmérsékletét megfelelőbb szintre emelik, az adott igényektől függően. Ezenkívül az alacsony minőségű ipari hő kinyerhető az ipari folyamatok hűtővizéből. A hőszivattyúk leggyakoribb felhasználási területei a hulladékhő visszanyerésében a következők:

1. Lepárlók
2. Ipari mosodák
3. Hulladékhő távfűtés
4. Szupermarketek
5. Adatközpontok

- Hőszivattyúk konfigurációi és csatlakozásai különböző hulladékhő-forrásokhoz

1. Közvetlen csatlakozás az primer áramkörhöz

**Alkalmazás:** Ezt a megközelítést gyakran alkalmazzák, amikor a hulladékhő egy keringő folyadékot, például forró vizet vagy kipufogógázokat magában foglaló folyamatból származik.

**Konfiguráció:** Ebben a konfigurációban a hőszivattyú hőcserélője közvetlenül a hulladékhőforrás áramköréhez csatlakozik. Ez lehetővé teszi, hogy a hulladékfolyadék átfolyjon a hőszivattyú elpárologtatóján vagy kondenzátorán.

**Előnyök:** Ez a konfiguráció csökkenti a hőmérséklet-veszteséget és növeli a hatékonyságot, kiküszöbölve a közbenső hőcserélők szükségességét.

**Hátrányok:** Teljes kompatibilitást igényel az anyagok és a hőmérsékletek tekintetében a szivattyú és a hőforrás között, ami korlátozhatja a tervezési lehetőségeket.

2. Köztes hőcserélő (közvetett rendszer)

**Alkalmazás:** Ez a módszer akkor előnyös, ha a hulladékhő-folyadék korrozív, szennyeződéseket tartalmaz, vagy hőmérséklete meghaladja a hőszivattyú berendezésének határértékeit.

**Konfiguráció:** Egy további hőcserélő, például lemezes vagy csöves hőcserélő kerül beépítésre, amely a hulladékfolyadékból egy közbenső folyadékba viszi át a hőt, amelyet aztán a szivattyú elpárologtatójába vezetnek.

**Előnyök:** Ez a beállítás megvédi a hőszivattyúrendszert a szennyeződésektől és lehetővé teszi a hőmérséklet-modulációt.

**Hátrányok:** Extra karbantartást igényel.

3. **Zárt hurkú rendszer szekunder hőfolyadékokkal**

**Alkalmazás:** Ez a megközelítés tökéletes a hő összegyűjtésére különféle elosztott hulladékforrásokból, például épületek szellőzőlevegőjéből vagy ipari folyamatok több pontjáról.

**Konfiguráció:** Egy szekunder folyadékkör összegyűjti a hőt ezekből a különböző forrásokból, és a hőszivattyúhoz csatlakoztatott hőcserélőbe szállítja.

**Előnyök:** Lehetővé teszi a hőgyűjtést több forrásból, és egyszerűsíti a hőgazdálkodást az elosztott hulladékhő-források között.

**Hátrányok:** Ez a rendszer további csővezeték-infrastruktúrát és potenciálisan extra szivattyúrendszereket igényel a szekunder folyadékhoz.

4. **Tárolórendszerek (termikus tárolótartályok)**

**Alkalmazás:** Ez a konfiguráció ideális olyan hulladékhőforrásokhoz, amelyek változó vagy szakaszos hőáramlást mutatnak.

**Konfiguráció:** Ebben a beállításban a hulladékhőt egy hőtárolóban tárolják. A hőszivattyú ehhez a tartályhoz csatlakozik, hogy csúcsidőszakban vagy amikor a hőforrás nem működik, elnyelje a hőt.

**Előnyök:** Maximalizálja a hulladékhő hasznosítását, különösen akkor, ha a hőszivattyú iránti igény nincs összhangban a hő rendelkezésre állásával.

**Hátrányok:** További helyet igényel a hőtároló tartály számára, és pontos vezérlést igényel a hőfeltöltés és -kisütés folyamatainak optimalizálásához.

5. **Integráció levegő- vagy gázáramlásokkal**

**Alkalmazás:** Ez a konfiguráció a kipufogógázokból vagy szellőzőrendszerekből származó hulladékhő leválasztására szolgál.

**Konfiguráció:** Egy levegő-víz vagy levegő-hűtőközeg hőcserélő csatlakozik a hőszivattyú bemenetéhez, ami elősegíti a hő átadását a gázáramokból.

**Előnyök:** Hatékonyan nyeri ki mind az érzékelhető hőt (hőmérsékletfüggő), mind a látens hőt (nedvességfüggő) a kipufogógázokból.

**Hátrányok:** Az optimális hőátadási hatékonyság fenntartása bonyolult lehet a levegő- vagy gázáramlási sebesség pontos beállításának szükségessége miatt.

## 2.3 Kiválasztott városi hulladékhőforrások távfűtéshez

A hulladékhő értékes, mégis gyakran kihasználatlan energiaforrás a távfűtési rendszerekben. Azáltal, hogy megkötik az ipari folyamatok, az energiatermelés vagy a kereskedelmi műveletek során egyébként elvesző hőenergiát, az energiaközösségek jelentősen javíthatják az általános hatékonyságot és fenntarthatóságot. A hulladékhő integrálása a távfűtési hálózatokba csökkenti az primer energiafogyasztást, mérsékli az üvegházhatású gázok kibocsátását, és javítja a rendszer gazdasági életképességét.

### 2.3.1 Adatközpontok hulladékhője

Az adatközpontok a digitális gazdaság leggyorsabban növekvő energiafogyasztói közé tartoznak. 2010-ben az adatközpontok globális villamosenergia-fogyasztása elérte a 350 TWh-t, ami a világ villamosenergia-felhasználásának több mint 1%-át tette ki. Európában a fogyasztás 2007-ben 56 TWh/év volt, és várhatóan 2020-ra eléri a 104 TWh/évet, olyan trendek hatására, mint a streaming szolgáltatások és a dolgok internete (IoT).

A hűtőrendszerek elengedhetetlenek az informatikai berendezések megfelelő vagy előírt üzemi feltételeinek fenntartásához, és egy adatközpont teljes energiafogyasztásának körülbelül 40%-át teszik ki. Ez a hűtési folyamat jelentős mennyiségű hulladékhőt termel, amely visszanyerhető és hasznosítható a távfűtési hálózatokban.

Például egy közepes méretű, 1 MW informatikai kapacitású adatközpont évente körülbelül 3700 MWh hőt bocsát ki a hűtőrendszerein keresztül. Ez körülbelül 0,46 MWh hőenergiának felel meg minden 1 MWh villamosenergia-fogyasztás után. A nagyobb létesítmények elérhetik az 5 MW villamos teljesítményt, míg a legtöbb központ 500 kW alatt működik, sokuk 500 kW és 5 MW közötti teljesítményű.

Az adatközpontokból visszanyert hő hőcserélők, és szükség esetén hőszivattyúk segítségével integrálható a távfűtési rendszerekbe, hogy a hőmérsékletet a kívánt szintre emelje. Ez a megközelítés a hűtési igényt értékes energiaforrássá alakítja, javítva az általános energiahatékonyságot és csökkentve az üvegházhatású gázok kibocsátását.

### 2.3.2 Metróalagutakból származó hulladékhő

A metrórendszerek jelentős mennyiségű, alacsony minőségű hulladékhőt termelnek, amely elsősorban a vonatok fékezése és a metrókocsik szellőztetése során keletkezik. Ez a hő, amely gyakran a környezetbe disszipál, befogható és integrálható a távfűtési hálózatokba, különösen a sűrűn lakott városi területeken.

Globálisan 148 városban működnek metróhálózatok, amelyek körülbelül 11 000 km vonalat fednek le, és napi 151 millió utast szolgálnak ki. Az Európai Unión belül körülbelül 50 közepes és nagyvárosban működnek metrórendszerek, összesen 2800 km vonallal, és napi 31 millió utast szállítanak. Ezen rendszerek becsült hulladékhő-potenciálja évi 6,7 és 11,2 TWh között mozog.

Az állomások jellemzően körülbelül 1 km távolságra helyezkednek el egymástól, ami gyakori lehetőséget teremt a hővisszanyerésre. Hőcserélők szellőzőaknákban történő telepítésével vagy hőszivattyúk használatával a hőmérséklet növelése érdekében ez az egyébként elvesző energia értékes erőforrássá alakítható a távfűtés számára, csökkentve az primer energiaigényt és javítva a fenntarthatóságot.

### 2.3.3 Csatornahálózatokból származó hulladékhő hőszivattyúk használatával

A városi csatornahálózatok stabil és hozzáférhető alacsony hőmérsékletű hőforrást biztosítanak, amely távfűtéshez hasznosítható. A szennyvíz éves átlaghőmérséklete jellemzően 10–15 °C között van, nyáron pedig akár 20 °C-ot is elérhet, így alkalmassá teszi hőszivattyús alkalmazásokhoz.

A csatornarendszerekbe hőcserélők telepítésével és hőszivattyúkkal való összekapcsolásával a városok ezt a látens energiát értékes erőforrássá alakíthatják. A 10 000 lakosnál nagyobb településeken a szennyvíz hővisszanyerése a teljes hőigény akár 5%-át is fedezheti, ami Európa-szerte becslések szerint

évi 150 TWh-nak felel meg. Csak Németországban ez a technológia az épületállomány 20%-át tudná fűtési energiával ellátni.

Számos sikeres projekt valósult már meg, köztük kölni és nizzai rendszerek, amelyek demonstrálják ennek a megközelítésnek a műszaki megvalósíthatóságát és gazdasági potenciálját. A szennyvíz hővisszanyerése nemcsak csökkenti az primer energiafogyasztást, hanem hozzájárul a városi fűtési rendszerek dekarbonizációjához is.

A szennyvíz hőveszteségét hasznosító rendszer fő alkotóelemei a következők:

Szennyvízcsatorna: Egy nagy földalatti cső, amely a városi területekről szállítja a szennyvizet. Az alacsony hőmérsékletű hő primer forrása a hasznosításhoz.

Szennyvíz: A csatornában áramló tényleges víz, amelynek hőmérséklete jellemzően évi 10–15 °C, nyáron pedig akár 20 °C is lehet, így alkalmas hő kinyerésére.

Szennyvíz-hőcserélő: A csatornába vagy annak közelébe telepített eszköz, amely a szennyvízből a hőt egy szekunder vízkörbe vezeti a két folyadék összekeverése nélkül. Ez a hőenergia begyűjtésének első lépése.

Keringtető szivattyú: Biztosítja a szekunder vízkör folyamatos áramlását a hőcserélőn keresztül a hőszivattyú felé, fenntartva a hatékony hőátadást.

Víz-víz hőszivattyú: A szennyvíz alacsony hőmérsékletű hőjét magasabb hőmérsékletűre, távfűtésre alkalmassá teszi. Ehhez zárt hűtőkörforgást használ.

### 2.3.4 Hulladékhő hasznosítása : a fogyasztóból termelő-fogyasztó lesz

A hulladékhő-visszanyerés átalakítja az energiaközösségek működését. Hagyományosan a fogyasztók a központosított rendszerek által biztosított hő passzív befogadói voltak. Manapság olyan technológiák révén, mint a hőcserélők, hőszivattyúk és az intelligens integráció, a fogyasztók „termelő-fogyasztókká” válhatnak – azaz egyszerre termelik és fogyasztók a hőenergiát.

Az olyan forrásokból származó hulladékhő hasznosításával, mint az adatközpontok, metróalagutak és csatornahálózatok, az épületek és létesítmények aktívan hozzájárulnak a távfűtési hálózathoz. Ez a megközelítés csökkenti az primer energiaigényt, mérsékli az üvegházhatású gázok kibocsátását és növeli a rendszer ellenálló képességét. Gazdasági lehetőségeket is teremt, mivel a termelő-fogyasztók ellensúlyozhatják az energiaköltségeket, vagy akár bevételt is generálhatnak a többlet hő szállításával.

A fogyasztóról a termelő-fogyasztóra való áttérés paradigmaváltást jelent a távfűtésben: az egyirányú ellátási modellről egy együttműködő energia-ökoszisztémára. A hulladékhő hasznosítása nemcsak műszaki megoldás, hanem a fenntartható városi energiastratégiák sarokköve is.

# 3. Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP)

## 3.1 Bevezetés a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerekbe

A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP), más néven kogeneráció, hatékony módszer a villamos energia és hő egyidejű előállítására ugyanazon energiaforrásból. A hagyományos rendszerekkel ellentétben, ahol a villamos energiát és a hőt külön állítják elő, a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés során keletkező hulladékhőt hasznos hőenergiává, például gőzzé vagy melegvízzé alakítják ipari folyamatokhoz, fűtéshez vagy hűtéshez [20] . A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés két típusba sorolható:

**a) Előkapcsolt (topping) körfolyamat**

Leírás: Ebben a ciklustípusban először elektromos áram termelődik (a ciklus „elején"), majd a folyamat során keletkező felesleges hőt fűtési célokra használják fel (a ciklus „végén") (66. ábra).

**Folyamat** :

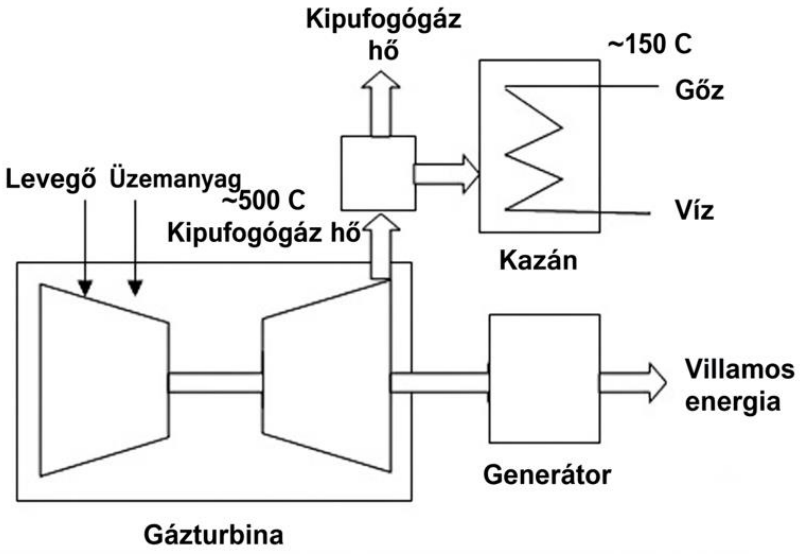
Az üzemanyagot (például földgázt vagy biomasszát) egy primer hajtóműben, például gázturbinában vagy belső égésű motorban elégetik, hogy villamos energiát termeljenek.

A motor vagy turbina által termelt forró kipufogógázokat ezután felfogják, és gőz vagy meleg víz előállítására használják fűtési alkalmazásokhoz.

Ezt a ciklust jellemzően ipari környezetben vagy távfűtési rendszerekben használják, ahol állandó igény van mind az elektromos áramra, mind a hőre [21] .

**Előnyök** : Ez a fajta ciklus maximalizálja a magas hőmérsékletű kipufogógázok felhasználását, először áramot termel, a fennmaradó energiát pedig fűtésre használja fel. Hatékonyabb, ha nagy az áramigény, és a keletkezett hő teljes mértékben hasznosítható.

**Gyakori alkalmazások** : Általában ipari folyamatokban, nagyméretű épületekben és távfűtési rendszerekben használják.




66. ábra. Előkapcsolt körfolyamat [19].

### b) Utókapcsolt (bottoming) körfolyamat

Leírás: A ciklus alsó vagy alsó végén először a hő termelődik (a ciklus „végén”), majd a folyamat későbbi szakaszában ennek a hőnek a felhasználásával keletkezik az elektromos áram (67. ábra).

Folyamat :

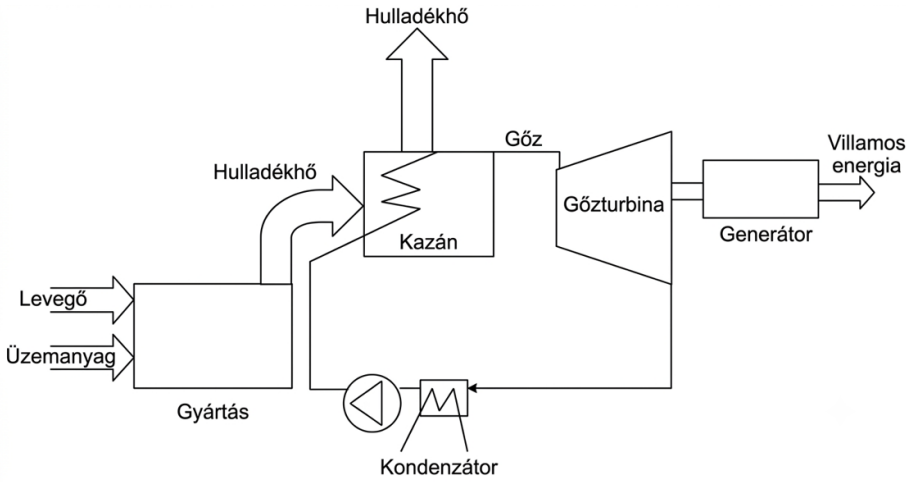
A rendszer hőtermeléssel kezdődik, jellemzően egy hagyományos hőforrás, például kazán vagy ipari hulladékhő segítségével.

Ezt a hőt ezután gőz előállítására használják, amely egy gőzturbinát hajt meg villamos energia előállításához. Bizonyos esetekben ez egy szekunder ciklussal is kombinálható további villamosenergia-termelés céljából.

Az eljárás ritkább, mint a fejvégi ciklus, de néha olyan létesítményekben használják, ahol a hő az primer követelmény, és az áramtermelés szekunder [21] .

Előnyök : Ideális olyan folyamatokhoz, ahol jelentős mennyiségű hulladékhő áll rendelkezésre, és az primer cél a hőtermelés , a villamos energia pedig melléktermék. Hasznos lehet olyan létesítményekben is, ahol az ipari folyamatokból származó hővisszanyerés vagy a hulladékhő könnyen elérhető.

Gyakori alkalmazások : Gyakran használják hulladékhasznosító erőművekben, ahol a hulladékégetési folyamatból származó hőt villamos energia előállítására lehet felhasználni.




67. ábra. Utókapcsolt körfolyamat [19].

Főbb különbségek

1. A Head-End kapcsolt energiatermelés elsősorban az áramtermelésre összpontosít, majd a kipufogógáz hőjét használja fel fűtésre, míg a Tail-End kapcsolt energiatermelés elsősorban a hőtermelésre összpontosít, a termelt villamos energia szekunder előny.
2. Hatékonyság : A kapcsolt energiatermelés a főoldalon gyakran hatékonyabb azokban a rendszerekben, ahol jelentős az igény mind a villamos energiára, mind a hőre, mivel biztosítja, hogy a villamos energia a legmagasabb hőmérsékletű forrásból származzon. A kapcsolt energiatermelés a végső oldalon előnyösebb lehet azokban a rendszerekben, ahol a hulladékhő-visszanyerés vagy a hőigény az primer.

A termelt elektromos energia általában az üzemanyag energiatartalmának 30–40%-át teszi ki. Még a legfejlettebb erőművekben is ez eléri a maximumot, körülbelül 60%-ot (Európai Bizottság, 2017).

Különböző kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő technológiákat fejlesztettek ki, amelyeket két fő csoportba soroltak:

- Rugalmas egységek :

Ezek a rendszerek a hőigény alapján tudják beállítani a teljesítmény-hő arányukat. Jellemzően gőzturbinákat használnak, ahol a gőz egy részét meghatározott pontokon kinyerik a hőtermelés érdekében. A kivont gőz azonban nem használható fel villamosenergia-termelésre, ami kompromisszumot eredményez az energia- és hőtermelés között [21] . Ezek az egységek a következő módokon működhetnek:

a) Teljes kogenerációs üzemmód : Maximális hőtermelés.

b) Teljes kondenzációs üzemmód : Maximális villamosenergia-termelés hasznos hőtermelés nélkül.
A működés a konkrét hőigénytől függ.

Különböző kapcsolt hő- és villamosenergia-termelési technológiák:

1. Kombinált ciklusú gázturbina hővisszanyeréssel, beleértve egy Kondenzációs elvételes gőzturbinát – rugalmas energia-hő arány.
2. Kombinált ciklusú gázturbina hővisszanyeréssel kondenzációs elszívóturbina nélkül.
3. Gőz ellennyomású turbina.
4. Gőzkondenzációs extrakciós turbina - rugalmas teljesítmény-hő arány.
5. Hővisszanyerős gázturbina.
6. Belső égésű motor.
7. Mikroturbinák.
8. Stirling motorok.
9. Üzemanyagcellák.
10. Gőzgépek.
11. Szerves Rankine-ciklusok.

Dugattyús motorok

Mérettartomány: 10 kW-tól 10 MW-ig

Alkalmazások: egyetemek, kórházak, víztisztító létesítmények, ipari létesítmények, kereskedelmi épületek és többlakásos házak.

Gázturbinák

Mérettartomány: 1 MW-tól 300 MW-ig

Alkalmazások: kórházak, egyetemek, vegyi üzemek, finomítók, élelmiszer-feldolgozás, papírgyártás, katonai bázisok.

Mikroturbinák

Mérettartomány: 30 kW - 330 kW (1 MW-ot meghaladó moduláris csomagok)

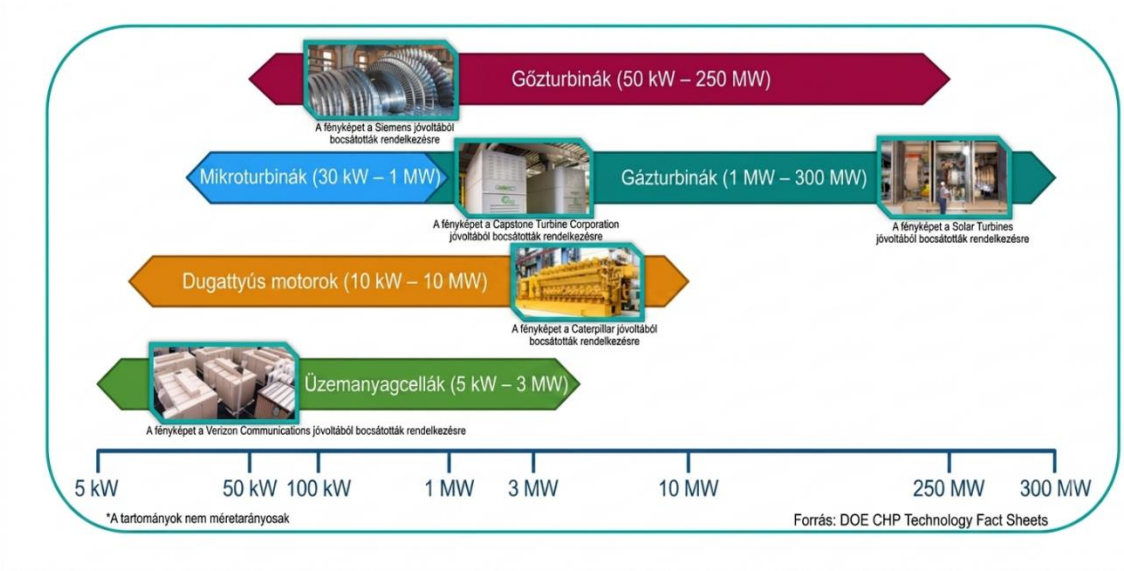
Alkalmazások : társasházak, szállodák, idősek otthona, szennyvíztisztítás , gáz- és olajtermelés.

## Üzemanyagcellák

Mérettartomány: 5 kW-tól 2,8 MW-ig

Alkalmazások: adatközpontok, szállodák, irodaépületek , szennyvízkezelés

A 68. ábra a korábban említett CHP-technológiák hatótávolságát mutatja.




68. ábra. A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő technológiák teljesítménytartománya [22].

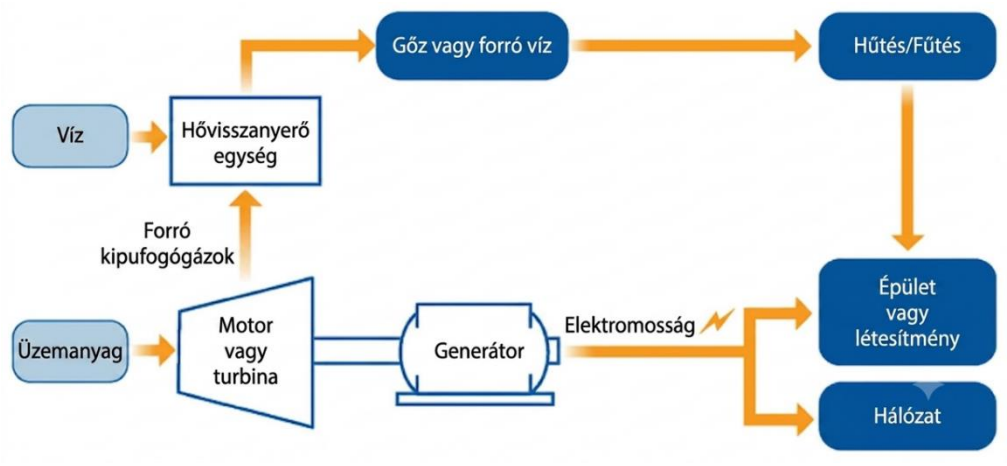
**Egy kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő berendezés standard beállítása** (a 2008/952/EK bizottsági határozat alapján) [23]

A gőzzel hajtott CHP-berendezés (1-5 technológia) működtetéséhez szükséges főbb komponensek a következők (69. ábra):

1. Kazán gőz előállítására.
2. Egy turbina, amely a gőzt mozgási energiává alakítja.
3. Egy generátor az átalakításhoz a kinetikus energiát elektromos energiává alakítjuk.
4. Hőcserélő, amely hasznos hőt juttat el a távfűtési hálózatba.
5. Ipari alkalmazásokban a kipufogógázok gyakran közvetlenül fűtési célokra használhatók.

Gyakran további kazánokat telepítenek tartalékként vagy a rendszer támogatására nagy hőigényű időszakokban, például télen. Ezeket a kazánokat nem tekintik a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő egységek részének.

Bizonyos esetekben a kogenerációs egységet gőzzel ellátó kazán kettős célt is betölthet, gőzt termelve mind a kogenerációs egység, mind például az ipari ügyfelek számára (kettős célú kazán).




69. ábra. A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) ciklusának fő alkotóelemei [22].

**Fő paraméterek ( 1-5. egyenletek )**

Elektromos teljesítmény ( $\dot{P}_e$): $\dot{P}_e = \frac{\dot{Q}_{üzemanyag} \times \eta_{generator}}{folyadék\ hőmérséklete}$ (1)

Hőteljesítmény ( $\dot{Q}_t$): $\dot{Q}_t = \dot{m} \times C_P \times (T_{out} - T_{in})$ (2)

Összhatásfok ($\eta_x$): $\eta_x = \frac{\dot{P}_e + \dot{Q}_t}{\dot{Q}_{üzemanyag}} \times 100$ (3)

Hő-villamosenergia arány (C/E): $\frac{C}{E} = \frac{\dot{Q}_t}{\dot{Q}_e}$ (4)

Terhelési tényező: $FL = \frac{p_{átl}}{P_{max}}$ (5)

## 3.2 A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek szerepe a hőtermelésben és integrációjuk különböző technológiákba, például a távfűtésbe (DHN)

A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek jelentős szerepet játszanak a hőtermelésben azáltal, hogy egyetlen üzemanyagforrásból egyidejűleg termelnek villamos energiát és hasznos hőenergiát. Ez a kettős termelés növeli az energiahatékonyságot azáltal, hogy felhasználja azt a hőt, amely egyébként kárba vész a hagyományos energiatermelési módszerekben. A hőtermelés során a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek ipari folyamatokhoz, kereskedelmi épületekhez vagy távfűtési rendszerekhez is biztosíthatnak hőt. Ez nagyobb hatékonyságot tesz lehetővé a hagyományos kazánokhoz képest, mivel az egyébként villamosenergia-termelés során kárba vész hőt víz vagy levegő melegítésére használják fel. Ezenkívül a helyszíni villamosenergia-termeléssel a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek csökkentik a nagy távolságú villamosenergia-átvitellel járó veszteségeket [24] .

**CHP-hatékonyság**

**a) Ha egy 3-as és 5-11-es** technológiát alkalmazó CHP-egység 75%-os vagy annál magasabb összhatásfokot ér el, akkor feltételezhető, hogy a megfigyelt vagy mért időszakban teljes kapcsolt

energiatermelési üzemmódban működött. Így a generátor bilincsein mért összes villamos energia CHP-áramnak minősül.

**b)** Ha egy, az 1., 2. és 4. pontban felsorolt technológiát alkalmazó CHP-egység 80%-os vagy annál magasabb összhatásfokot ér el, akkor feltételezhető, hogy a megfigyelt időszakban teljes kapcsolt energiatermelési üzemmódban működött. Ezért a generátor bilincsein mért összes villamos energia CHP-áramnak minősül.

**c)** Ha a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő egység összhatásfoka ezen minimum küszöbértékek alá esik, feltételezhető, hogy az egység a megfigyelési időszak alatt nem működött teljes kapcsolt energiatermelési üzemmódban. Következésképpen valószínűleg mind kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés, mind nem kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés történt.

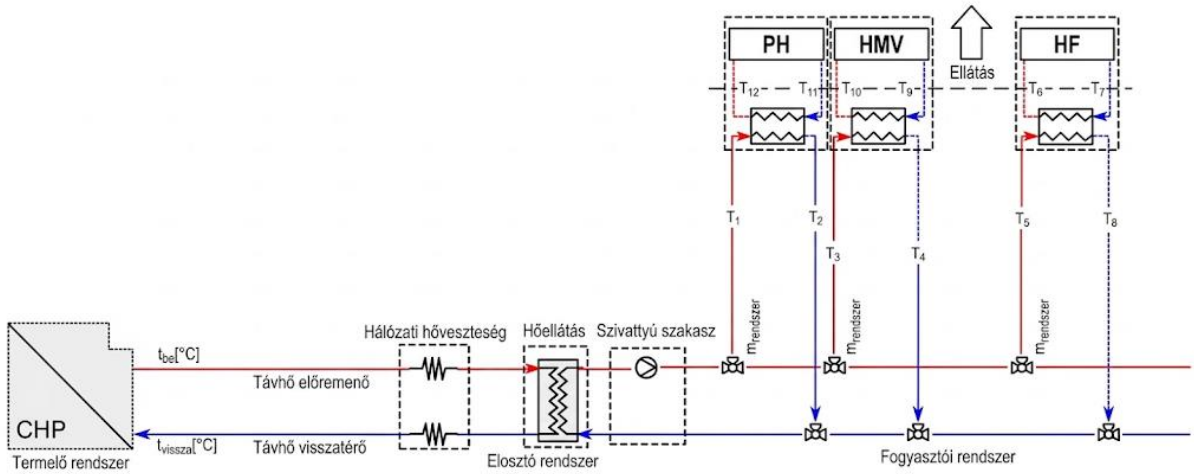
Integrációs folyamat a DHN-be (70. ábra)

**1. Hővisszanyerés** : Egy kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerben a villamosenergia-termelés során keletkező felesleges hőt összegyűjtik és fűtési célokra használják fel. Ezt a visszanyert hőt ezután a távhő-ellátó rendszerbe (DHN) táplálják . A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszer hálózathoz csatlakoztatásával hőt lehet biztosítani a körzeti lakossági, kereskedelmi vagy ipari felhasználók számára.

**2. Hőcserélő egységek : A hőcserélő a kapcsolt hőtermelő rendszer forró folyadékainak (például füstgázok vagy** hűtőfolyadék ) hőenergiáját a távfűtési rendszeren (DHN) keringő távfűtési vízbe juttatja. A hőcserélő biztosítja, hogy a hőenergia hatékonyan kerüljön átvitelre a két folyadékáram összekeveredése nélkül.

**3. Terheléselosztás : A távfűtési** hálózatok (DHN-ek) jellemzően a napszaktól vagy az évszaktól függően változó hőigényűek. A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek (CHP) integrációja segíthet kiegyensúlyozni ezt a terhelést. Nagy igényű időszakokban a CHP-rendszer növelheti a hőteljesítményét, míg alacsony igényű időszakokban csökkentheti a hőtermelést, és jobban a villamosenergia-termelésre összpontosíthat.

**4. Energiatárolás és pufferelés** : Az integráció további fokozása érdekében hőtároló rendszerek (például hőtároló tartályok) használhatók. Ezek a rendszerek tárolják a felesleges hőt, amikor a termelés meghaladja az igényt, és felszabadítják, amikor az igény meghaladja a kapcsolt hőtermelő rendszerből rendelkezésre álló hőt. Ez javítja a távfűtéses hőközpont rugalmasságát és biztosítja a folyamatos hőellátást.



70. ábra. A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) ciklusának fő alkotóelemei [25].

A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) technológia előnyei

A kapcsolt energiatermelés általános előnyei:

1. Energiahatékonyság : A kapcsolt energiatermelés lehetővé teszi a villamos energia és a hasznos hő egyidejű előállítását, növelve a rendszer összhatékonyságát és csökkentve az üzemanyag-fogyasztást.
2. Kibocsátáscsökkentés : A hatékonyság javításával a rendszer csökkenti a szennyező anyagok kibocsátását, hozzájárulva a fenntarthatósághoz.
3. Rugalmasság : A kapcsolt energiatermelő rendszerek képesek alkalmazkodni a különböző üzemanyagtípusokhoz és energiaigényekhez.
4. Energiabiztonság : Az energiaforrások diverzifikálása és a helyben történő energiatermelés javítja az ellátásbiztonságot.
5. Alacsonyabb üzemeltetési költségek : Az erőforrás-felhasználás nagyobb hatékonysága csökkentheti a hosszú távú üzemeltetési költségeket.

A DHN (távfűtés és hűtés) kontextusában:

1. Energia

Nagyobb hatékonyság : A kapcsolt energiatermelés lehetővé teszi a villamosenergia-termelésből származó hulladékhő hatékonyabb felhasználását, javítva a fűtési és hűtési rendszer összteljesítményét.

Hőterhelés optimalizálása : A hő és az áram egyidejű termelése lehetővé teszi a hőterhelés jobb igény szerinti beállítását.

2. Környezeti

Kibocsátáscsökkentés : Az energiatermelésből származó maradékhő felhasználásával csökken a további fosszilis tüzelőanyagok iránti igény a hőtermeléshez, ezáltal csökkentve a $CO_2$-kibocsátást.

Hatékony erőforrás-felhasználás : A kapcsolt energiatermelés optimalizálja az energiaforrások felhasználását, hozzájárulva a fenntarthatóbb rendszerekre való áttéréshez.

3. Gazdasági

Energiaköltség-megtakarítás : Az áram- és hőtermelés egyetlen folyamatban történő kombinálásával csökkenthető a távfűtési hálózatba (DHN) szállított energia teljes költsége.

Gazdasági ösztönzők : Számos kapcsolt energiatermelő rendszer pénzügyi ösztönzőkben vagy támogatásokban részesül az energiahatékonysága miatt, ami javítja a beruházás jövedelmezőségét.

## 3.3 Távfűtésbe (DHN) történő integrálásának működési és technikai kihívásai

**Rugalmasság a működésben** :

**Igényváltozás** : A távfűtési hálózatok (DHN-ek) gyakran változó hőigényt tapasztalnak a nap, az évszakok és a hálózat különböző régiói között is. A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszereket azonban jellemzően teljes terhelésen történő folyamatos működésre tervezték. Ennek az eltérésnek a kezelése kifinomult szabályozási stratégiákat és tartalék rendszereket igényel a megfelelő ellátás biztosítása érdekében.

**Hálózati interakció** : A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő egységeknek képesnek kell lenniük a teljesítményük beállítására, hogy az megfeleljen mind a távfűtési hálózat hőigényének, mind a villamosenergia-hálózat energiaigényének, ami valós időben nehézkes lehet. Ez növeli a működési bonyolultságot, különösen megújuló vagy időszakos energiaforrások használata esetén.

**Integráció a meglévő infrastruktúrával** :

**Utólagos beépítési kihívások** : Egy kogenerációs rendszer meglévő távfűtéses rendszerbe történő utólagos beépítése költséges korszerűsítéssel járhat a csővezetékek, hőcserélők és tárolótartályok terén. Egy kogenerációs rendszer régebbi hálózatokkal való integrálása további infrastruktúrát igényelhet, például tágulási tartályokat, szivattyúkat vagy nyomáscsökkentő rendszereket a keletkező hő befogadására.

**Hőmérséklet és nyomás egyeztetése** : A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő erőmű kimenetének hőmérséklet- és nyomásszintjének összhangban kell lennie a meglévő távfűtési hálózat specifikációival. Eltérés esetén további berendezésekre, például hőcserélőkre vagy nyomásszabályozó eszközökre lehet szükség, ami növelheti a rendszer bonyolultságát és költségeit.

**Rendszer megbízhatósága** :

**Függőség a hőtől és az áramtól** : A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek mind villamos energiát, mind hőt termelnek, így kritikus fontosságúak mindkét energiaellátás szempontjából. A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő egység meghibásodása mindkettőt megzavarhatja, befolyásolva a téli hónapokban a fűtést, vagy áramkimaradást okozhat. Ezért a rendszeres karbantartás és a magas üzemeltetési szabványok elengedhetetlenek a leállási idő minimalizálása érdekében.

**Redundancia és tartalékrendszer** : A megbízhatóság javítása érdekében a távfűtéses ellátórendszereknek tartalék hőforrásokkal vagy hőtároló rendszerekkel kell rendelkezniük, hogy a kogenerációs erőmű meghibásodása esetén is biztosítani tudják a fűtést. Ehhez további tőke- és üzemeltetési költségekre van szükség ezen tartalék rendszerek karbantartásához.

**Üzemanyag- és kibocsátásszabályozás** :

**Üzemanyag-ellátás és elérhetőség** : A fosszilis tüzelőanyagokkal, például földgázzal működő kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek esetében elengedhetetlen a stabil és költséghatékony üzemanyag-ellátás biztosítása. A biomassza-alapú kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek esetében a fenntartható üzemanyagforrások elérhetőségének következetesnek kell lennie. Ezek az ellátási láncból adódó függőségek bonyolíthatják a tervezést és a működést.

**Környezetvédelmi megfelelőség** : Számos régióban szigorú kibocsátási előírások vannak érvényben, különösen a CO2, NOx és a szálló por tekintetében . A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszereket fel kell szerelni a kibocsátások szabályozására szolgáló technológiával, például gázmosókkal, szűrőkkel vagy fejlett égetési technikákkal. Ezen kibocsátások valós idejű kezelése, különösen változó igény esetén, további bonyolultságot eredményez. Ezenkívül a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek megújuló energiaforrásokkal, például biogázzal vagy hulladékhővel való integrálása további tervezést igényel az üzemanyag-minőség és a kibocsátás-kezelés tekintetében.

Energiahatékonyság

**Fokozott hatékonyság** : A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek jellemzően sokkal hatékonyabbak, mint a külön hő- és villamosenergia-termelés. A hagyományos rendszerekben energia vész kárba az áramtermelés során, és a hőtermeléshez további tüzelőanyagra van szükség. A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek ezt a „hulladékhőt" hasznosítják a fűtési igények kielégítésére, így hatékonyabbá válnak azáltal, hogy visszanyerik és felhasználják az egyébként elvesző hőenergiát.

**Hatékonyságnövekedés** : Egy tipikus kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszer 60-80%-os összhatékonyságot érhet el, szemben a hagyományos, különálló hő- és villamosenergia-termelés 35-45%-os értékével. Távfűtési alkalmazásokban a hulladékhő lakó-, ipari vagy kereskedelmi épületekhez juttatható, csökkentve az összenergiafogyasztást.

**Működési rugalmasság** : A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő erőművek dinamikusan reagálhatnak a fűtési igényekre, a terhelésváltozásokhoz igazítva a villamosenergia- és hőtermelést, tovább optimalizálva az energiafelhasználást.

Gazdaság

**Csökkentett energiaköltségek** : Azáltal, hogy egyetlen üzemanyagforrásból hőt és villamos energiát is termelnek, a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek csökkentik az üzemanyag-fogyasztást a különálló termelési rendszerekhez képest. Ez alacsonyabb üzemeltetési költségeket eredményez, különösen akkor, ha nagy a villamosenergia- és hőigény . A rendszer a méretgazdaságosságból is profitálhat, ami tovább csökkenti a költségeket.

**Energiabiztonság** : A megbízhatatlan energiahálózattal rendelkező régiók számára a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) decentralizált energiatermeléssel biztosítja az energiabiztonságot. Ez csökkentheti a külső energiaforrásoktól való függőséget, stabilizálhatja az energiaárakat, és idővel megtakarítást eredményezhet.

**Befektetés és megtérülés ( 6. egyenlet )** : A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek kezdeti tőkebefektetése magas lehet, de hosszú távú megtakarítást kínálnak a csökkentett energiaköltségek és a potenciális ösztönzők révén. A megtérülési idő jellemzően 5-10 év között mozog, a rendszer méretétől, az üzemanyag típusától és a helyi energiaáraktól függően.

$$Megtérülési\ idő = \frac{Befektetési\ költség}{Megtakarítások} \quad (6)$$

Esettanulmány (Epperson és Jane):

A gázturbina évi 7800 órát üzemel , a gazdasági adatokat az 1. táblázat mutatja be.

| | |
|---|---|
| **Teljes éves megtakarítás** | 1 650 000 dollár |
| **Becsült tőkeköltség** | 9 075 000 dollár |
| **Egyszerű megtérülés** | 5,5 év |

1. táblázat. Az Epperson és Jane esetpélda gazdasági adatai.

**Környezeti hatás**

**Alacsonyabb szén-dioxid-kibocsátás** : A hulladékhő felhasználásával és a különálló erőművek szükségességének csökkentésével a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek jelentősen csökkenthetik a szén-dioxid-kibocsátást. A hatékonyságnövelés csökkenti a szükséges üzemanyag teljes mennyiségét, ami közvetlenül alacsonyabb üvegházhatású gázkibocsátást eredményez. Például földgáz használata esetén a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszer 20-40%-kal csökkentheti a szén-dioxid $_{-}$kibocsátást a különálló hő- és villamosenergia-termeléshez képest.

**Tisztább energia** : A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek különféle üzemanyagokkal működtethetők, beleértve a megújuló energiaforrásokat, például a biomasszát vagy a biogázt, ami tovább csökkenti környezeti lábnyomukat. A szénről vagy olajról tisztább földgázra vagy megújuló biomasszára való áttérés drasztikusan csökkentheti a szennyező anyagok, például a NOx $_{,}$ a SOx $_{és}$ a szálló por kibocsátását.

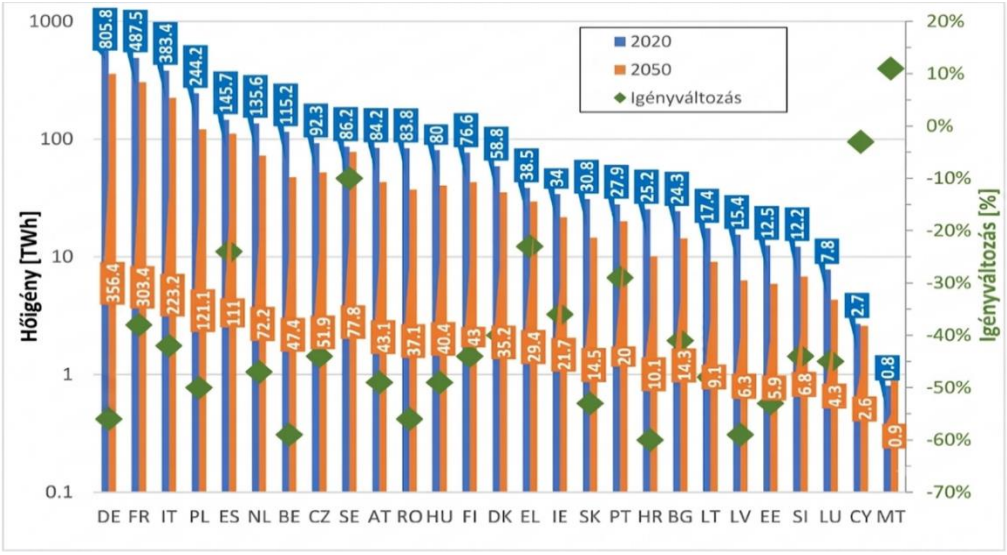
**Energiaátalakítási hatékonyság ( 7. egyenlet )** : A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) hozzájárul egy fenntarthatóbb energiarendszerhez azáltal, hogy csökkenti az üzemanyag-fogyasztást, a teljes környezeti hatást, és javítja az energiafelhasználás hatékonyságát több ágazatban (áramtermelés, fűtés stb.).

$$E_{CO_2} = \frac{Q_{\text{üzemanyag}} \times kibocsátás}{\text{üzemanyag } fűtőértéke} \quad (7)$$

# 4. A hőtermelő távfűtési hálózatok gazdasági és környezeti vonatkozásai

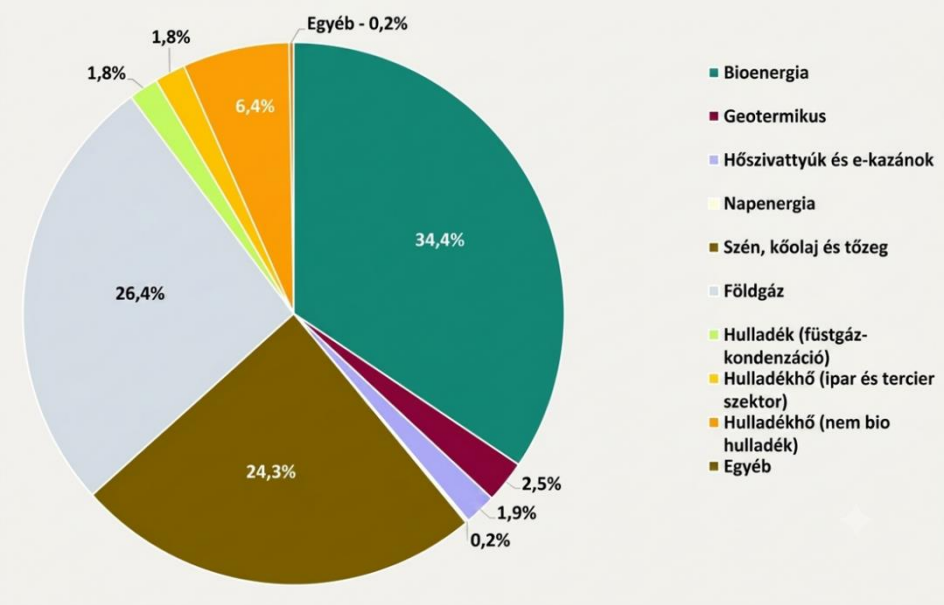
## 4.1 Bevezetés

A fűtési igényt tekintve (71. ábra) a távfűtés termelése 2022-ben viszonylag hasonló maradt az előző évhez, az épületek és az ipar globális végső fűtési igényének körülbelül 9%-át fedezve. Amint azt a legjobban teljesítő hálózatok is mutatják, a távfűtés nagy lehetőségeket kínál az alacsony kibocsátású energiaforrások hatékony, költséghatékony és rugalmas, nagyléptékű integrációjára a fűtési energiamixbe. A távfűtés dekarbonizációs potenciálja azonban nagyrészt kiaknázatlan, mivel a fosszilis tüzelőanyagok továbbra is dominálnak a távfűtési hálózati ellátásban (például Európában, 72. ábra) világszerte (a teljes hőtermelés mintegy 90%-a), különösen Kínában és Oroszország két legnagyobb piacán. A 2050-re kitűzött nettó nulla kibocsátás (NZE) forgatókönyvhöz való igazodás jelentősen nagyobb erőfeszítéseket igényel a meglévő hálózatok energiahatékonyságának gyors javítása és a megújuló hőforrásokra (például bioenergia, napkollektoros energia, nagyméretű hőszivattyúk és geotermikus energia) való átállítás érdekében [26].




71. ábra. Hasznos hőigényszintek (TWh) 2020-ban és 2050-ben, valamint a lakossági és a tercier szektor relatív változásai (szekunder Y tengely) a legjobb forgatókönyv alapján [27].

Európában a távfűtés jelentős előrelépést tett a megújuló energiaforrások integrálása és az energiahatékonyság javítása terén. A 2022-es adatok szerint a vizsgált európai országokban több mint 19 000 távfűtési hálózat látja el a hőt több mint 77,3 millió emberrel. Ezek a hálózatok 42,6%-os megújuló és hulladékhő-forrás részesedést értek el. Finnország és Dánia vezető szerepet tölt be ezeknek a megoldásoknak az alkalmazásában. Finnországban a távfűtés a teljes fűtési piac körülbelül 50%-át teszi ki, a társasházak több mint 90%-a pedig ezekhez a hálózatokhoz csatlakozik.




72. ábra. Energiaforrások az európai távfűtésben 2022-ben [27].

## 4.2 A hőtermelő rendszerek mélyreható gazdasági elemzése

**Gazdasági elemzés - Bevezetés:**

Meghatározás: A hőtermelés gazdasági elemzése a különböző technológiák költséghatékonyságát, pénzügyi megvalósíthatóságát és hosszú távú fenntarthatóságát értékeli.

**Főbb mutatók** [28] **:**

1. Tőkeberuházások (CAPEX).
2. Működési költségek (OPEX).
3. Kiegyenlített fűtési költség (LCOH).
4. Befektetési megtérülés (ROI).
5. Megtérülési időszak.

### 1. Tőkeberuházások (CAPEX):

A tőkekiadások (CAPEX) a vállalat által hosszú lejáratú eszközökbe, például épületekbe, gépekbe és technológiába eszközölt beruházásokat jelentik, amelyek elengedhetetlenek a működéséhez és növekedéséhez. Ezek a beruházások két fő kategóriába sorolhatók:

Karbantartási CAPEX: Beruházások, amelyek célja a meglévő eszközök karbantartása vagy javítása a megfelelő működés biztosítása érdekében.

Bővítési CAPEX: Beruházások, amelyek új eszközök beszerzésére vagy meglévők korszerűsítésére irányulnak a termelési kapacitás növelése vagy új piacokra való belépés érdekében.

Tipikus CAPEX összetevők a következők:

1. Felszerelés
2. Telepítés
3. Infrastruktúra
4. Rendszerintegrációs költségek

## 2. Működési költségek (OPEX)

Az OPEX magában foglalja a távhő- és hőszivattyúrendszer hatékony üzemeltetésének és karbantartásának ismétlődő költségeit. A főbb összetevők a következők:

1. **Energia/Üzemanyag:** A költségek jelentős kiadási tételt jelentenek, amelyeket az üzemanyagárak ingadozása befolyásol. A megújuló energiaforrások stabilabb hosszú távú költségeket kínálnak.
2. **Karbantartás:** Magában foglalja az ellenőrzéseket, javításokat és a váratlan beavatkozásokat a megbízhatóság biztosítása érdekében.
3. **Munkaköltségek:** Az operatív személyzet fizetései és juttatásai, jellemzően a teljes OPEX 30–50%-a.
4. **Rendszerfelügyelet:** Szoftver, analitika és képzés a valós idejű teljesítménykövetéshez, a hatékonyság javításához és a költségek csökkentéséhez.

## 3. Kiegyenlített fűtési költség (LCOH):

A kiegyenlített hőköltség (LCOH) egy olyan mutató, amely a fűtési rendszer élettartama alatt a hőtermelés átlagos költségét értékeli. Tartalmazza az összes releváns költséget, beleértve a kezdeti tőkebefektetést, az üzemeltetési és karbantartási költségeket, valamint az üzemanyag-kiadásokat, a teljes hőteljesítményre normalizálva. Ez a mutató lehetővé teszi a különböző fűtési technológiák és rendszerek következetes összehasonlítását.

Definíció és képlet:

Az LCOH-t a következő képlettel számítjuk ki ( 8. egyenlet ):

$$LCOH = \frac{\sum_{t=1}^{n}\left(\frac{I_t+O_t+F_t}{(1+r)^t}\right)}{\sum_{t=1}^{n}\left(\frac{\dot{Q}_t}{(1+r)^t}\right)} \quad (8)$$

Ahol:

$I_t$= Beruházási kiadások a t. évben

$O_t$= Üzemeltetési és karbantartási költségek a t évben

$F_t$ = Üzemanyagköltségek a t évben

$\dot{Q}_t$ = t évben termelt hő

r = Diszkontráta

n = A rendszer várható élettartama

korábban említett képlet kiszámítja a rendszer élettartama alatti teljes költség jelenértékét, elosztva a termelt teljes hő jelenértékével, így egységes költséget kapunk a termelt hőegységre vetítve.

### Fontosság a gazdasági értékelésben

Az LCOH több okból is kulcsfontosságú:

1. Technológiai összehasonlítás: Szabványosított módszert kínál a különböző fűtési technológiák gazdasági teljesítményének összehasonlítására, elősegítve a megalapozott döntéshozatalt.
2. Befektetési döntések: Az LCOH megértésével az érdekelt felek felmérhetik a fűtési projektek hosszú távú pénzügyi életképességét, ami segít az erőforrások legköltséghatékonyabb megoldásokhoz való elosztásában.
3. Politikafejlesztés: A politikai döntéshozók az LCOH-elemzéseket felhasználhatják a hatékony és fenntartható fűtési technológiákat előmozdító ösztönzők és szabályozások kidolgozásához.

### 4. Megtérülési idő

A távfűtési és -hűtési (DHC) rendszerek kontextusában a hatékonysági mutatók, például a megtermelt hő MWh-nkénti költsége és a megtérülési idővel rendelkező befektetésarányos megtérülés (ROI) értékelése elengedhetetlen a gazdasági életképességük és teljesítményük felméréséhez.

#### Hőtermelés költsége MWh-nként:

A DHC-rendszerekben termelt hő megawattóránkénti (MWh) költsége olyan tényezőktől függ, mint az energiaforrások, a rendszer hatékonysága és a regionális gazdasági körülmények. Például egy, az EU-ban működő hatékony DHC-rendszerekről szóló tanulmány kiemelte, hogy a MWh-nkénti költség jelentősen eltérhet a hőforrások és a termelési technológiák kombinációjától függően.

#### Megtérülési ráta (ROI) és megtérülési idők:

A kezdeti tőkekiadások, az üzemeltetési költségek és a bevételi források befolyásolják a DHC-rendszerek megtérülését és megtérülési idejét. A távfűtési rendszerek költségtényezőiről szóló jelentés megjegyezte, hogy például a holland DHC-rendszerek esetében eltérések mutatkoznak a megtermelt MWh-nkénti költségben, ami befolyásolhatja a teljes megtérülést és a megtérülési időt.

#### Esettanulmányok és gazdasági összehasonlítás

#### Dél-Korea [29] :

A nagyobb távfűtési rendszerek kihasználják a méretgazdaságosság előnyeit, amely a rendszer méretének növekedésével csökkenti az átlagos költségeket. Ennek eredményeként a költséghatékonyság javul a rendszer bővítésével, így a nagyobb léptékű megvalósítások gazdaságilag előnyösebbek.

#### CHP vs. hőszivattyúk – gazdasági teljesítmény:

A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek (CHP) körülbelül 70%-os hatásfokot és alacsonyabb üzemeltetési költségeket kínálnak, de magas tőkebefektetést igényelnek, jellemzően kilowattonként 1250 és 3300 dollár között. A hőszivattyúk üzemeltetési költségei szintén alacsonyak, a hatékonyság a teljesítménytényezőtől (COP) és az áramforrástól függ; azonban hasonlóan jelentős kezdeti költségekkel járnak.

#### Európa:

A távfűtés elősegíti az alacsony szén-dioxid-kibocsátású energiaforrások nagymértékű integrációját, hozzájárulva a fenntarthatóbb energiarendszerekhez. Ahogy ezek a hálózatok bővülnek, nagyobb rugalmasságot, jobb hatékonyságot és nagyobb költséghatékonyságot kínálnak.

#### Következtetés:

A távfűtési és hűtési rendszerek bővítése javítja a hatékonyságot és csökkenti a költségeket, támogatva a fenntartható városi fűtést és hűtést.

Költségtényezők az egyes rendszerekben

1. CHP-rendszerek:

Üzemanyagköltségek: Az primer tüzelőanyag (pl. földgáz) ára és elérhetősége közvetlenül befolyásolja az üzemeltetési költségeket.

Tőkeberuházások (CAPEX): Magas kezdeti költségek a berendezések, a telepítés és az infrastrukturális követelmények miatt.

Karbantartási költségek: A rendszeres karbantartás szükséges az optimális teljesítmény biztosításához, ami növeli az üzemeltetési költségeket.

2. Hőszivattyúk:

Villamosenergia-költségek: Az üzemeltetési költségeket az áramárak és a rendszer hatékonysága befolyásolják.

Telepítési költségek: A berendezésekkel és a beállítással kapcsolatos költségek jelentősek lehetnek, különösen a kiterjedt légcsatorna- vagy talajszondás telepítést igénylő rendszerek esetében.

Teljesítményváltozás: A hatékonyság szélsőséges hőmérsékleteken csökkenhet , ami potenciálisan növelheti az üzemeltetési költségeket.

## 4.3 A hőtermelő rendszer környezeti hatása

Környezeti hatás – Bevezetés:

A környezeti hatásvizsgálatok (KHV-k) olyan szisztematikus folyamatok, amelyek célja a javasolt projektek vagy fejlesztések lehetséges környezeti következményeinek felmérése azok megkezdése előtt. A KHV primer célja annak biztosítása, hogy a döntéshozók a gazdasági és társadalmi tényezők mellett a környezeti hatásokat is figyelembe vegyék, elősegítve a fenntartható fejlődést és minimalizálva a káros környezeti hatásokat [30] .

A környezeti értékelés jelentősége [30]

A környezeti hatásvizsgálat elvégzése több okból is kulcsfontosságú:

1. Tájékozott döntéshozatal: A környezeti hatásvizsgálatok átfogó adatokat szolgáltatnak a lehetséges környezeti hatásokról, lehetővé téve az érdekelt felek számára, hogy megalapozott döntéseket hozzanak, amelyek egyensúlyt teremtenek a fejlesztési igények és a környezetvédelem között.
2. Jogi megfelelés: Számos joghatóság ír elő környezeti hatásvizsgálatot (EIA) bizonyos projektek esetében a környezetvédelmi előírások és szabványok betartásának biztosítása érdekében.
3. Nyilvános konzultáció: A környezeti hatásvizsgálat (KHV) folyamata gyakran magában foglalja a nyilvános konzultációkat, amelyek elősegítik az átláthatóságot, és lehetővé teszik a közösségek számára, hogy hangot adjanak aggályaiknak, valamint hozzájáruljanak a projekttervezéshez.

4. A negatív hatások enyhítése: A potenciális káros hatások korai azonosításával a környezeti hatásvizsgálatok elősegítik a környezeti károk elkerülésére, minimalizálására vagy ellensúlyozására irányuló stratégiák kidolgozását.

### Elemzett kulcsfontosságú tényezők

A környezeti hatásvizsgálat (KHV) jellemzően számos tényezőt vizsgál egy projekt környezeti lábnyomának felméréséhez:

1. Projekt léptéke és jellege.
2. Helyszín jellemzői.
3. Lehetséges környezeti hatások.
4. Kumulatív hatások.
5. Enyhítő intézkedések.
6. Szabályozási keretrendszer.

### Üvegházhatású gázok kibocsátása (ÜHG):

Az üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátása kritikus tényező a fűtési rendszerek környezeti hatásainak értékelésében. Két elterjedt technológia, a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek és a hőszivattyúk jelentősen eltérnek az ÜHG-kibocsátási profiljukban.

### $CO_2$-kibocsátás kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerekben:

A kapcsolt energiatermelésnek nevezett CHP-rendszerek egyszerre termelnek villamos energiát és hőt egyetlen üzemanyagforrásból, jellemzően földgázból. Ez a kettős termelési folyamat növeli az általános energiahatékonyságot a különálló termelési módszerekhez képest. Az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA) szerint egy hagyományos 1 megawattos (MW) földgáztüzelésű CHP-rendszer körülbelül 50%-kal csökkentheti a $CO_2$-kibocsátást a hagyományos különálló hő- és villamosenergia-termeléshez képest, ami évi körülbelül 4100 tonna $CO_2$-kibocsátáscsökkentésnek felel meg [31] .

A pontos kibocsátás azonban olyan tényezőktől függ, mint a felhasznált tüzelőanyag típusa, a rendszer hatékonysága és az üzemeltetési gyakorlatok. Bár a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek jelentős $CO_2$-csökkentést kínálnak a hagyományos módszerekhez képest, a fosszilis tüzelőanyagoktól való függőségük miatt nem teljesen kibocsátásmentesek.

### Alacsony/nulla kibocsátás hőszivattyúkkal

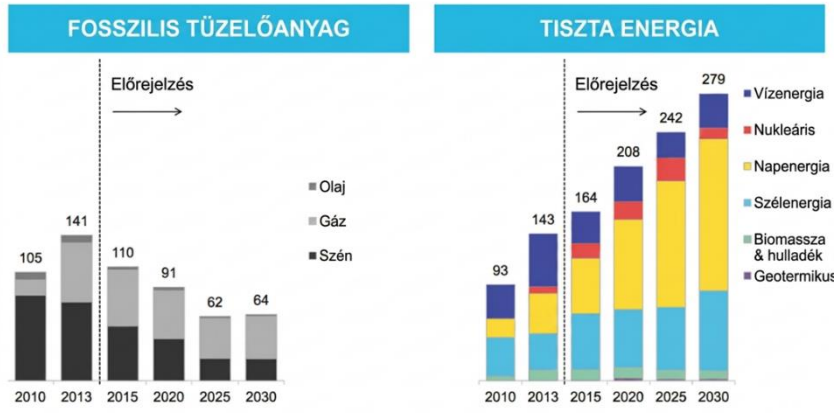
A hőszivattyúk villamos energiával szállítják a hőt, kibocsátásuk pedig a hálózat szén-dioxid-intenzitásától függ. Az alacsony szén-dioxid-kibocsátású villamos energiával rendelkező régiókban közel nulla kibocsátást érhetnek el. Még a szén-dioxid-intenzív hálózatok is legalább 20%-kal kevesebb üvegházhatású gázt bocsátanak ki, mint a gázkazánok, akár 80%-os csökkentést is elérve tisztább hálózatokkal (IEA). A hűtőközegek és a hálózat dekarbonizációja terén elért fejlesztések tovább növelik előnyeiket, így a hőszivattyúk kulcsfontosságú megoldást jelentenek az alacsony kibocsátású fűtéshez [32] .

### Erőforrás-kihasználás:

Fosszilis tüzelőanyagok: Véges erőforrások, amelyek kitermelést és szállítást igényelnek, ami környezeti károkat és magas ÜHG-kibocsátást okoz.

Megújuló villamos energia: Fenntarthatóan pótolható források (szél, nap, víz stb.), amelyek alacsonyabb kibocsátással és magasabb energiahozammal rendelkeznek élettartamuk során.

A 73. ábra a fosszilis tüzelőanyagok és a tiszta energia (megújuló villamos energia) összehasonlítását mutatja be, 2030- ig terjedő előrejelzéssel.




73. ábra. Fosszilis tüzelőanyagok és tiszta energiatermelési kapacitás előrejelzése [33].

### Hatékonyság és fenntarthatóság:

Hatékonyság: A megújuló energiaforrások minimális veszteséggel alakítják át az energiát, ellentétben a fosszilis tüzelőanyagokkal, amelyek kitermelése és átalakítása magas hatékonysági problémákkal küzd.

Fenntarthatóság: A megújuló energiaforrások minimális környezeti terheléssel biztosítják a hosszú távú energiaellátást, megőrizve az erőforrásokat a jövő generációi számára.

### Szennyező anyagok és levegőminőség

$NO_x$, $SO_x$ és részecskék kapcsolt hő- és villamosenergia **-termelésből** : A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek, különösen a fosszilis tüzelőanyagokat használók, olyan szennyező anyagokat bocsátanak ki, mint a nitrogén-oxidok ($NO_x$), a kén-oxidok ($SO_x$) és a részecskék. Bár a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek hatékonyabbak, mint a különálló hő- és villamosenergia-termelés, és csökkentik az összkibocsátást, mégis hozzájárulnak a levegőszennyezéshez. A pontos kibocsátási szintek az üzemanyag típusától és a használt technológiától függenek.

Elhanyagolható kibocsátások hőszivattyúkból : A hőszivattyúk a hő átadásával működnek, nem pedig égetéssel történő előállításával, ami minimális $NO_x$, $SO_x$ vagy részecske kibocsátást eredményez a helyszínen. Környezeti hatásukat elsősorban az őket működtető villamos energia szén-dioxid-intenzitása befolyásolja. Ahogy az elektromos hálózatok egyre több megújuló energiaforrást tartalmaznak, a hőszivattyúkkal kapcsolatos közvetett kibocsátások folyamatosan csökkennek, így tisztább alternatívát jelentenek a fűtési és hűtési igények kielégítésére.

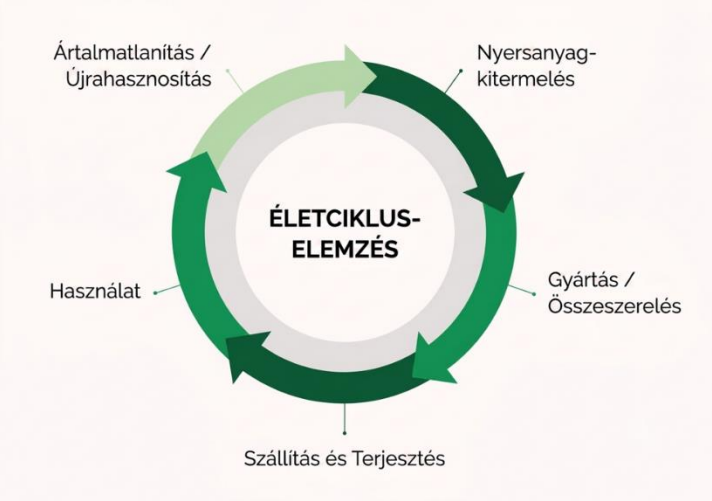
### Életciklus-értékelés (LCA)

Az életciklus-értékelés (LCA) (74. ábra) egy termék vagy rendszer környezeti hatásait értékeli teljes élettartama során, a nyersanyag-kinyeréstől az ártalmatlanításig. A fűtési technológiák terén az LCA átfogóan összehasonlítja a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszereket (CHP) és a hőszivattyúkat.

### Termeléstől a leszerelésig terjedő hatás felmérése

**CHP-rendszerek**: A CHP-egységek egyetlen tüzelőanyag-forrásból, gyakran földgázból vagy biomasszából termelnek villamos energiát és hőt. A CHP-rendszerek életciklus-elemzése (LCA) több szakaszból áll:

1. Üzemanyag-kitermelés és -feldolgozás
2. Gyártás és telepítés.
3. Működési fázis.
4. Leszerelés és ártalmatlanítás.




74. ábra. LCA termelési ciklus [34].

### Hőszivattyúk:

1. GWP: A hőszivattyúk alacsonyabb GWP-vel rendelkeznek, a kaszkádrendszerek 85,4%-kal csökkentik azt a gázkazánokhoz képest.
2. Légszennyezés: A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) $NO_x$-t és szilárd részecskéket bocsát ki; a hőszivattyúk közvetlen kibocsátása elhanyagolható.
3. Hatékonyság: A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) újrahasznosítja a hulladékhőt, de üzemanyagtól függ; a hőszivattyúk (300–400%-os hatásfok) fenntarthatóbbak a megújuló energiaforrások használatával.
4. Életciklus-hatás: A hőszivattyúk nagyobb termelési hatással bírnak, de ezt tisztább működésükkel ellensúlyozzák.

### Vízfelhasználás és hőszennyezés

**Vízfogyasztás kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerekben: A** kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek gyakran jelentős mennyiségű vizet igényelnek a hűtési folyamatokhoz. Ez a felhasználás megterhelheti a helyi vízkészleteket, különösen a vízhiányos régiókban.

**Minimális hatás hőszivattyúkkal:** A hőszivattyúk általában kisebb vízlábnyommal rendelkeznek, és nem igényelnek vízigényes hűtési folyamatokat. A vízhőszivattyúk azonban lokális hőszennyezést okozhatnak

azáltal, hogy a felmelegített vizet visszajuttatják a természetes víztestekbe, ami potenciálisan károsíthatja a vízi ökoszisztémákat.

Míg a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek nyomást gyakorolhatnak a vízkészletekre és hozzájárulhatnak a hőszennyezéshez, a hőszivattyúk jellemzően környezetbarátabb alternatívát jelentenek a vízfelhasználás tekintetében, bizonyos típusok, például a vízhőalapú hőszivattyúk esetében bizonyos szempontokat figyelembe kell venni.

**Esettanulmány: Környezeti hatás (CHP)** [35]

Összehasonlító környezeti vizsgálatot végeztek egy mexikói olaj- és gáziparban használt kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő erőmű konfigurációján. A tanulmány három forgatókönyvet értékelt:

1. 1. eset: 58%-os hatásfokú gőzturbina-generátorok használata.
2. 2. eset: Gázturbina és hőhasznosító gőzfejlesztő összekapcsolása, 87%-os kombinált hatásfok elérésével.
3. 3. eset: Az égetés utáni $CO_2$-leválasztás beépítése a 2. esetbe.

Az eredmények azt mutatták, hogy a 2. eset az összes értékelt kategóriában csökkentette a környezeti hatásokat az alapesethez képest. Konkrétan a globális felmelegedési potenciál (GWP) az alapesetben szereplő 626 kg $CO_2$e/MWh-ról a 2. esetben 460 kg $CO_2$e/MWh-ra csökkent. Továbbá a 3. eset 42 kg $CO_2$e/MWh GWP-t ért el, napi körülbelül 1075 tonna $CO_2$-t kötve meg 95%-os visszanyerési hatékonysággal.

**Esettanulmány: Környezeti hatás (hőszivattyú)** [36]

Átfogó környezeti vizsgálatot végeztek a massachusettsi Hopkins Academy iskola felújításával kapcsolatban, amelynek során az olajtüzelésű fűtési rendszerről talajszondás hőszivattyúra álltak át. A tanulmány jelentős környezeti előnyöket tárt fel:

1. **Energiafogyasztás:** A felújításnak köszönhetően az iskola energiafogyasztása évi körülbelül 5120 gigajoule-ról (GJ) 1580 GJ-ra csökkent, ami körülbelül 3540 GJ megtakarítást jelent.
2. **Üvegházhatású gázok kibocsátása:** Az éves üvegházhatású gázok kibocsátása 362 tonnáról 37 tonnára csökkent, ami 325 tonnás csökkenést jelent.

A Hopkins Akadémián a talajszondás hőszivattyúra való áttérés szintén jelentősen csökkentette a légszennyező anyagok kibocsátását. Az éves kibocsátás körülbelül 312 kilogrammal csökkent, 392 kilogrammról 80 kilogrammra.

## 4.4 Piaci és iparági trendek, árazás és piaci verseny a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelésben (CHP) és a hőszivattyúkban

**Piaci trendek – Bevezetés**

A hőtermelési technológiák fejlődése: A fűtési módszerek jelentősen fejlődtek, a hagyományos széntüzelésű kazánokról a modern, energiahatékony megoldásokra való áttérésnek köszönhetően. A korai rendszerek nagymértékben támaszkodtak a szilárd tüzelőanyagok elégetésére, amelyek munkaigényesek és környezetileg megterhelőek voltak. Az ipari forradalom bevezette a gőz- és elektromos fűtést, javítva a hatékonyságot és a szabályozhatóságot. Az elmúlt évtizedekben a hangsúly

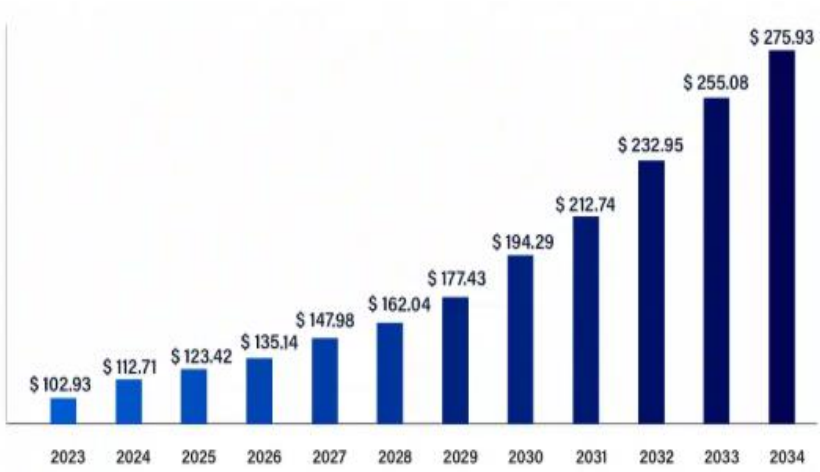
a fenntartható technológiák felé helyeződött át, a hőszivattyúk pedig vezető megoldássá váltak a megújuló energiaforrások hasznosítására való képességük miatt.

A hőszivattyúk növekvő szerepe: A hőszivattyúk fenntartható fűtési megoldásként váltak kiemelkedővé, részesedésük a globális helyiségfűtésben 2021-re körülbelül 10%-ra nőtt. Ezt a növekedést magas hatékonyságuk és a megújuló energiaforrásokkal való kompatibilitásuk vezérli. A piaci dinamika azonban ingadozhat; például 2024-ben az európai hőszivattyú-értékesítés 23%-os visszaesést mutatott, és visszatért a 2022 előtti szintre, a politikai bizonytalanságok és a gazdasági tényezők hatására. Ezen kihívások ellenére bizonyos régiókban, például az Egyesült Királyságban, 63%-os növekedést tapasztaltak az értékesítésben, ami a különböző piacokon eltérő elterjedési arányokat jelez [37] .

### A hőszivattyúk növekedése

Dekarbonizációs célok vezérlik: A hőszivattyúk elengedhetetlenek az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentéséhez, összhangban a globális dekarbonizációs erőfeszítésekkel. Elterjedésük jelentősen csökkentheti a $CO_2$-kibocsátást, legalább 500 millió metrikus tonnás potenciális csökkenést eredményezve 2030-ra, ami az összes európai autó éves kibocsátásának felel meg. Az Egyesült Államokban a háztartások fosszilis tüzelőanyag-kibocsátásának 50–52%-os csökkentése 2030-ra a hőszivattyú-telepítések jelentős növekedését igényli, a következő évtizedben várhatóan évi 10–15%-os növekedési ütemmel [38] .

Technológiai fejlesztések: A legújabb innovációk növelték a hőszivattyúk hatékonyságát és kiterjesztették alkalmazhatóságukat. A fejlesztések közé tartoznak a változtatható sebességű kompresszorok, amelyek alkalmazkodnak a fűtési igényekhez, javítva az energiahatékonyságot és a teljesítményt különböző éghajlati viszonyok között. Ezenkívül a modern hőszivattyúk nagyobb fűtési kapacitást tudnak elérni anélkül, hogy jelentős módosításokat kellene végezni a meglévő infrastruktúrán, megkönnyítve az otthonokba és vállalkozásokba való integrációt. Ezek a fejlesztések életképesebb és vonzóbb opcióvá teszik a hőszivattyúkat a fogyasztók számára, támogatva növekvő szerepüket a fenntartható fűtési megoldásokban. A 75. ábra a hőszivattyú-piac méretével kapcsolatos betekintést nyújt.

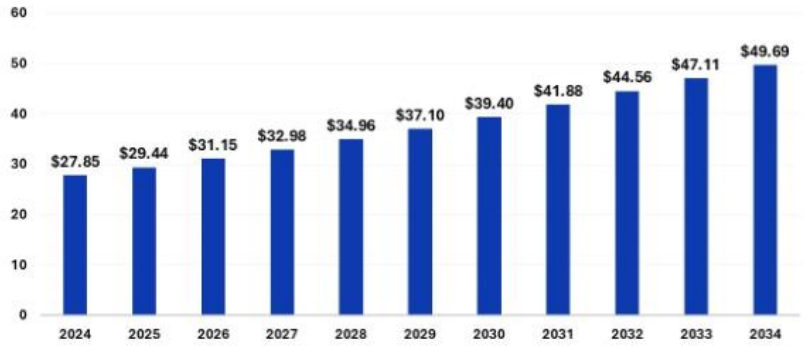



75. ábra. A hőszivattyú-piac mérete 2023 és 2034 között (USD milliárd) [39].

### CHP piaci trendek

A hatékonyságnövelésre összpontosítva: A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek egyre inkább elismertek magas hatásfokukról, akár 80%-os üzemi szintet is elérhetnek, jelentősen meghaladva a hagyományos, különálló hő- és villamosenergia-termelési módszerek körülbelül 50%-os hatásfokát. Ez a hatékonyság elsősorban az egyetlen tüzelőanyag-forrásból származó egyidejű villamosenergia-termelésnek és a hatékony hőenergia-termelésnek köszönhető, ami csökkenti az energiapazarlást. Az ipari szektorban várhatóan 2032-re a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelők elterjedése meghaladja a 6%-ot, amit az energiahatékonyság iránti igény és az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése vezérel.

Integráció megújuló energiaforrásokkal: A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek (CHP) megújuló energiaforrásokkal való integrálása egyre stratégiai megközelítéssé válik az energia-rugalmasság és a fenntarthatóság fokozása érdekében. A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek olyan technológiákkal való kombinálásával, mint a hőszivattyúk, amelyek a megújuló energiafelesleg miatt alacsony villamosenergia-árakon működnek, a létesítmények optimalizálhatják az energiafelhasználást és stabilizálhatják az energiapiacokat. Ez a hibrid megközelítés rugalmas működést tesz lehetővé, ahol a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő erőművek csúcsidőszakban is képesek villamos energiát és hőt termelni. Ezzel szemben a hőszivattyúk a felesleges megújuló energiát hasznosítják, javítva a rendszer általános hatékonyságát és csökkentve a szén-dioxid-kibocsátást. A 76. ábra a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő piac méretére vonatkozó betekintést nyújt [40].




76. ábra. A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) piacának mérete 2024 és 2034 között (USD milliárd) [39].

### Árazási dinamika

Energiaárak és hatásuk: Az energiaárak ingadozása jelentősen befolyásolja a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek és hőszivattyúk bevezetését és üzemeltetési költségeit. 2019 és 2022 között a kiskereskedelmi energiaárak jelentős emelkedést mutattak: a villamosenergia-árak 6–14%-kal, a földgázé 22–46%-kal, a fűtőolajé 35%-kal, a propáné pedig 33–50%-kal emelkedtek. Ezek az eltolódások befolyásolják a fűtési technológiák költséghatékonyságát, mivel a hőszivattyúk elsősorban villamos energiára támaszkodnak, míg a kapcsolt hő- és villamosenergia-rendszerek gyakran földgázt használnak. Következésképpen a földgázárak emelkedése miatt a kapcsolt hő- és villamosenergia-rendszerek kevésbé gazdaságosak lehetnek, mint a hőszivattyúk, amelyek versenyképessége a stabil vagy csökkenő villamosenergia-áraktól függ.

A technológiai fejlődés szerepe: A technológiai fejlesztések mélyreható hatással vannak mind a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek, mind a hőszivattyúk költségeire és hatékonyságára. Például a mikro-CHP elektromos hőszivattyúkkal, hőtárolókkal és fotovoltaikus rendszerekkel való integrálása az éves tüzelőanyag-tüzelésű rendszerek hatékonyságát meghaladta a 130%-ban fűtés, hűtés és melegvíz-termelés esetében. Ezek az innovációk növelik a teljesítményt és csökkentik az üzemeltetési költségeket,

így ezek a rendszerek vonzóbbak a fogyasztók számára. A gazdasági elemzések azt mutatják, hogy a hőszivattyúk költséghatékonyak, maximális megtérülési idejük 16 év, ami tovább ösztönzi az elterjedést [41-43] .

### Piaci pozíció

Az energiaszektorban a hőszivattyúk (HP) és a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek közötti versenyt eltérő működési jellemzőik és alkalmazási körük alakítja. A hőszivattyúk, amelyek elektromos energiával szállítják a hőt az alacsonyabb hőmérsékleti szintekről a magasabb hőmérsékleti szintekre, egyre inkább előnyben részesülnek az alacsony szén-dioxid-kibocsátású fűtési stratégiákban. Piaci pozíciójuk erősödik a hatékonyságnövekedés, a megújuló energiaforrásokkal való integráció és a dekarbonizációs politikák miatt.

Ezzel szemben a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek, amelyek egyszerre termelnek villamos energiát és hasznos hőt egyetlen üzemanyagforrásból, hagyományosan erős pozíciót töltöttek be az ipari és távfűtési alkalmazásokban. Magas összhatásfokuk és a helyszíni energiatermelésre való képességük fenntartotta relevanciájukat, különösen a kiépített gázinfrastruktúrával rendelkező területeken. A szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére helyezett növekvő hangsúly azonban kihívást jelentett piaci terjeszkedésük előtt, különösen akkor, ha a fosszilis tüzelőanyagok az primer energiaforrások.

A versenyképességet befolyásoló tényezők:

1. Energiahatékonyság és teljesítmény.
2. Szénlábnyom és fenntarthatóság.
3. Energiaköltségek és gazdasági életképesség.
4. Politikai és szabályozási keretrendszer.
5. Infrastruktúra és hálózati szempontok.
6. Alkalmazásspecifikus követelmények.

### Technológiai innovációk

#### Magas hőmérsékletű hőszivattyúk

A magas hőmérsékletű hőszivattyúk (HTHP-k) kulcsfontosságú innovációként jelennek meg a fűtési szektorban. A hagyományos hőszivattyúkkal ellentétben a HTHP-k 100°C feletti hőmérsékletet tudnak biztosítani, így alkalmasak ipari alkalmazásokhoz és távfűtési hálózatokhoz. A fejlett hűtőközegek fejlesztése, a továbbfejlesztett kompresszortechnológiák és a hulladékhő-visszanyerő rendszerekkel való integráció növelte hatékonyságukat és megvalósíthatóságukat. Ezek az innovációk lehetővé teszik a HTHP-k számára, hogy a fosszilis tüzelőanyag-alapú fűtési rendszereket váltsák ki olyan iparágakban, mint az élelmiszer-feldolgozás, a vegyipar és a papírgyártás, hozzájárulva a dekarbonizációs erőfeszítésekhez.

#### Hibrid rendszerek (CHP + megújuló energiaforrások)

A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelést (CHP) megújuló energiaforrásokkal, például napkollektorokkal, biomasszával és geotermikus energiával kombináló hibrid rendszerek ígéretes utat jelentenek a fenntarthatóság növelésére. Ezek a rendszerek optimalizálják az energiafelhasználást azáltal, hogy integrálják a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés megbízhatóságát a megújuló energiaforrások szakaszos jellegével. Például a napkollektorok további hőt tudnak szolgáltatni a csúcsidőszakokban, csökkentve a fosszilis tüzelőanyagoktól való függőséget. Ezenkívül a biomasszával működő CHP-egységek karbonsemleges alternatívát kínálnak a hagyományos gázalapú CHP-vel

szemben. A rugalmasság fokozásával és a kibocsátások csökkentésével a hibrid CHP-megújuló energiaforrásokkal működő rendszerek egyre nagyobb figyelmet kapnak az energiaátmeneti célok elérésében betöltött szerepük miatt.

### Iparági vezetők és esettanulmányok

Kulcsfontosságú piaci szereplők

A hőszivattyú- és kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő (CHP) piacokat számos kiemelkedő vállalat vezeti, amelyek innovációjukról és széles termékkínálatukról ismertek:

1. **General Electric (GE)** : A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) piacának meghatározó szereplője, a GE fejlett technológiát kínál, és jelentős piaci részesedéssel rendelkezik nagy hatékonyságú és megbízható CHP-rendszereinek köszönhetően.
2. **Siemens Energy:** Ez a német vállalat a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) megoldások vezető szállítója, amely különféle ipari alkalmazásokhoz kínál termékeket.
3. **Veolia:** A franciaországi székhelyű Veolia kulcsfontosságú szereplő a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) piacán, amely átfogó energiaszolgáltatásairól és megoldásairól ismert.
4. **Wärtsilä:** A finn Wärtsilä vállalat innovatív kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszereiről ismert, és erős piaci jelenléttel rendelkezik.
5. **2G Energy:** Ez a német vállalat kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek gyártására specializálódott, és a területen elért technológiai fejlesztéseiről ismert.

Sikeres megvalósítások

Számos esettanulmány emeli ki a hőszivattyús és kapcsolt hő- és villamosenergia-termelési technológiák hatékony alkalmazását:

1. **Taber Aquafun Központ, Alberta, Kanada:** A létesítmény egy 70 kW-os mikro-CHP-megoldást telepített, amelyet két hét alatt, minimális fennakadás mellett telepítettek. Ez a megvalósítás növelte az energiahatékonyságot és csökkentette az üzemeltetési költségeket.
2. **Bornem – Barl'lo projekt, Belgium:** Ez a projekt bemutatja a hőszivattyúk fűtésre és hűtésre való alkalmazását közel energiasemleges épületekben, bemutatva a hőszivattyúk fenntartható építésben rejlő lehetőségeit.
3. **Sixty Apartments Felújítás, Torino, Olaszország:** Egy felújítási projekt során egy levegő-víz hőszivattyút két gázkazánnal kombináltak, sikeresen integrálva ezeket a rendszereket az energiafogyasztás minimalizálása érdekében, különösen a szezon közepén.

## 4.5 A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP) és a hőszivattyúk szakpolitikai eszközei és szabályozási keretei

### Szakpolitikai eszközök: Bevezetés

A szabályozások fontossága a hőtermelésben [44] :

A szakpolitikai eszközök elengedhetetlenek a hőtermelési szektor dekarbonizációja és fenntarthatósága felé tereléséhez. Olyan kereteket és ösztönzőket hoznak létre, amelyek elősegítik az alacsony szén-

dioxid-kibocsátású technológiák bevezetését, növelik az energiahatékonyságot és csökkentik az üvegházhatású gázok kibocsátását. A hatékony szakpolitikák ösztönözhetik az innovációt, csökkenthetik a költségeket és elősegíthetik az átállást a tisztább energiaforrásokra. Erős szakpolitikai támogatás nélkül a piaci akadályok akadályozhatják a megújuló fűtési megoldások elterjedését, akadályozva az éghajlatváltozás elleni küzdelem erőfeszítéseit. Összefoglalva, a szakpolitikai eszközök elengedhetetlenek a hőtermelési szektor globális átalakításához. A regionális egyenlőtlenségeket és kihívásokat figyelembe vevő, testreszabott megközelítések elengedhetetlenek a fenntartható fűtési megoldások bevezetésének hatékony előmozdításához és az átfogó éghajlati célok eléréséhez.

Globális kontextus: A szakpolitikák célja a felmelegedés 1,5°C-ra korlátozása a hőtermelés dekarbonizációjával, régiónként eltérően, gazdasági és politikai tényezők alapján.

EU kezdeményezések: A REPowerEU terv 20 millió hőszivattyú telepítését tűzte ki célul 2026-ra, és 60 millió hőszivattyú telepítését 2030-ra a fosszilis tüzelőanyagoktól való függőség csökkentése érdekében.

A globális Dél kihívásai: A magas hitelfelvételi költségek akadályozzák a tiszta energia elterjedését; a COP29 és a G20 a szén-dioxid-adókon és adósságcsere-finanszírozáson keresztül hangsúlyozza az éghajlatváltozás finanszírozását.

A szabályozásoknak régióspecifikusnak kell lenniük a fenntartható fűtés elterjedésének előmozdítása és az éghajlati célok elérése érdekében.

### Támogatások és ösztönzők az energiarendszerekben

Támogatások: Kormányok vagy szervezetek által nyújtott pénzügyi támogatás megújulóenergia-projektek, például szél-, nap- és geotermikus rendszerek fejlesztésének támogatására. Ezek a támogatások csökkentik a kezdeti tőkeköltséget, így ezek a technológiák könnyebben elérhetővé válnak.

Adókedvezmények: Megújuló energiatechnológiákba befektető vállalkozások vagy magánszemélyek által járó adókedvezmények. Ilyen például a beruházási adókedvezmény (ITC) és a termelési adókedvezmény (PTC), amelyek ösztönzik a megújuló rendszerek telepítését és üzemeltetését.

Betáplálási tarifák (FiT-ek): Garantált kifizetések vagy ösztönzők, amelyeket az energiatermelőknek fizetnek a hálózatba áramot szállító villamos energiáért. Ezek a tarifák a megújuló energiaforrások fejlesztésének ösztönzésére szolgálnak azáltal, hogy stabil jövedelmet biztosítanak a termelők számára.

### A rendszer bevezetésére gyakorolt hatás

1. Megnövekedett adaptációs arányok: A támogatások és ösztönzők csökkentik a fogyasztók és a vállalatok pénzügyi terheit, ami elősegíti a fenntartható technológiák gyorsabb elterjedését.
2. Piacbővítés: Ösztönzik az innovációt és a versenyt a megújuló energia piacán, ami alacsonyabb költségekhez és hozzáférhetőbb lehetőségekhez vezet.
3. Hosszú távú fenntarthatóság: Bár a kezdeti támogatás kulcsfontosságú, a cél az idő múlásával a támogatásoktól való függőség csökkentése, mivel a technológiák versenyképesebbé válnak a hagyományos energiaforrásokkal szemben.

Az európai támogatásokról és ösztönzőkről további információ az „IEA (Nemzetközi Energiaügynökség) megújuló energiapolitikájáról” című dokumentumban található.

### Szén-dioxid-árazási mechanizmusok

1. **Kibocsátáskereskedelmi rendszerek (ETS):** Piaci alapú megközelítések, amelyek lehetővé teszik a vállalatok számára, hogy szén-dioxid-kibocsátási egységeket vásároljanak és adjanak el. A teljes kibocsátás felső határt szab, és a vállalatoknak a kibocsátásukkal egyenértékű egységekkel kell rendelkezniük. Ez pénzügyi ösztönzőket teremt a kibocsátások csökkentésére.

   Példa: Az Európai Unió kibocsátáskereskedelmi rendszere (EU ETS) a világ legnagyobb szén-dioxid-piaca, amely olyan iparágakat fed le, mint az energiatermelés és a feldolgozóipar.

2. **A szén-dioxid-adók** közvetlen adók, amelyeket a fosszilis tüzelőanyagok szén-tartalmára vetnek ki. A cél a szén-dioxid-intenzív energia költségeinek növelése, ezáltal ösztönözve a vállalkozásokat és a fogyasztókat szénlábnyomuk csökkentésére.

   Példa: Az olyan országok, mint Svédország, magas szén-dioxid-adókat vezettek be, amelyek jelentős kibocsátáscsökkentéshez és a tisztább energiaforrások felé való elmozduláshoz járultak hozzá.

3. **Működési költségek:** Az ETS és a szén-dioxid-adók befolyásolják a vállalkozások működési költségeit, különösen a magas kibocsátású iparágakban. A szén-dioxid-intenzív üzemanyagok megnövekedett költsége magasabb működési költségekhez vezethet, de ösztönözheti az innovációt a tisztább, hatékonyabb folyamatok felé.

**Hatás a vállalkozásokra és a politikára**

1. **Kibocsátáscsökkentés ösztönzése** : Ezek a mechanizmusok arra ösztönzik a vállalatokat, hogy olyan technológiákba fektessenek be, amelyek csökkentik a kibocsátásokat, és zöldebb energiaforrásokra álljanak át.
2. **Piaci hatékonyság** : A szén-dioxid-árazás piacvezérelt megközelítést hoz létre a kibocsátások csökkentésére, rugalmasságot biztosítva a vállalkozások számára a csökkentési célok elérésében.
3. **Bevételtermelés** : A kormányok gyakran a szén-dioxid-árazásból származó bevételeket megújulóenergia-projektekbe, éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodásba vagy más környezetvédelmi kezdeményezésekbe való újrabefektetésre használják fel.

**Energiahatékonysági szabályozási keretek** [45]

EU irányelvek:

**RED II** (Megújuló Energia Irányelv II): Célja a megújuló energia arányának növelése az Európai Unió teljes energiamixében. Kötelező célokat tűz ki a megújuló energiafelhasználásra vonatkozóan, beleértve a közlekedést és a fűtést, és ösztönzi a bioüzemanyagok, a szél-, a nap- és más megújuló energiaforrások használatát.

Cél: Az EU-ban a megújuló energia legalább 32%-os részarányának elérése 2030-ra.

**EED** (Energiahatékonysági Irányelv): Szabályokat állapít meg az EU energiahatékonysági céljainak elérését segítendő. Intézkedéseket tartalmaz az épületek, a közlekedés és az ipar energiafelhasználásának javítására.

Cél: 32,5%-os energiahatékonysági javulás elérése 2030-ra.

Nemzeti Energiahatékonysági Szabványok: Minden EU-tagállam saját szabályozásokat hajt végre, uniós irányelvek alapján, az energiahatékonyság javítása érdekében különböző ágazatokban, például az épületekben, a közlekedésben és az iparban. Ezek a szabványok biztosítják, hogy a nemzeti célok összhangban legyenek az EU tágabb éghajlat- és energiacéljaival.

Példa: Németországban az Energiatakarékossági Rendelet (EnEV) szabványokat határoz meg az épületek energiahatékonyságára vonatkozóan.

**Nemzetközi politikai összehasonlítások az energiarendszerekben** [46]

Esettanulmányok különböző országokból:

Németország: A megújuló energiapolitika élharcosának számító német Energiewende (Energiaátmenet) program hangsúlyozza a fosszilis tüzelőanyagokról a megújuló energiaforrásokra való átállást. Az olyan politikák, mint a betáplálási tarifák, a megújulóenergia-aukciók és az ambiciózus klímacélok, Németországot a világ egyik vezető országává tették a megújuló energia elterjedésében.

Példa: Németországban a 2000-ben bevezetett megújulóenergia-törvény (EEG) utat nyitott a nap- és szélenergia hatalmas növekedése előtt.

Kína: A világ legnagyobb szén-dioxid-kibocsátójaként $CO_2$Kína a megújuló energia bővítésére összpontosított a kibocsátások csökkentése és a levegőminőség javítása érdekében. Az ország vezető szerepet tölt be a nap- és szélenergia-kapacitás terén, jelentős kormányzati támogatással és ösztönzőkkel ezen ágazatok növekedéséhez.

Példa: A 12. ötéves terv az ökológiai civilizációért jelentős beruházásokat vázolt fel a tiszta energiába.

Egyesült Államok: Az Egyesült Államok változatos állami és szövetségi politikákkal rendelkezik, beleértve az adójóváírásokat, a tiszta energia szabványokat és a megújuló energia ösztönzőit, mint például a beruházási adójóváírás (ITC) és a termelési adójóváírás (PTC).

Példa: A Tiszta Energia Terv (CPP), bár felülvizsgálat alatt áll, az erőművek kibocsátásának csökkentését célozta.

**Nemzetközi politikai összehasonlítások az energiarendszerekben**

**Tanulságok a nemzetközi összehasonlításokból**

1. **Politikai következetesség és hosszú távú elkötelezettség:** A sikeres átmenetekhez stabil, hosszú távú politikákra van szükség, amelyek bizalmat keltenek a befektetők és az iparági szereplők között .
2. **Rugalmasság és alkalmazkodóképesség:** Az országoknak olyan politikákra van szükségük, amelyek az adott energiamixhez, erőforrásokhoz és gazdasági helyzethez igazodnak.
3. **Köz-magán partnerségek:** A kormányok, a magánszektor és a fogyasztók közötti együttműködés kulcsfontosságú volt a megújuló energiaforrások elterjedésének felgyorsításában.
4. **Társadalmi támogatás és tudatosság:** A polgárok bevonása és a széles körű társadalmi támogatás biztosítása elengedhetetlen az energiapolitikák sikeréhez.

4.6 Jövőbeli megfontolások

**Jövőbeli megfontolások – Bevezetés**

1. **Dekarbonizáció:** A megújuló energiaforrásokra (napenergia, geotermikus energia, hulladékhő) való áttérés infrastrukturális, beruházási és tárolási kihívásokkal néz szembe. Például a geotermikus integráció fejlett hőmérséklet-szabályozást igényel.

2. **Digitalizáció:** A mesterséges intelligencia, az érzékelők és az intelligens hálózatok optimalizálják a hőelosztást, de kiberbiztonsági és adatvédelmi aggályokat vetnek fel.

3. **Energiahatékonyság:** A növekvő kereslet új technológiákat igényel a távfűtés költséghatékony és fenntartható megőrzéséhez.

Az innováció szerepe:

Technológiai fejlesztések: A hőszivattyúk, a hőtárolás és az alacsony szén-dioxid-kibocsátású technológiák innovációja kritikus fontosságú a jövőbeli energiaigény kielégítése és a környezeti hatások csökkentése szempontjából.

Példa: A hőszivattyú-technológiák új fejlesztései lehetővé teszik a megújuló hőforrások jobb integrációját, rugalmasabbá és fenntarthatóbbá téve a távfűtési rendszereket.

Üzleti modellek és finanszírozás: Új finanszírozási mechanizmusokat, például köz-magán partnerségeket (PPP-ket) és zöld kötvényeket vizsgálnak a távfűtési hálózatok átállásának finanszírozására. Ezeknek a modelleknek a célja a pénzügyi kockázat csökkentése, miközben előmozdítják a megújuló hőforrásokba történő fenntartható beruházásokat.

### Dekarbonizációs célok

### 2050-es nettó nulla célok:

Számos ország és régió, köztük az Európai Unió és az Egyesült Államok is, elkötelezte magát amellett, hogy 2050-re eléri a nettó nulla kibocsátást. A távfűtési rendszerek esetében ez a fosszilis tüzelőanyagoktól való függőség jelentős csökkentését és a megújuló, alacsony szén-dioxid-kibocsátású hőforrások integrálását jelenti. Példa: Az EU Zöld Megállapodása egy ütemtervet vázol fel a kibocsátások legalább 55%-os csökkentésére 2030-ra, és a nettó nulla kibocsátás elérésére 2050-re . Kihívások és lehetőségek: E célok eléréséhez nagyszabású beruházásokra van szükség a megújuló technológiákba, a meglévő infrastruktúra korszerűsítésére, valamint innovatív megoldások, például az energiatárolás és az intelligens hálózatok bevezetésére [47] .

### Átállás a fosszilis alapú kapcsolt hő- és villamosenergia-termelésről:

Jelenlegi állapot: Számos távfűtési hálózat fosszilis tüzelőanyaggal működő kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő erőművekre támaszkodik, amelyek földgázt, szenet vagy olajat használnak fel villamos energia és hő előállításához. Ezek a rendszerek jelentősen hozzájárulnak a szén-dioxid-kibocsátáshoz.

Átállási terv: Az átállás kulcsfontosságú része a megújuló energiaforrásokra, például a biomasszára, a geotermikus energiára és a napenergiára való áttérés. Emellett a zöld hidrogén egyre nagyobb figyelmet kap, mint potenciális üzemanyag a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő erőművek számára.

Példa: A dán távfűtési rendszer aktívan átáll a fosszilis alapú tüzelőanyagokról a biomasszára és a hulladékhő-visszanyerésre, és 2030-ra célul tűzte ki a karbonsemlegességet. Technológiai kihívások: A fosszilis alapú kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő erőművek megújuló energiaforrások hasznosítására való korszerűsítése jelentős beruházásokat és műszaki szakértelmet igényel az új technológiák, például a nagyméretű hőszivattyúk és a hőtároló rendszerek terén.

### Hálózati integráció és rugalmasság

Hálózati integráció és rugalmasság a távfűtési hálózatokban

Keresletoldali gazdálkodás:

a. Meghatározás: A keresletoldali gazdálkodás (DSM) olyan stratégiákra utal, amelyek arra ösztönzik a fogyasztókat, hogy energiafogyasztási szokásaikat a kínálati feltételekhez vagy az árjelzésekhez igazítsák. Ez kulcsfontosságú a megújuló energia távfűtési rendszerekbe való integrálásának optimalizálásához.

b. Technikák:

   Időpontalapú árképzés: A fogyasztók ösztönzése a csúcsidőn kívüli fűtés használatára a kínálat és a kereslet egyensúlyba hozása érdekében.

   Hőtárolás: A felesleges hő tárolása alacsony keresletű időszakokban, majd csúcsidőben történő felszabadítása, ami segít stabilizálni a hálózati ingadozásokat.

c. Előnyök: A DSM segít megelőzni a hálózati torlódásokat, csökkenti a költségeket, és javítja a hőtermelés és -elosztás hatékonyságát. Csökkentheti a fosszilis tüzelőanyag-alapú tartalék energiatermelés szükségességét is.

### Technológiai fejlesztések

Ultramagas hőmérsékletű hőszivattyúk:

Meghatározás: Az ultramagas hőmérsékletű hőszivattyúk (UHTHP-k) jelentősen magasabb hőmérsékleten (100°C felett) történő fűtésre szolgálnak, így alkalmasak távfűtési rendszerekhez. Kulcsfontosságúak a megújuló hőforrások integrálásában a magas hőmérsékletű alkalmazásokba, amelyek hagyományosan fosszilis tüzelőanyagokra támaszkodnak.

Alkalmazások: Az UHTHP-k ipari folyamatokból, geotermikus energiából vagy akár a környezeti levegőből származó hulladékhőt nyernek vissza, és lakó- és kereskedelmi épületeket fűtenek.

Előnyök:

1. Csökkentik a fosszilis tüzelőanyagoktól való függőséget, ezáltal mérséklik a szén-dioxid-kibocsátást.
2. Lehetővé kell tenni a megújuló és hulladékhőforrások hálózatba való integrálását magasabb hőmérsékleten.

Példa: A németországi Energiepark Mainz ultramagas hőmérsékletű hőszivattyúkat használ távfűtéshez, amelyek több mint 100%-os hatásfokot érnek el.

Korszerű kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés bioüzemanyagokkal és hidrogénnel:

A kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerek egyetlen energiaforrásból termelnek hőt és villamos energiát. A dekarbonizációs célok elérése érdekében a fejlett kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszereket egyre inkább integrálják bioüzemanyagokkal és hidrogénnel.

Bioüzemanyagok: A biomassza és a bioenergia megújuló alternatívái a fosszilis tüzelőanyagoknak, és kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő rendszerekben felhasználva alacsony szén-dioxid-kibocsátású hőt és villamos energiát biztosítanak.

$_{CO2-}$ kibocsátás nélkül használható hő- és villamosenergia-termelésre , így kulcsszerepet játszik a karbonsemleges távfűtési rendszerekre való áttérésben.

Előnyök:

1. A bioüzemanyagok csökkentik a fosszilis tüzelőanyagoktól való függőséget és támogatják a helyi mezőgazdasági gazdaságokat.
2. A hidrogén utat nyit a nulla kibocsátású távfűtési rendszerek felé.

Példa: A németországi hannoveri kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő erőmű a hidrogén üzemanyagként való felhasználását vizsgálja kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő egységeiben, hozzájárulva ezzel az ország dekarbonizációs erőfeszítéseihez.

### Klímaellenálló képesség

Az éghajlatváltozás hatása: A változó időjárási minták ingadozó fűtési igényekhez vezetnek. Az enyhébb telek csökkentik, míg a szélsőséges hideg növelik az igényt.

Regionális eltérések: Észak-Európában csökkenhetnek a fűtési igények, míg más régiókban váratlan hőmérsékleti csúcsok jelentkeznek a szélsőséges hőmérsékletek miatt.

Hosszú távú trendek: A rendszereknek alkalmazkodniuk kell az enyhébb és szélsőségesebb körülményekhez, ami rugalmas, reagálóképes energiamegoldásokat igényel.

### Rendszer rugalmassága és megbízhatósága:

Rugalmas működés: Integrálja a megújuló energiaforrásokat, használjon hőtárolást és dinamikusan állítsa be az ellátást.

Hálózati rugalmasság: Biztosítson megbízható tartalékkapacitást (pl. bioüzemanyagokat vagy hidrogént kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő erőművekhez) a keresletcsúcsok kezelésére.

### Gazdasági ellenálló képesség

Alkalmazkodás a piaci ingadozásokhoz:

1. Az energiaforrások diverzifikálása a függőségi kockázatok csökkentése érdekében.
2. Rugalmas árképzési modellek bevezetése az energiapiaci volatilitáshoz való alkalmazkodás érdekében.
3. Használja ki az energiatárolás és az intelligens hálózati technológiákat a működési stabilitás érdekében.

Hosszú távú befektetési stratégiák:

1. Priorizálja a skálázható, jövőbiztos képességekkel rendelkező technológiákat.
2. Az életciklus költségeinek elemzésére összpontosítson a kezdeti költségek helyett.
3. Olyan infrastruktúrába kell befektetni, amely összhangban van a dekarbonizációs célokkal és a politikai ösztönzőkkel.

### Jövőbiztos hőhálózatok

Innovatív fejlesztés alatt álló projektek:

### Nulla szén-dioxid-kibocsátású távfűtés az Egyesült Királyságban:

A nettó nulla szén-dioxid-kibocsátású jövő elérését tűzve ki célul az Egyesült Királyság olyan távfűtési hálózatokat fejleszt, amelyek ötvözik a hulladékhő-visszanyerést, a megújuló energiát és az intelligens hálózati technológiákat. Az egyik ilyen projekt London „Green Gas for London” (Zöld Gáz Londonnak)

programja, amely biogázt és hulladékhőt használ a távfűtési rendszerekben a szén-dioxid-kibocsátás csökkentése és a hatékonyság növelése érdekében [48] .

Főbb jellemzők: Korszerű hőszivattyúk használata, megújuló energia integrációja és rugalmas vezérlőrendszerek.

A Copenhill Projekt Koppenhágában:

Koppenhága célja, hogy 2025-re a világ első karbonsemleges fővárosa legyen. A Copenhill projekt egy hulladékból energiát előállító üzem, amely a távfűtést hulladékégetéssel ötvözi. Nem újrahasznosítható hulladékból termel áramot, gőzt és hőt, több mint 150 000 otthon fűtését biztosítva [49] .

Amszterdam intelligens fűtési hálózata:

Amszterdam egy intelligens távfűtési hálózatot fejleszt, amely hőtárolást, napenergiát és geotermikus energiát hasznosít. A rendszer digitális technológiákat integrál a hőelosztás optimalizálása érdekében, biztosítva az energiahatékonyságot és a szén-dioxid-kibocsátás csökkentését.

A hőhálózatok jövőjére gyakorolt hatás

1. **Dekarbonizáció:** Ezek a projektek bemutatják a megújuló energiaforrások és az innovatív technológiák kombinálásában rejlő lehetőségeket az alacsony szén-dioxid-kibocsátású, fenntartható fűtési megoldások biztosítása érdekében.
2. **Rugalmasság és ellenálló képesség:** Ezeket a hálózatokat úgy tervezték, hogy ellenálljanak a jövőbeli éghajlati kihívásoknak, biztosítva a stabil és rugalmas hőellátást még a kiszámíthatatlan időjárási minták vagy a kereslet ingadozása esetén is.
3. **Skálázhatóság:** Ezen projektek közül sok skálázható, lehetővé téve a jövőbeni bővítést és az új technológiákhoz való alkalmazkodást.

# 5. Következtetések

Gazdasági és környezeti szempontok:

1. Gazdasági: A távfűtési rendszerek csökkentik a fosszilis tüzelőanyagoktól való függőséget, alacsonyabb üzemeltetési költségeket, és ösztönzőkön és szén-dioxid-kibocsátási kvótákon keresztül bevételt termelnek.
2. Környezetvédelem: A megújuló technológiák és a hulladékhő-visszanyerés alkalmazása segít a fűtés dekarbonizációjában és a szénlábnyom csökkentésében.
3. Hatékonyság: Az intelligens hálózatok és a fejlett technológiák javítják a rendszer alkalmazkodóképességét és energiahatékonyságát.

A politikák és a jövőbeli trendek fontossága:

1. Szabályzatok: A támogató politikák, mint például a támogatások, a szén-dioxid-árazás és az energiaszabványok elengedhetetlenek a gyorsabb elterjedés érdekében.
2. Jövőbeli trendek: Az ultramagas hőmérsékletű hőszivattyúk, a bioüzemanyaggal és hidrogénnel kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés (CHP), valamint az intelligens hálózatok fogják alakítani a távfűtés jövőjét.
3. Klímaállóság: A rendszertervezés rugalmassága biztosítja a megbízhatóságot a változó éghajlati viszonyok között.

# 6. Hivatkozások


[1] Brückner, M., Giljum, S., Lutz, C., & Wiebe, K. S. (2015). Materials embodied in international trade: Examining the size and composition of material footprint exports and imports. Environmental Science & Policy, 55, 32-45. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012

[2] Miró, J. J., Estrela, M. J., Caselles, V., & Olcina, J. (2015). Future projection of drought events in the Mediterranean area (Spain) using the SPI index. Theoretical and Applied Climatology, 120(1-2), 141-160. https://doi.org/10.1007/s00704-014-1160-5

[3] U.S. Department of Energy. (2008). 20% Wind Energy by 2030: Increasing Wind Energy's Contribution to U.S. Electricity Supply. https://www.energy.gov/eere/wind/downloads/20-wind-energy-2030-increasing-wind-energys-contribution-us-electricity-supply

[4] Enova SF. (2009). Energy recovery in the process industry: Potential and technology. https://www.enova.no/

[5] Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R., & Meyer, B. (2016). Estimating the global waste heat potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57, 1568-1579. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192

[6] Scottish Government. (2024). Energy Strategy and Just Transition Plan. https://www.gov.scot/publications/draft-energy-strategy-transition-plan/

[7] Alfa Laval. (2018). Gasketed plate-and-frame heat exchangers: The theory of heat transfer. https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/gasketed-plate-and-frame-heat-exchangers/

[8] Thermopedia. (2011). Shell and Tube Heat Exchangers. Begell House Inc. http://www.thermopedia.com/content/1121/

[9] Meshram, P., Pandey, B. D., & Mankhand, T. R. (2016). Hydrometallurgical processing of waste secondary batteries: A review. Resources, Conservation and Recycling, 113, 118-138. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.013

[10] Kanaś, K., Sztekler, K., Nowak, W., & Siwekowski, P. (2019). Analysis of the operation of a shell and tube heat exchanger. E3S Web of Conferences, 108, 01011. https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910801011

[11] U.S. Department of Energy. (2013). Commercial Waste Heat Recovery Devices. Federal Energy Management Program. https://www.energy.gov/femp/articles/commercial-waste-heat-recovery-devices

[12] Kilkovský, B. (2020). Review of design and modeling of regenerative heat exchangers. Energies, 13(3), 759. https://doi.org/10.3390/en13030759

[13] Connor, N. (2024, May 25). Direct contact heat exchanger: Types and process industry use. Thermal-Engineering.org. https://www.thermal-engineering.org/direct-contact-heat-exchanger-types-process-industry-use/

[14] Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Ahmad, D., Lipinski, T., Lester, S. P., ... & Hussam, B. (2021). Thermoelectric generators: A review of applications in heat recovery. Energy, 228, 120513. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120513

[15] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). Fundamentals of Engineering Thermodynamics (9th ed.). Wiley. https://www.wiley.com/en-us/Fundamentals+of+Engineering+Thermodynamics%2C+9th+Edition-p-9781119391388

[16] El Haj Assad, M., Rosen, M. A., Bani-Hani, E., & Al-Shabi, M. (2021). Design and performance of thermal energy systems. Academic Press. https://www.elsevier.com/books/design-and-performance-of-thermal-energy-systems/el-haj-assad/978-0-12-821664-4

[17] El Haj Assad, M., & Rosen, M. A. (2018). Thermal energy storage: Design and analysis with TRNSYS. Elsevier. https://www.elsevier.com/books/thermal-energy-storage/el-haj-assad/978-0-12-811419-3

[18] IEA Heat Pumping Technologies. (2025). Annual Report 2024: Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies (HPT). https://heatpumpingtechnologies.org/publications/

[19] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). Fundamentals of Engineering Thermodynamics (9th ed.). Wiley. https://www.wiley.com/en-us/Fundamentals+of+Engineering+Thermodynamics%2C+9th+Edition-p-9781119391388

[20] U.S. Department of Energy. (2015). Combined heat and power resource guide: Introduction to combined heat and power (CHP). Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. https://www.energy.gov/sites/default/files/2019/01/f58/CHPGuide2015.pdf

[21] International Energy Agency. (2020). Combined heat and power: Evaluating the benefits of CHP for industrial and district energy systems. IEA. https://www.iea.org/reports/combined-heat-and-power

[22] U.S. Department of Energy. (2017). Combined Heat and Power (CHP) Technology Fact Sheets. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. https://www.energy.gov/eere/amo/combined-heat-and-power-chp-technology-fact-sheets

[23] European Commission. (2017). Good practice in energy efficiency: For a sustainable, safer and more competitive Europe. Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2775/723141

[24] Dincer, I., & Rosen, M. A. (2013). Thermal energy systems and processes (2nd ed.). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398374-8.00001-2

[25] Barco-Burgos, J., Bruno, J. C., Eicker, U., Saldaña-Robles, A. L., & Alcántar-Camarena, V. (2022). Review on the integration of high-temperature heat pumps in district heating and cooling networks. Energy, 239, 122378. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122378

[26] International Energy Agency. (2024). District heating (Tracking Clean Energy Progress 2023). IEA. https://www.iea.org/energy-system/buildings/district-heating

[27] Euroheat & Power. (2023). District Heating and Cooling: A key to the energy transition. https://www.euroheat.org/knowledge-hub.html

[28] Bazilian, M., et al. (2013). Re-thinking energy-industry cost structures: The role of capital, operation and maintenance costs, and levelized cost metrics. Energy Policy, 52, 184–191. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.023

[29] Park, S.-Y., Lee, K.-S., & Yoo, S.-H. (2016). Economies of scale in the Korean district heating system: A variable cost function approach. Energy Policy, 88, 197–203. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.10.026

[30] Hanna, K., & Arnold, L. (2022). An introduction to environmental impact assessment. In Routledge Handbook of Environmental Impact Assessment (pp. 1–20). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780429282492-2

[31] U.S. Environmental Protection Agency. (2025). CHP's role in decarbonization. https://www.epa.gov/chp/chps-role-decarbonization

[32] International Energy Agency. (2024). The future of heat pumps — Executive summary. https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps/executive-summary

[33] International Energy Agency. (2024). World Energy Outlook 2024. IEA. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024

[34] European Commission. (2017). Good practice in energy efficiency: For a sustainable, safer and more competitive Europe. Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2775/723141

[35] Ávalos-Islas, M. C., Martínez-Delgadillo, S. A., Morales-Mora, M. A., & Pretelín-Vergara, C. (2015). Life cycle greenhouse gas emissions of electricity generated from a cogeneration project in Morelos Petrochemical Complex and $CO_2$ capture options. CIE 2015 Proceedings. http://www.amexen.org/iec/2015/documentos/LIBRO%20DE%20RESUMENES-ABSTRACTS%20IEC2015.pdf

[36] Hanna, K., & Healthy Buildings Team. (2024, June 12). CoBE case study: Modernizing school heating with a ground-source heat pump — Hopkins Academy, Hadley, MA. HealthyBuildings.Harvard.edu. https://healthybuildings.hsph.harvard.edu/cobe-case-study-modernizing-school-heating-with-ground-source-heat-pump/

[37] International Energy Agency. (2025). The future of heat pumps – Executive summary. International Energy Agency. https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps/executive-summary

[38] International Energy Agency. (2022). Heat pumps — Energy system: Buildings. https://www.iea.org/energy-system/buildings/heat-pumps

[39] Precedence Research. (2024). Waste Heat Recovery System Market: Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2024-2034. https://www.precedenceresearch.com/waste-heat-recovery-system-market

[40] DataHorizzon Research. (2025). Combined Heat & Power (CHP) installation market: Global forecast 2025–2033. https://datahorizzonresearch.com/combined-heat-and-power-chp-installation-market-57570

[41] International Energy Agency. (2023). Energy Prices 2023: IEA Energy Prices Database Documentation. International Energy Agency. https://iea.blob.core.windows.net/assets/e211c759-a7a4-41f3-a7a0-7a2e90e928d8/EnergyPrices_Documentation.pdf

[42] Marzband, M., Sumper, A., & Domínguez-García, J. L. (2023). Techno-economic analysis of a combined heat and power system integrating hybrid photovoltaic-thermal collectors, a Stirling engine and energy storage. Energy Conversion and Management, 284, 116968. https://addi.ehu.es/bitstream/10810/61769/1/1-s2.0-S019689042300314X-main.pdf

[43] Datas, A., Ramos, A., & del Cañizo, C. (2019). Techno-economic analysis of solar PV power-to-heat-to-power storage and trigeneration in the residential sector. Applied Energy, 256, 113935. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113935

[44] Regulatory Assistance Project. (2025). Clean Heat Policy Tracker 2025: A global overview of clean heating policy instruments. https://www.raponline.org/toolkit/clean-heat-policy-tracker/

[45] European Commission. (2018). Renewable Energy Directive (EU) 2018/2001 — Energy from renewable sources. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en

[46] International Energy Agency. (2021). The Twelfth Five-Year Plan for Renewable Energy. https://www.iea.org/policies/5293-the-twelfth-five-year-plan-for-renewable-energy

[47] European Commission. (2019). European Green Deal. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

[48] Skidmore, Z. (2025, April 1). Hemiko to develop UK's first data-centre waste heat network. Data Centre Dynamics. https://www.datacenterdynamics.com/en/news/hemiko-selected-as-project-developer-on-uks-first-data-center-waste-heat-network/

[49] ArchDaily. (2019). CopenHill: The story of BIG's iconic waste-to-energy plant. https://www.archdaily.com/925966/copenhill-the-story-of-bigs-iconic-waste-to-energy-plant