

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK

LEVELES PÉTER
TDK DOLGOZAT

Hőtárolási és szállítási technológiák vizsgálata ipari környezetben

Témavezető:
Dr. Sziucs Botond
egyetemi adjunktus

Budapest, 2023. 11. 05.

NYILATKOZAT AZ ÖNÁLLÓ MUNKÁRÓL

Alulírott, *Leveles Péter* (FAOHTÉ), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2023. 11. 05.

Leveles Péter

Absztrakt

Napjainkban a különböző időjárásfüggő megújuló energiatermelők jelentős kiegyenlítetlenségeket, ingadozásokat okoznak a villamosenergia-rendszerben, amelynek kezelésére jelentős szabályozási tartalékokat kell biztosítani. Emellett megfigyelhető, hogy az ipari szereplők számára saját telephelyi megújuló forrású termelés esetén a leghatékonyabb, ha a telephelyen a termelt energia minél nagyobb hányadát felhasználják, ez a villamosenergia-rendszer kapacitás telítettsége miatt még inkább releváns. Mindkét probléma orvoslására felmerülhet lehetőségként a hőtároló (TES) alkalmazása.

A hőtárolás számos technológia segítségével megvalósulhat, a leggyakrabban használtak közé tartozik a vízzel történő energiátárolás, de előfordulnak fázisváltó anyagokkal (PCM) működő tárolók is. A hőtárolók szélesebb körű elterjedésével nem csak a megújuló energiatermelők integrációja növelhető, hanem a klímacélok elérésében is fontos szerepet játszik. A kiegyenlítő energiaigény csökkentése nagyobb megújuló energia arányhoz juttatja a rendszert, amely a karbonsemlegesség elérését nagyban segíti. Emellett jelentős hőigényű ipari környezetben, illetve távhőhálózatokban a rendszerhatékonyságot is képes növelni, amely további fosszilis energiahordozó felhasználást válthat ki, ezzel pedig az energiatárolás gazdaságosságához is hozzájárulhat. A hőszállítás módja meghatározható lehet hőtároló alkalmazása során, az utóbbi években egyre gyakrabban megjelenő szállítható hőtárolók (M-TES) lehetőségének vizsgálata is szükségzerű.

A Dunamenti Erőmű telephelyén folyamatban van egy power-to-heat (P2H) technológián alapuló villamos kazán (VK) és hozzá kapcsolódó hőtároló telepítése. A berendezés képes le irányú kiegyenlítő szabályozási tartalékot biztosítani a rendszerirányító számára, emellett a benne eltárolt hő által képes rátermelni az erőművi technológia és a helyi távhő ellátására. Dolgozatomban fontos szerepet kap egy magyarországi erőműben létesült energiátároló beruházás ismertetése és elemzése, ezzel kapcsolatban a hazai ipari lehetőségek felmérése. A bemutatott hőtároló modellje alapján megvizsgálásra kerül egy új hőtárolási projekt is, amely az ipari hőellátás viszonylatában mutatja be az új lehetséges beruházás műszaki és gazdasági aspektusait. Az elemzés során nagy hangsúlyt kapnak a modellezett ipari rendszeren belül vizsgált energiatárolási potenciálok, valamint a fejlesztések megvalósíthatósága is.

1 TARTALOMJEGYZÉK

Jelölések jegyzéke	iv
2 Bevezetés	1
2.1 Célkitűzések	1
2.2 Hőtárolás háttérének áttekintése	2
2.2.1 Elvek és módszerek	3
3 Szakirodalmi áttekintés	4
3.1 Energiatárolás	4
3.2 Hőtárolás	6
3.2.1 Szenzibilis hőtárolás	7
3.2.2 Látens hőtárolás	10
3.2.3 Termokémiai hőtárolás	13
3.3 Hőszállítási módok	16
3.3.1 Csővezeték rendszeren keresztül történő hőszállítás	17
3.3.2 Közúti hőszállítás	19
3.3.3 Vasúti hőszállítás	20
4 Hőtárolási projektek	21
4.1 Power-to-heat technológia	21
4.2 Magyarországi erőmű területén létesült hőtároló	22
4.2.1 Ismertetés	22
4.2.2 Műszaki elemzés	23
4.2.3 Gazdaságosság	30
5 Új hőtárolási projekt műszaki és gazdasági elemzése	32
5.1 Ipari környezet bemutatása	32
5.2 A tervezett rendszer bemutatása	33
5.3 A hőtároló rendszer modellezése	34
5.4 Eredmények	38
6 Összefoglalás	41
6.1 Következtetések	41
7 <i>Felhasznált források</i>	42
8 <i>Summary</i>	44

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

<u>Jelölés</u>	<u>Megnevezés, értelmezés</u>
aFRR	automatikus frekvencia visszaállító szabályozás (automatic Frequency Restoration Reserve)
CHP	kombinált villamos energia és hőtermelő erőmű – combined heat and power
DSM	fogyasztói irányú befolyásolás - demand side management
EKR	Energiahatékonysági és Kötelezettségi Rendszer
HMV	használati melegvíz (DHW – domestic hot water)
HTF	hőfelvevő közeg – heat transfer fluid
M-TES	szállítható hőtároló – mobilized thermal energy storage
P2H	Power-to-heat technológia
PCM	fázisváltó hőtároló anyag – phase-change material
SOC	state of charge – töltöttségi szint
TCM	termokémiai hőtároló anyag – thermochemical material
TES	hőtároló – thermal energy storage
TTES	vízzel működő hőtároló – tank thermal energy storage
ÜHG	üvegházhatású gáz (GHG – greenhouse gas)
VK	villamos kazán (EB – electric boiler)

2 BEVEZETÉS

2.1 CÉLKITŰZÉSEK

Napjainkban az energia megfelelő időben történő rendelkezésre állása kritikus pont, amely a jövő energetikai rendszerében is mindenképpen hangsúlyos szerephez juthat. A villamosenergia-rendszerben és hőellátó rendszerekben sokszor pillanatok alatt hatalmas energiaigények jelennek meg, amelyeket azonnal ki kell elégíteni, ez azonban sokszor többlet ráfordítást kíván meg a rendszerüzemeltetők részéről. A termelés és fogyasztás időbeli összeegyeztetése mindenképpen nagy kihívást jelent, amelyben kiemelt szerepet játszik az energia közbenső tárolása. Az energiatárolás megléte azért lényeges, mert segít a rendelkezésre álló, megtermelt energiát térben és időben elosztani, és azt rendelkezésre bocsátani a kívánt időszakban és helyen a felhasználó számára. Az energiatárolás számos módon megvalósítható, különböző technológiák által. A főbb energiatárolási csoportok közé tartozik a villamos energia tárolás, az elektrokémiai tárolás, a mechanikai tárolás, a kémiai tárolás, valamint a hőtárolás. Jelen dolgozatomban a hőtárolás témakörét vizsgálom részletesebben.

Célom bemutatni a különböző hőtároló technológiák jellemzőit, működését. Fontosnak tartok kiemelni jelenleg már megvalósult hőtároló alkalmazásokat, valamint elemezni a hőtárolók alkalmazási lehetőségeit. Emellett a jelenlegi innovációk bemutatása is lényeges szempont, hiszen számos újszerű kutatás, demonstráció történt ezen a téren az elmúlt évtizedben. Lényeges elem különböző technológiák összehasonlítása, hiszen számos esetben rendkívül alkalmazásfüggő az adott viszonyok között optimális hőtároló kialakítása, típusa.

A hőenergia hasznosítása érdekében hőszállító rendszereket kell működtetni, amelyek a fogyasztókat ellátják a szükséges hőenergiával. A hőszállítási módok bemutatása szintén szerepet kap dolgozatomban, hiszen ezáltal a hőellátás hatékonysága és megvalósíthatósága is vizsgálható. Munkámban szintén lényeges helyet kapott egy konkrét hőtárolási és szállítási projekt tervezése, egy új hőtároló rendszer műszaki és gazdasági elemzése.

Dolgozatomban bemutatásra kerül a „power-to-heat” (P2H) technológia, annak gyakorlati megvalósulása, valamint a téma fontosságának kiemelése a kiegyenlítő energiával

történő szabályozási lehetőségek elemzésével. A Dunamenti Erőmű telephelyén létesült hőtároló és villamos kazán projektjének bemutatása is nagy jelentőséget kap, amivel célokom a gyakorlati alkalmazhatóság és a jelenlegi innovációk vizsgálata. Emellett a Csepeli Erőműben már üzemelő hőtároló, mint indikatív elem bemutatása szintén előtérbe kerül.

Dolgozatomban emellett egy fiktív ipari telephelyen létesítendő hőtároló projekt tervezésének, beruházásának és működésének vizsgálata történik meg, a gazdasági és a műszaki szempontok kiemelt figyelembevételével. A lehetséges beruházás elemzésével és modellezésével a hőtárolás iparban lévő relevanciáját szeretném hangsúlyozni.

2.2 HŐTÁROLÁS HÁTTERÉNEK ÁTTEKINTÉSE

A megújuló energiaforrások nagyobb mértékű felhasználása kiemelt fontosságúvá vált az utóbbi években, az Európai Unió 2022-ben elfogadott irányelve szerint (EU1, 2022) a klímacélok elérése érdekében 2030-ig az 1990. évi szinthez képest 55%-kal szükséges csökkenteni az üvegházhatású gázok kibocsátását. Továbbá az EU a megújuló energiaforrásból származó energia részarányának növelését is kitűzte (EU2, 2022), amely dekarbonizációs cél elérésében a hatékony energiarendszer részeként az energiatárolási technológiák, valamint a keresletoldali válaszingyintézkedések is jelentős szereppel bírnak. A REPowerEU terv (EU3, 2022) kiemeli az energiatárolás előnyeit: az energia megfelelő időben történő felhasználásának, az energiaellátás rugalmasságának, az ellátásbiztonságának, és a megújulóenergia-termelés integrációjának az elősegítése. A direktívák alapján szükséges mind a távfűtési és -hűtési rendszerek kombinálása hőenergia-tárolással, továbbá a megújulóenergia forrású villamosenergia-többlet hőtárolásának, illetve az ipari célú hőtárolásának fejlesztése.

A hőtárolás témakörével azért kezdtem el foglalkozni, mivel úgy gondolom, hogy az energiatárolókra a jövő energiahálózatában az időjárásfüggő termelők miatt kiemelt igény mutatkozik. Az energiatárolók közül a hőtárolók képesek lehetnek nem csak kiegyenlítő energia szolgáltatására, hanem a hőellátó rendszerekben kiegészítő elemként jelentős kibocsátáscsökkenést is eredményezhetnek. A jövőben várhatóan nagy szükség nyílik a minél nagyobb megújuló energia felhasználásra, azonban a termelt energia elosztásában, az igényekhez való alakításában mindenképpen nagy segítséget jelenthetnek a hőtárolók.

Dolgozatomban az energiatárolás és a hőtárolás bemutatására és aspektusaira kerül a hangsúly, amit a hőszállítási módok ismertetése követ. Megtörténik továbbá megvalósult projektek vizsgálata hőtárolás és power-to-heat témakörében, először a Dunamenti Erőmű, majd a Csepeli Erőmű telephelyén lévő hőtároló bemutatása és értékelése történik meg. Ezen túlmenően egy új ipari hőtárolási projekt műszaki és gazdasági lehetőségeinek kutatása történik meg.

2.2.1 Elvek és módszerek

2.2.1.1 Fekete doboz

A termikus rendszerek folyamatainak vizsgálatánál gyakran kell egyszerűsítésekkel élni, hiszen a teljes rendszer könnyen átláthatatlanná válhat. (Wolf, 2012) A belső folyamatok részletezése nem feltétlenül szükséges, számos esetben bonyolítja a megoldáshoz vezető utat. Ennek érdekében a „fekete doboz” elve alapján érdemes adott részegységeket egy egészként kezelni, amelynek a belső folyamatai nincsenek megjelenítve, csak a többi elemhez való kapcsolódásainak körülményei számítanak. Dolgozatomban a komplexebb hőtani, valamint folyamat elemzési feladatoknál alkalmaztam ezt a módszert. A hőtárolók részletes belső viszonyainak alakulására a modellezés és a szimulációk során nem szenteltem nagy figyelmet, sokkal inkább a holisztikus szemlélet alkalmazását tartottam lényegesnek.

2.2.1.2 Hőtároló modellezése

A modellezett hőtároló rendszert kutatásom során Matlab környezetben, Simulink kiegészítésével valósítottam meg, a szimulációnál háromdimenziósból leképzett egydimenziós dinamikus modellt alkalmaztam. Ezt az egyszerűbb számítások szintjén Excel használatával egészítettem ki. A rendszerben tapasztalható térfogatáramok leírására Cycle-Tempo programot használtam.

3 SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

3.1 ENERGIATÁROLÁS

Az energiaellátó rendszer megfelelő fenntartása és a különböző időtávú kiegyenlítetlenségek enyhítése érdekében szükség van energiatárolási technológiákra. Az Európai Unió a minél nagyobb megújuló energiafelhasználási arány, és ezáltal a klímacélok elérése miatt 2050-ig kitűzte (EU4, 2019) az energiatároló kapacitások hatszorosára való növelését. A lehetséges energiatárolási technológiák között szerepelnek az elektromechanikai tároló, az elektromos energiatároló, a kémiai, az elektrokémiai, valamint a hibrid energiatároló megoldások. Számos innovatív energiatároló létezik, amelyek közül jelentős számú még csak kísérleti, vagy kutatási fázisban tart.

Elektromechanikai tároló	Elektromos tároló	Hőtároló	Kémiai tároló	Elektrokémiai tároló
<ul style="list-style-type: none">- Szivattyús energiatároló- Sűrített levegős tároló- Lendkerékes energiatároló- Energy Vault	<ul style="list-style-type: none">- Szuperkondenzátoros energiatároló- Szupravezető mágneses energiatároló	<ul style="list-style-type: none">- Sóolvadákos hőtároló- Fázisváltó anyagok tároló (hőakkumulátor)- Szenzibilis hőtároló- Alacsony hőmérsékletű (cseppfolyósított, kriogén levegős) tárolás- Termokémiai hőtároló	<ul style="list-style-type: none">- Power-to-Hydrogen (P2H)- Power-to-Hydrogen-to-Power (P2H2P)- Power-to-Ammonia	<ul style="list-style-type: none">- Akkumulátoros energiatároló (Li-Ion, NaS, ólom-savas, stb.)- Redox folyadék áramú akkumulátor

1. ábra Energiatárolási technológiák csoportosítása – saját szerk. (EPRI, 2023), (Gerse, 2020) alapján.

Az energiatárolás folyamata (Gerse, 2020) három részből, a betárolásból, a tárolásból, és a kitérőből áll. Az energiatárolási technológiák időbeli működése (Few et al., 2016) kapcsán megkülönböztetünk szezonális, napi, illetve ennél rövidebb működésű, hálózattámogatást nyújtó energiatárolókat. Céljukat tekintve a szezonális hőtárolóknál a kitérő-betárolás időtartama hosszabb időszakot ölel fel, míg a napi és a hálózattámogatást nyújtó tárolás a napi energiaigényben jelentkező csúcsok eltolását, illetve kiegyenlítését célozza meg. A villamosenergia-rendszer szempontjából a rövidebb, illetve hosszabb idejű energiatárolásnak általában eltérő célja van. Előbbi részt tud venni a primer és a szekunder szabályozásban, segíthet a terhelés kiegyensúlyozásában és a frekvenciaingadozások csillapításában. A hosszú távú energiatárolás lehetővé teszi a rendszer csúcsteljesítmény igényének csökkentését, a menetrendi eltérések kiegyenlítését, valamint az időjárás megváltozásából eredő kiegyenlítetlenségek kezelését is. Az időbeli működés kapcsán a különböző technológiák elkülöníthetőek az energia/teljesítmény

[kWh/kW] viszonyszám alapján. A szakirodalom a jelentősen hosszabb időtartamú energiatárolás kapcsán a gáztárolást emeli ki, mint leggazdaságosabb opció, hiszen a már megépült rendszerek és a szezonális tárolhatóság lehetővé teszi a hosszú távú energiatervezést.

Szükséges tárolási technológia...		Akkumulátorok									
... a hálózatban...		Vízszivattyú	Lítium-akkumulátor	Savas akkumulátor	Redox folyadékkáros akkumulátor	Nátrium-kén	Superkondenzátor	Hidrogén üzemanyagcella	Lendkerék	Sűrített vagy folyékony levegő	Hőtárolás
Szezonális tárolás Igény: Nagy tárolókapacitás, lassú letöltés	✓							✓			
Napi tárolás (a napi csúcsterhelés elhalasztása) Igény: Néhány órás ellátás	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Hálózattámogató szolgáltatások (pl. frekvenciaszabályozás) Igény: Gyors reakció, néhány másodperces–néhány órás ellátás	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Háztartások Igény: Kis méret, hosszú élettartam		✓	✓	✓				✓			
... a közlekedés területén...											
Közút Igény: Nagy teljesítmény, kis tömeg, kis méret			✓				✓	✓			
Légi/vízi közlekedés Igény: Nagy teljesítmény, térfogategységenként nagy energia							✓	✓			

2. ábra: Energiatárolási technológiák összefoglaló jellemzői (EU4, 2019:11)

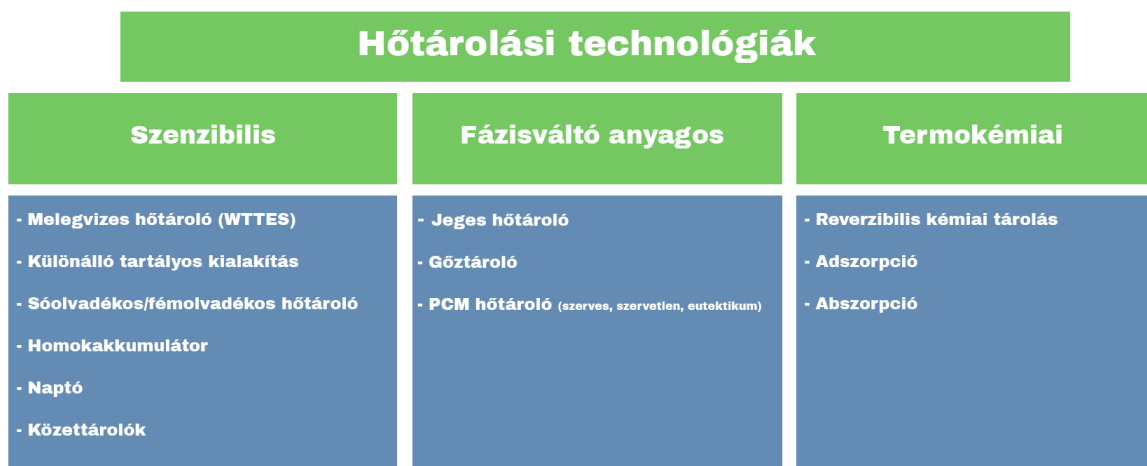
A hűtési-fűtési, valamint melegvíz előállítási és ipari hőigények jelentős részt képviselnek a teljes energiafogyasztásból, ezért az energiát hő formájában tárolni a felhasználás szempontjából előnyös lehet. A Termodinamika II. főtételének következményeképp a munka teljes egészében hővé alakítható, így az energiaátalakítás hatékonysága kedvező lehet más technológiák esetében, amennyiben a betárolt hőenergia felhasználására mutatkozik igény. A hőtároló rendszerek (Few et al., 2016) a villamosenergia-rendszer rugalmasságának biztosításában, valamint a napi hőtárolásban is részt tudnak venni a másodperces reakcióidőnek köszönhetően, hatásfokuk 55-80% közé tehető. Alkalmazásuk kiterjedhet helyi (off-grid) rendszerekre is, így akár az ipari hőellátásban, akár a hulladék hő hasznosításban is szerepet játszhatnak. Dolgozatomban az energiatárolási módok közül részletesen a hőtárolási megoldásokat elemzem, azon belül is különösen a meleg energia tárolására fókuszálva.

3.2 HŐTÁROLÁS

A hőtárolás számos technológia útján meg tud valósulni; a lényegét az képezi, hogy az energiát hőenergia formájában tároljuk, a megfelelő üzemi paraméterek megtartása mellett. (Gerse, 2020) Hővesztések, szabályozási veszteségek egyaránt megjelennek, így a hőtároló hatékonysága meghatározható ezek alapján a kitárolásnál felhasznált hasznos energiamennyiség és a betárolásnál felhasznált energiamennyiség arányaként.

$$\eta_{\text{tároló}} = \frac{E_{\text{kitárolt}}}{E_{\text{betárolt}}} \quad (1.1)$$

A hőtárolási terület teljes globális beépített kapacitása elemzések szerint közel 234 GWh jelenleg. (IRENA, 2020) Az energiatermelési szektor ezen belül nem mondható kifejezetten diverznek, a teljes erőművi hőtároló kapacitás 75%-át teszi ki a sóolvadékos hőtárolás, amely 21 GWh-át jelent világszinten. Az említett technológia mára kiforrottabbnak számít a hőtárolás területén, az erőművi szektorban relatív nagy hőtároló képességének segítségével lehetővé teszi akár a nappali és éjszakai hő- és villamos energia igényváltozásának kiegyenlítését. A hőtárolási technológiák közül számos tervezési, kísérleti, vagy éppen demonstrációs fázisban jár, így az elterjedésük is korlátozott. Becslések szerint a hőtárolással kapcsolatos beruházások mértéke 2030-ig háromszorosára nőhet, a gyors növekedés feltétele azonban a piaci intézkedések és ösztönzők jelentősebb hatása.



3. ábra: Hőtárolási technológiák csoportosítása – saját szerk.

A megjelenített technológiák közül (Seyitini et al., 2023) csak a melegvízes és a sóolvadékos hőtároló mondható kiforrottnak piaci jelenlét szempontjából, a fázisváltó

anyagok hőtárolók és a szilárd anyagok szenzibilis hőtárolók demonstrációi, vagy prototípus fázisban járnak, a termokémiai technológiák közül számos még csak kutatás szintjén létezik. Területek szerinti megoszlást tekintve (IRENA, 2020) a hőtárolók használata a távfűtésben és a háztartások esetében jelentős, az iparban pedig jelenleg kifejezetten alacsony, a melegvízes tárolók nélkül mindössze 2 GWh kapacitással bír. Tekintettel az ipari szektor kibocsátására és energiaigényére, a jövőben mindenképpen nagy szerep juthat a hőtárolók ipari alkalmazásainak is a dekarbonizáció és a zöld átmenet folyamatában.

A hőtárolónak legfontosabb jellemzője a hőmérséklet, amely nagyban meghatározza a hő felhasználásának lehetőségeit. (Varga-Grund, 2021) Az alacsonyabb hőmérsékletű (100 °C alatti) hőtárolók alkalmasak lehetnek a fűtési rendszerek ellátására, HMV előállításra, valamint távhő szolgáltatásra. A magas hőmérsékletű hőtárolók (400 °C felett) ezen túlmenően ipari gőz előállítására, valamint villamosenergia termelésre is használhatóak lehetnek. A hőtároló hőellátó rendszerbe való megfelelő integrálása a fontos tényező, így tervezésnél lényeges a vizsgálata.

3.2.1 Szenzibilis hőtárolás

A szenzibilis hőtárolás lényege, hogy a hőhordozó közeg felmelegítésre kerül (fűtési alkalmazás esetében) a közeg fázisváltása nélkül, majd kisütés során hőmérsékletcsökkentés mellett leadja a hőjét az azt hasznosító rendszernek. A tárolt hő függ a közeg hőmérsékletének megváltozásától, valamint annak hőkapacitásától. Ezek alapján a tárolt hő kifejezhető a következőképpen:

$$Q_{\text{tárolt}} = \rho V \int_{T_{\text{alsó}}}^{T_{\text{felső}}} c_{\text{szenz}}(T) dT \quad (1.2)$$

ahol $c_{\text{szenz}}(T)$ az anyag fajlagos hőkapacitása, zárt rendszerben pedig a tömeg (ρV) konstans. Ha a fajlagos hőkapacitást állandónak tekintjük, akkor kijelenthető, hogy a tárolt hő arányos a hőmérsékletváltozással és a fajhővel, így egyszerű módon számolható. Ez számos esetben nem tehető meg, hiszen számos anyag fajhője jelentősen eltérő lehet bizonyos hőmérséklettartományokban.

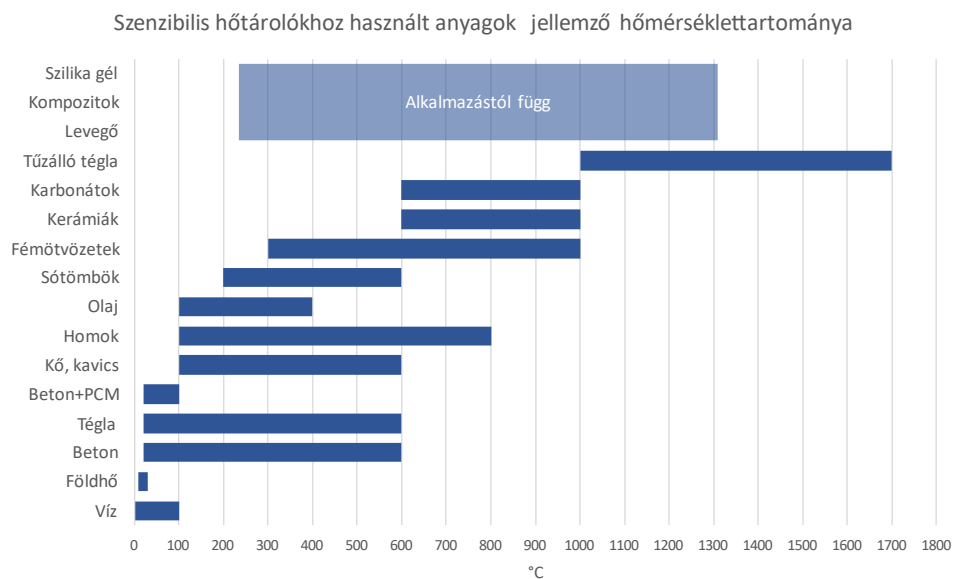
A legelterjedtebb szenzibilis technológia a melegvízes tárolás alkalmazás (TTES – tank thermal energy storage), ez egyben a legegyszerűbb és legolcsóbb megoldások közé tartozik. A beruházási költségek általában a víz bekerülése miatt kedvező, annak ismert hőtani tulajdonságai miatt pedig nagyon pontos viselkedést és működést tudunk

kivitelezni. (Andrássy, 2021) Az előnyök közé tartozik továbbá, hogy nem kell a fázisváltás problémaival, aláhüléssel, hiszterézissel, fázis szegmentációval foglalkozni, ezért hőtárolási tulajdonságokat mindenképpen stabilnak nevezhető, továbbá a víz nagy hőtároló képessége is előnyös. Hátránynak nevezhető a széles hőmérséklettartomány, a hőmérséklet csak egy bizonyos szintig növelhető, ezután már csökken a rendszerből kinyerhető hő, bizonyos szint felett pedig már nem is tud hőt szolgáltatni a tároló. Továbbá a hátrányok közé sorolható, hogy kicsi a relatív energiasűrűsége, így ugyanolyan teljesítményű rendszer kivitelezésénél jóval nagyobb rendszerméret és hely szükséges, mint más hőtárolók esetében. Itt a méret mellett külön kiemelő a szerkezeti elemekre kifejtett hatás, hiszen jelentős méret és súly esetén a helyszínen a padló nyomószilárdságára is tekintettel kell lenni.

Az utóbbi időben egyre több kutatás középpontjába került a szilárd anyagok hőtárolás is. Teng et al. (2019) elemezte egy lehetséges szilárd anyag hőtároló összekapcsolását egy kombinált ciklusú erőműegységgel, valamint széleenergia felhasználással. Bemutatásra került továbbá a hőtároló rendszerek hőtehetetlensége, és annak kihasználása a hőtároló működési logikák mentén. CHP erőművekben a hőtároló funkciója kiegészül a komplexum hatásfokának növelésével, segítségével könnyebben optimalizálható a hőkiadás és a villamos teljesítmény leadásának aránya. Ez főleg azokban a csúcsidezőszakokban lehet jelentős, amikor mind a hőigények, mind a villamosenergia igények tetőznek, ekkor a tároló segít a szerződött hőigények fedezésében, emellett pedig nagyobb arányban tud részt venni a villamosenergia termelésben is. Fang et al. (2016) mozgó időablakos módszer alkalmazását elemezte egy hőtárolóval kiegészített CHP erőműben. A módszer segítségével az ötnapos előrejelzések beépíthetőek a szabályozási logikába, így nagyobb hatékonysággal használható ki a hőtároló kapacitás. A hatásfok javulása ennek alapján leginkább a nagyobb méretű hőtárolók esetében érzékelhető, így az ilyen alkalmazásoknál érdemes lehet a módszer alkalmazása a szabályozásban.

Seyitini et al. (2023) vizsgálta a különböző hőtároló anyagokat tárolóban való használhatóság szempontjából, a műszaki és gazdasági elemzésen túl pedig számos különféle hőtani anyagjellemző mérési módszerről, valamint egyéb megvalósíthatósági tanulmányokról számolt be. Megállapításai közé tartozik, hogy a hőtároló anyagok tulajdonságai mindig csak az adott hőátadó közeggel (HTF – heat transfer fluid) együtt vizs-

gálhatóak, más HTF-fel a tároló működése, időállandója is jelentősen változhat. A leggyakrabban használt HTF-ek közé tartozik a víz és a levegő, utóbbi alkalmazása szilárd anyag magas hőmérsékletű hőtárolásnál előnyös. A 2. ábrán számos szenzibilis hőtároláshoz használt anyag, valamint azok hőmérséklettartománya látható. Betonnal, valamint kővel, kőtörmelékkel való tárolás az ár szempontjából mindenképpen előnyösnek nevezhető, kihívásként megjelenik a nagy hőtároló méret megléte, valamint a levegőbefűtés megfelelő elosztása a hőtároló anyag optimális felfűtése és lehűtése érdekében.



2. ábra: Szenzibilis hőtárolókban használt anyagok hőmérséklettartománya – saját szerk. (Seyitini et al., 2023) alapján

A szenzibilis hőtárolás mellett megvalósulhat még földhőtárolók (Gerse, 2020) által is, ez földhőszondákkal, vagy -kollektorokkal érhető el. Ez a hőtároló típus alkalmas lehet szezonális hőtárolásra a talaj kiterjedt akkumulációs képessége miatt, azonban csak alacsony hőmérsékletű hasznosításra lehet alkalmas. Földhőszondás alkalmazás esetében komplexebb kaszkád rendszerre lehet szükség, mivel a kialakítás miatt jelentős inhomogenitások lépnek fel hőmérsékleteloszlás szempontjából a szondák között. (Borbély, 2014)

Energiatermelés kapcsán jellemző szenzibilis technológia a sóolvadékos hőtárolás, amelyet leginkább naphőerőművek beépített elemeként használnak az energiatermelési szektorban. (IRENA, 2020) A koncentrált naphőerőművek által termelt hő betárolásra kerül a sóolvadékos tárolóba, amely annak akár többnapos tárolása után kerül felhasználásra.

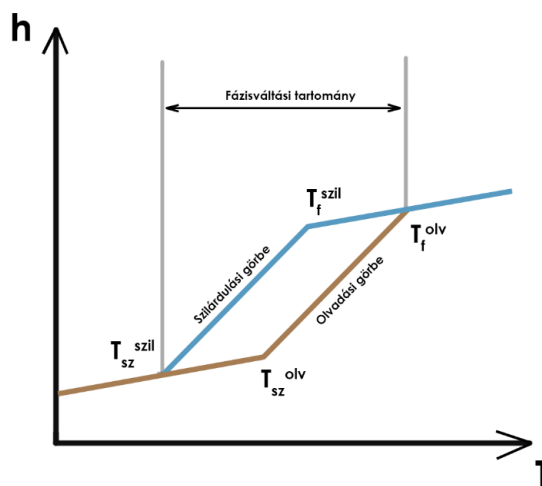
nálásra energiatermelésre vagy távhőellátásra. A jelenleg üzemelő naphőerőművek hatásfoka 20% alatti, emiatt a teljes rendszer gazdaságossága a mostani állapotban megkérdőjelezhető. A sóolvadékok kapcsán egyéb korlátozó tényező, hogy 350 °C felett kell üzemeltetni a rendszert a sóolvadékok dermedéspontja miatt, így kiegészítő fűtés használatára szükség lehet az üzemén kívüli állapotok alatt.

Az utóbbi években számos innovatívabb működésű szenzibilis energiatároló tűnt fel. A német Kraftblock cég (PV, 2023) például egy magashőmérsékletű (1300 °C-ig) levegőfűtéses tárolót alkotott meg, amelynek hőtároló anyaga az acélsalak. Az acélsalak az acélgyártás melléktermékeként, 85%-ban újrahasznosított anyagokból lett megalkotva, ára alacsonynak mondható. A fémszerkezete miatt jó hővezetési tényezővel rendelkezik, amely előnyös tulajdonság a ki- és betárolás sebessége szempontjából. A HTF-ként használt levegő a rendszerben egy hőcserélő segítségével adja át hőjét a hasznosítandó közegnek. Gazdasági szempontból mindenképpen érdemes megvizsgálni a hasonló tárolók lehetséges működését, emellett egy lehetséges életciklus elemzés is szükséges lehet ennek kapcsán az újrahasznosítás figyelembevételével. Az acélsalakos tárolók mellett sokszor felmerül a homokos hőakkumulátor is innovációként. Ennek kapcsán az olcsó felhasznált anyag, valamint a magas hőmérsékletű felfűtés szintén előnyként emelhető ki. A hőátadási tulajdonságok, a hőcserélők állapotelemzése, valamint a megbízható üzemi mérések még javarészt hiányosak, azonban akár gőztermelésre, akár a rendelkezésre álló hőtároló anyag hasznosítására alkalmasak lehetnek, ennek kapcsán egy életciklus elemzés mindenképpen előnyös lehet.

3.2.2 Látens hőtárolás

A látens hőtárolás során az entalpiaváltozás jelentős része vagy egésze a fázisváltás során keletkezett, illetve elnyelt hő hasznosítja. (Andrássy, 2021) Számos esetben nem önmagában valósul meg a látens hőtárolás, hiszen a fázisváltás előtti és utáni tartományban szenzibilis hőtárolással egészülhet ki a folyamat. A fázisváltás megvalósulhat szilárd-folyékony, folyékony-légnemű átmenetként is, de akár szilárd-szilárd vagy szilárd-légnemű állapotváltozás is használható. Elméleti ideális esetben a fázisváltás konstans hőmérsékleten történik, a gyakorlatban azonban az tapasztalható, hogy az egy szűkebb vagy szélesebb hőmérséklettartományon belül játszódik le. További tapasztalható gyakori jelenség a fázisváltó anyagok (PCM) körében a hiszterézis. A fázisváltás során

(szilárd-folyékony esetben) meghatározható egy olvadási és egy megszilárdulási hőmérséklet, a kettő számottevően eltérhet egymástól. Ez azt jelenti, hogy a PCM melegítése közben az olvadási hőmérsékletet (T_{sz}^{olv}) elérése után megindul a fázisváltás, majd annak végén egy T_f^{olv} hőmérsékletre jut. Fordított irányban hűtés esetén a fázisváltás nem a korábbi végpontban indul meg (T_f^{olv}), hanem egy későbbi T_f^{szil} pontban, a fázisváltás pedig egy ennek megfelelő T_{sz}^{szil} hőmérsékletű pontban végződik. Így látható, hogy a melegítés és hűtés folyamata során két különböző, egy olvadási és egy megszilárdulási görbén marad az anyag. Ez azt is jelenti, hogy az elméleti hőkapacitásnak csak egy része hasznosítható ki- és betárolás során a hiszterézis veszteség fellépése miatt. Megszakított fázisváltás során az anyag megőrzi hiszterézises viselkedését, így az egyszerűsített leíráshoz gyakran az ún. átló modellt használják. Ennek lényege, hogy a T_f^{szil} és a T_{sz}^{olv} pontokat összekötő egyenest kezeljük úgy, mintha azon menne végbe a fázisváltozás. A modellezés kapcsán a fázisváltozás felfogható az egyszerű hőkapacitás elve alapján is, azaz az adott fázisváltási hőmérséklettartományon belül egy köztes hőkapacitással számolhatunk, amelynek értéke a szilárd és a folyékony állapotban vett hőkapacitás értékek közé esik. Alapvetően megállapítható, hogy sokkal komplexebb hőtani elemzés szempontjából, mint akár a víz esetében.



3. ábra: PCM sematikus T-h görbéje jellemző hőmérsékletpontokkal – saját szerk. (Andrássy, 2021) alapján

A gépészeti rendszerekben használatos PCM-ek legtöbbször paraffinok, telített zsírsavak, sóhidrátok, eutektikumok, vagy különböző nedvszívó anyagok. Ezen anyagok között hőtani tulajdonságok szintjén jelentősen eltérhetnek, olvadáshőjük 100-400 kJ/kg-

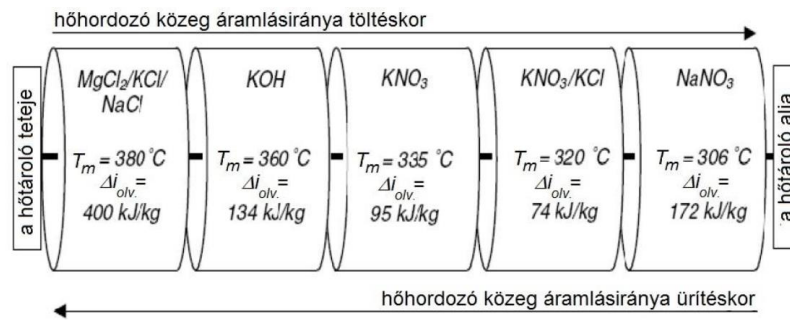
os skálán mozoghat, az olvadási és szilárdulási hőmérsékletek pedig rendkívül széles skálán mozognak. A PCM-ek használatát főleg ezen hőmérsékletek határozzák meg, a 20-40 °C közötti olvadáspontú anyagok gyakran épületgépészeti rendszerekben kerülnek felhasználásra, a nagyon magas 200 °C feletti olvadáspontú anyagokat általában hulladék hő, illetve naphő tárolására használják, a nagyon alacsony olvadáspontú anyagok (20 °C alatt) a különböző hűtési rendszerekben használatosak.

Kivitelként léteznek táblás, mikrokapszulás, ömlesztett és szőnyegszerű kialakításban megjelenő fázisváltó rendszerek. Táblás és szőnyegszerű kialakítással főként az épületgépészeti rendszerekben találkozhatunk, ömlesztett adagolás pedig a bordás-csőves hőcserélőkben való alkalmazás során tapasztalható. A mikrokapszulás kialakítás kevésbé érzékeny a szivárgásra, mint a többi, valamint fajlagos felülete is nagyobb, azonban bonyolultabb gyártástechnológia kapcsolódik hozzá.

A legtöbb fázisváltó anyag kapcsán a hiszterézis mellett szembesülhetünk még pár jelentős műszaki problémával. Az egyik ilyen lehetséges probléma az aláhülés jelensége, amely azt foglalja magában, hogy az anyag képes a hűtési folyamat során hirtelen, szinte pontszerűen fázist váltani, így nagy mechanikai feszültséget keltve a tároló szerkezetében. Emellett a jelentős hőtágulással is számolni, valamint előfordulhatnak mérgező, akár gyúlékony PCM-ek. A stabilitás és a hővezetőképesség romlása is megfigyelhető jelentős ciklusszám esetén, így figyelembe kell venni a kivitelezés során a PCM élettartamát. A vízhez képest a PCM-ek a legtöbb hőtani tulajdonság szempontjából rosszabbak, alacsonyabb hővezetési tényezőjük, így lassabban tölthető fel és süthető ki a tároló. Fennállhat a fázis szegmentáció jelensége is, amely szintén a hőtároló anyagjellemzők minőségét rontja, és térbeli inhomogenitásokat eredményez.

A fázisváltó anyagokkal történő tárolásnak nagy előnye, hogy nagy energiasűrűség érhető el a vízzel történő tároláshoz képest, így szűkebb helyeken könnyebb a hőtároló rendszer megvalósítása, a méretnek szállítás szempontjából is lehet jelentősége. Emellett az alacsony hőforrások jobban kihasználhatók, mint szenzibilis esetben, hiszen a hő betárolása nem jár nagy mértékű hőmérsékletnövekedéssel. Hátrányként a korábban említett anyagválasztási problémák sorolhatóak fel, valamint a hőtárolónak kezelnie kell az olykor jelentős sűrűségváltozást is. Emellett megemlítendő, hogy a beruházási költsége a viszonylag drága anyaghasználat miatt jóval nagyobb egy hasonló kapacitású TTES tárolóhoz képest.

Számos esetben a hőforrás optimális kihasználása érdekében több, kaszkád rendszerben működő PCM tároló alkot egy rendszert. Az egyes hőtároló részek különböző olvadáspontú anyagokkal üzemelnek, a rendszerbe pedig olvadáspont szerinti csökkenő sorrendben kell csatlakoztatni őket. Az utóbbi időben kutatások zajlanak (Seyitini, 2021) a hibrid szenzibilis-látens hőtárolás terén is, amely a két területen használatos anyagok kombinálását valósítaná meg egy rendszeren belül.



4. ábra: Kaszkád PCM rendszer – (Borbély, 2014)

3.2.3 Termokémiai hőtárolás

A termokémiai hőtárolás a folyamatok megfordíthatóságát használja ki, ezáltal a reakcióhő útján áll rendelkezésre hőtároló kapacitás. A használt reverzibilis kémiai folyamatok mindkét irányában megvalósíthatóak kell legyenek, a termokémiai tárolás jóságának jellemzésére a reverzibilitás mértéke szolgál. (Varga-Grund, 2021) Kitérőként az exoterm (hőfelszabadulással járó), betároláskor pedig endoterm (hőelnyeléssel járó) reverzibilis kémiai reakció használható a tárolóban, emellett az alkalmazott termokémiai anyag (TCM) hosszútávú stabilitása is kritérium.




Termokémiai hőtárolás			
Adszorpció alapú	Abszorpció alapú	Reverzibilis kémiai tárolás (redox reakciók)	
<ul style="list-style-type: none"> - Zeolit rendszerek - Amin-víz reakciók 	<ul style="list-style-type: none"> - Sóhidrátos rendszerek 	<ul style="list-style-type: none"> - Szilárd-oxidos - Fémhidrátos - Karbonátos 	<ul style="list-style-type: none"> - Ammónia-víz - Szerves vegyület (pl.: dikarbonsav) - Kén-alapú

5. ábra: Termokémiai technológiák - saját szerk.

Ezen hőtárolási mód segítségével nagyon magas tárolási energiasűrűség érhető el, a tárolási veszteségek a kémiai reakciók alacsony működési hőmérséklete miatt alacsonyan tarthatóak, továbbá katalizátorok segítségével jól szabályozhatóak a folyamatok. Hátrányként megemlíthető az eddig hiányzó részletes modellek, valamint a drága felhasznált anyagok, továbbá esetenként a kisütési ciklusok számának növekedésével a tároló hatékonysága csökkenhet.

A szakirodalomban (IRENA, 2020) felmerült a termokémiai tárolók alkalmazása szélerőművekkel összekapcsolva, így azok képesek lehetnek az időjárásváltozás miatt fellépő kilengéseket csökkenteni. Ezáltal a megújuló erőmű képes lehet segíteni a pontosabb menetrendtartásban, emellett pedig elősegítheti a hőtermelő és a villamosenergia rendszer nagyobb integrációját is. A termokémiai tároló gyors teljesítményváltoztatási képességének köszönhetően gyorsan képes lehet a szélerőművi, vagy akár naperőművi termelést egyenletesebbé tenni, amely a rendszerirányító számára is egy kiszámíthatóbb forrás meglétét teszi lehetővé. A technológia terhelésváltoztatás szempontjából jó alternatívája lehet a lítium-ionos energiatárolásnak, további kutatások azonban mindenképpen szükségesek ennek alátámasztására.

A 6. ábrán látható a bemutatott különböző hőtárolási technológiák összehasonlítása. A tároló méretének jelentősége a helyszíni elhelyezés kapcsán releváns, hiszen számos esetben a szabad beépíthető terület, valamint az alap teherbírása korlátozott. Fejlettség szintjén az alacsony szinten a kísérleti fázisban, a közepes szinten a demonstrációs fázisban lévő, továbbá pár éve üzemelő rendszerek helyezkednek el, kipróbált technológia alatt pedig a számos éve üzemelő, ismert működésű rendszer értendő. A technológiák kapcsán érdemes kiemelni, hogy kombinált, hibrid rendszerek is működtethetőek, amelyek az egyes technológiák előnyeit hivatottak ötvözni. Valószínűsíthető, hogy a jövőben még számos kutatás fog irányulni a jelenleg kevésbé kidolgozott és ismert hőtárolási módokra vonatkozóan, azonban a kipróbált technológiák optimális kihasználása kapcsán is várnak még kihívások energetikai rendszerünkre.

	Szenzibilis hőtárolás	Látens hőtárolás	Termokémiai hőtárolás
 Tárolás módja	Hőmérsékletkülönbség	Fázisváltás hője	Kémiai kötések
 Méret	Nagy	Kisebb	Kisebb
+ Előnyök	<ul style="list-style-type: none"> - Olcsó hőtároló anyag - Egyszerű, stabil működés - Relatív alacsony költségek 	<ul style="list-style-type: none"> - Alacsony hőm. hőforrások kihasználása előnyösebb - Nagy energiasűrűség - Izotermikus alkalmazásra használható 	<ul style="list-style-type: none"> - Nagyon magas energiasűrűség - Kis hővesztés - Kompakt tároló kiserelés
- Hátrányok	<ul style="list-style-type: none"> - Nagy hőmérséklettartomány - Alacsony energiasűrűség - Szigetelés szükséges 	<ul style="list-style-type: none"> - Anyagproblémák fellépése - Korrózióveszély - Komplexebb kaszkádolt rendszer lehet szükséges - Magas költségek 	<ul style="list-style-type: none"> - Komplex felépítés, működés - Magas költségek - Kis stabilitás miatt alacsony ciklusszám
 Fejlettség	TTES, sóolvadékos kipróbált technológia, a többi még fejletlenebb	Közepes	Alacsony

6. ábra: Hőtárolási technológiák összehasonlítása - saját szerk. (Ho, 2021) alapján

3.3 HŐSZÁLLÍTÁSI MÓDOK

Energetikai viszonylatban az energiatároló fogalma gyakran egy egész energiatároló rendszert (Gerse, 2020) jelent, hiszen a konkrét berendezésen túl be- és kitároló energiaátalakítók, segédberendezések, hőszállító eszközök is hozzájárulnak a megfelelő üzemeléshez. A hőszállítás folyamata, megvalósítása különösen fontos a hőellátó rendszer szempontjából, hiszen lényeges műszaki paraméterek alakulását befolyásolja. A hőszállítás szempontjából három opciót vizsgáltam, a csővezetéken történő, a közúti és a vasúti hőszállítást. A szempontok közül lényeges szerepet kap a megvalósíthatóság, a költségek és az üvegházhatású gázok kibocsátásának mértéke, ezek alapján megítélhetőek az egyes szállítási módok felhasználási feltételei, azok életképessége. A hőszállítás többlet energiaköltségét mindenképpen figyelembe kell venni, hiszen ez a piaci versenyképesség meglétét befolyásolja, a szállításhoz kapcsolódó szén-dioxid kibocsátás pedig a fenntarthatósági szempontok mérvadó. Vizsgálatomban a hő előállításának gazdasági vonzatára nem térek ki részletesen, mivel a számos esetben az ipari telephelyeken keletkező hulladékhő, valamint a villamos kazán segítségével előállított hő megtermeléséhez képest a hasznosítás módja nagyobb szerepet kap. Ez azonban nem jelenti azt, hogy ne jelennének meg forrás oldalon a hulladékhő hasznosító rendszer berendezéseihez, a tárolókhoz és a kazánhoz kapcsolódó energia- és beruházási költségek, ezek későbbi figyelembevételére lehetőség is nyílik.

A csővezetékes, közúti és vasúti hőszállítás kapcsán az első esetben jöhet szóba egyedül szenzibilis technológia közreműködése a tárolók kisebb energiasűrűsége és jelentős tömege miatt. Utóbbi két technológia kapcsán fázisváltó anyaggal töltött M-TES (mobilized thermal energy storage – szállítható hőtároló) vesz részt az elemzésben. A szakirodalomban (Chiu, 2016) szinte kizárólag PCM technológia szerepel a kompakt szállítható hőtárolók térképén nagy energiasűrűségének köszönhetően már megvalósult alkalmazások példája nyomán. Kuta (2023) geotermikus forrásból működő M-TES rendszert vizsgált épületek hőellátása céljából. Forrás oldalon a fel nem használt hő, a hulladékhő, valamint a megújuló hő hasznosítása került megemlítésre, fontos mindhárom jelenlétét hangsúlyozni. Emellett részletezte a könnyű csatlakoztatás, a töltési idő és a hőcserélő rendszer relevanciáját. M-TES rendszerek kapcsán a későbbiekben kompakt (Plug&Play) PCM rendszereket tekintek, szállításuknál a közúti és vasúti szállítás szerepel opcióként, a vízi szállítás a csekély hazai potenciál miatt nem releváns gyakorlati

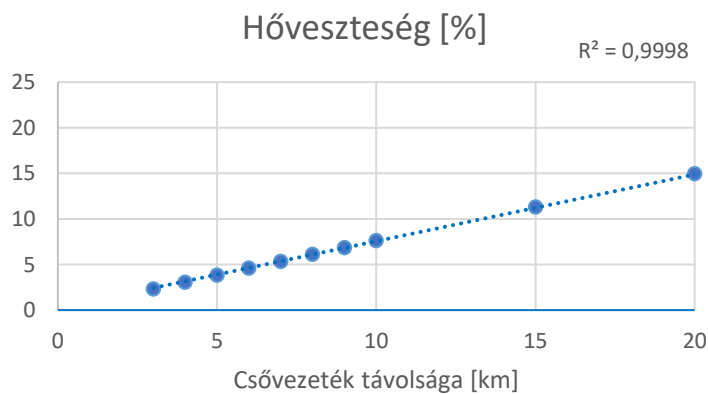
szempontból. A szakirodalomban szinte egyáltalán nem találni a termokémiai hőtárolók szállításával kapcsolatos elemzéseket, habár rendkívül nagy energiasűrűségük (akár 8000 kJ/kg) jelentős potenciált rejthet magában. A TCM technológiák fejlődésével mindenképpen szükségesnek találnék a PCM technológiák szállításához hasonló feltérképezéseket.

A hőtároló használati idejét tekintve lehet elsődleges, kiegészítő, vagy vészhelyzeti energiaforrás. (Kuta, 2023) Elsődleges energiaellátóként szinte folyamatos rendelkezésre állás szükséges, közel egyenletes működés mellett. Ez a gyakorlatban nehezen megvalósítható a kisütés és a feltöltés helye között lévő távolság miatt. Kiegészítő energiaellátó berendezésként a tároló képes bivalens üzemben működni a fő energiaellátó rendszerrel, így segíthet annak a csúcsigény fedezésében, vagy akár gazdaságossági szempontok miatt időszakosan ki is válthatja annak működését. Jelentős hőigényekkel és magas energiaárakkal járó időszakban különösen kiemelkedő potenciálja lehet a hőtárolónak, hiszen nagyobb energiaköltség megtakarítás érhető el általa. Kiegészítő hőtermelőként nem feltétel a széleskörű rendelkezésre állás, így a kisütés és a feltöltés helye rugalmasabban alakítható, mint az első esetben. A harmadik működési jelleg a vészhelyzeti hőellátás. Ennek lényege, hogy az extrém hőigényekkel, energiaárakkal járó időszakokban, valamint sérült lokális energiaellátó rendszer esetén képes a hőellátásba bekapcsolódni. Itt a rendelkezésre állás magas kell legyen a gyors reagálás miatt, felfogható ez a kiegyenlítő energiával kapcsolatos rendelkezésre állási kapacitás hőellátó rendszerének analógiájaként is. A közelmúltban tapasztalt energiaválság kapcsán joggal felmerülhet ezen rendszereknek a szükségessége, ellátásbiztonsági szempontok mellett a hőellátó rendszer rugalmasságát is képesek támogatni a hőtárolók.

3.3.1 Csővezeték rendszeren keresztül történő hőszállítás

A csővezeték rendszer a jelenleg legszélesebb körben alkalmazott, legegyszerűbb hőszállítási forma, amely a hőhordozó közeg áramlása által juttatja el a hőt a felhasználási pontokhoz. Chiu et al. (2016) M-TES modulok szállításának vizsgálatát tűzte ki célul, munkájában mind a csővezetékes, mind a közúti és a vasúti hőszállítás helyet kapott. Feltételezéseimmel ellentétben fő energiaellátóként tekintett a hőtárolóra, és így elemezte azt. Vizsgálataim során a realisabb scenárió megléte miatt inkább kiegészítő fűtési rendszerként tekintek az M-TES rendszerre a szállítás és töltés idejének figyelembevétele miatt.

Számításaim során a csővezetékes hőellátás kapcsán vizsgáltam a 4.2. pontban bemutatott hőtárolót, amely 18 MW-os hőcserélőn keresztül csatlakozik a hőellátó rendszerhez. Paraméterként szerepel a vezetékrendszer hossza, így tekintetem a csöveken keresztül fellépő transzmissziós hőveszteséget (Wang, 2023), a beruházás és kivitelezés költségeit, valamint a működési határokat. A vezetékrendszerben DN400-esnél kisebb csőméret esetén kritérium az áramlási sebesség $2 \frac{m}{s}$ alatt tartása az áramlási veszteségek minimalizálása érdekében. Egy 4 km-es DN300-as rendszer esetében 3%-os hőveszteség megléte mellett 120 MFt feletti beruházási költség és 0,092 €/kWh-s többletenergia-költség adódott. Ez utóbbi jó indikátor lehet a szállítás költségének indikálására az energia-költségen belül. A számításaim során elhanyagoltam a hőmérséklet jelentős megváltozását, ez Chiu (2016) tanulmánya alapján csak nagyobb (20 km feletti) vezeték méretnél számottevő. Az üzemeltetési és karbantartási költségek a beruházás költségéhez és a hőveszteségekhez viszonyítva kisebbek, azokat nem vettem figyelembe a kalkuláció során. Az említett tanulmányhoz képest a beruházási költségek alacsonyabbnak adódtak, a többletenergia költség (0,03-0,06 €/kWh) értéke közelinek mondható. Hőveszteségek kapcsán az említett tartományban (3-20 km) ütemes lineáris növekedés tapasztalható. Ezt Wang szélesebb tartományban vizsgálta a hőmérsékletcsökkenés megléte mellett, azonban a trend jelentősen nem tér el ettől, a nagyobb távolságokhoz jelentős hőveszteségek társulnak.



7. ábra: Hőveszteségek távolságfüggése egyszerűsített számolás esetén

A számítások alapján az állítható, hogy nagyobb rendszer és távolságok esetén a fajlagos többletenergia költség csökken, viszont a távolság növekedésével jelentősen megnő a hőveszteség mértéke. Ez azt jelenti, hogy bizonyos mértékig érdemes a csővezetékrendszert kiterjeszteni, azonban a hőforrástól való jelentős távolság gazdaságtalanná

tudja tenni a rendszert. Közeli (<1 km) csővezetékes szállítás az egyszerűbb kivitelezés és működtetés esetén gazdaságosnak tekinthető. A csővezetékes szállítás nagyon tökeigényes, de jó elérhetőség esetén gazdaságosan üzemeltethető.

3.3.2 Közúti hőszállítás

A közúti szállítás kapcsán a kompakt hőtárolók teherautóval való szállítását elemeztem, számításaimban egy átlagos 2015-ös európai 12 tonnás 4×2 teherautót vettem alapul. A közúti és vasúti elemzés során az energiafogyasztási és CO₂ kibocsátási adatokhoz García-Álvarez et al. (2012) tanulmányát használtam. Az energiafogyasztás szállított távolságra és súlyra fajlagosított, a hőtároló nagy fajsúlyúnak tekinthető.

Domborzat	Fajsúly	Teherautó	Villamos mozdony	Dízelmozdony
Lapos	Nagy	0,28 kWh/tkm	0,05 kWh/tkm	0,12 kWh/tkm
		73 gCO ₂ /tkm	13 gCO ₂ /tkm	31 gCO ₂ /tkm
Lapos	Kicsi	0,36 kWh/tkm	0,22 kWh/tkm	0,5 kWh/tkm
		94 gCO ₂ /tkm	54 gCO ₂ /tkm	131 gCO ₂ /tkm
Hegyes	Nagy	0,35 kWh/tkm	0,11 kWh/tkm	0,25 kWh/tkm
		93 gCO ₂ /tkm	27 gCO ₂ /tkm	65 gCO ₂ /tkm
Hegyes	Kicsi	0,47 kWh/tkm	0,39 kWh/tkm	0,88 kWh/tkm
		123 gCO ₂ /tkm	96 gCO ₂ /tkm	229 gCO ₂ /tkm

8. ábra: Különböző hőszállítási módok kapcsolódó adatai - saját szerk. García-Álvarez et al. (2012) alapján

Kuta (2023) kutatásában kiemelt jelentőségűnek tekinti a közúti hőszállítás a fogyasztói pontok nehezebb megközelíthetőségét, ebben az esetben mind a csővezetékes, mind a vasúti szállítás relevanciája csökken. Emellett a vészhelyzeti hőellátás során is használható lehet a közúti szállítás. Kiegészítő fűtésben való részvétele során lényeges a hőszállítás logisztikájának optimális megtervezése. Számításaimban az ismertetett teherautó egyszerre 7 db, 45 kWh kapacitás M-TES eszközt képes szállítani, a szállítás korlátozó tényezője nem a rakódótér, hanem a súlykorlát. A kapott adatok szakirodalommal (Chiu, 2016) való összevetése jelentős különbséget mutat, a szakirodalomhoz képest nagyobb fogyasztási adatok adódtak. Közepes távolság esetén egy felhasználói rendszer esetére számoltam, ez alapján igen jelentős költségek (éves szinten kb. 17 MFt), valamint jelentős CO₂ és NO_x kibocsátás (kb. 91,5 kgCO₂/MWh_{th}, kb. 1,25 kgNO_x/MWh_{th}) jelent meg. A szállítás és a szállított energia aránya 23%-ra adódott, a többletenergia költség pedig 591 €/MWh lett, így az alkalmazása erősen kérdéses. Németországban 2022 szeptemberében előállt 600 €/MWh feletti átlagár, így előfordulhat kedvező scenárió, azonban gazdasági és környezetterhelési szempontból a folyamatos használata nem indokolt,

vészhelyzeti tárolóként való alkalmazása rejthet potenciálokat. A korábban említett hulladékhő hasznosítás, és a TCM tárolók szállítása növelheti a közúti szállítás versenyképességét.

3.3.3 Vasúti hőszállítás

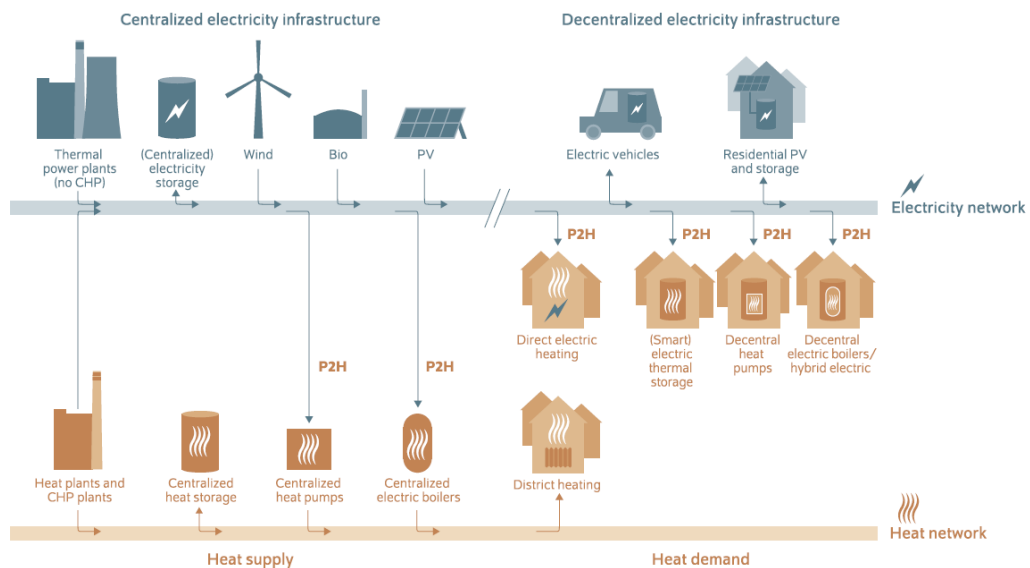
Vasúti alkalmazás kapcsán a M-TES modulok zárt kocsikban való szállítása és átrakódása lehet működőképes. A közúti szállítás kiváltásának feltételezéseim szerint jelentős energiamegtakarítási potenciálja lehet, amely akár intermodális EKR potenciálként is jelentkezhetsz. Vasúti hőszállítás esetében egy vagonban 14 db 45 kWh-s hőakkumulátor fér el, a közútihoz hasonlóan szintén a súly a korlátozó tényező az általam vizsgált Gbs 154-es típusú szerelvényénél. Számításaim 60 km-es távolságra vonatkoznak, azonban ennek gyakorlati jelentősége Magyarországon nem túl nagy, hiszen a nagyobb ipari telephelyek nem fekszenek nagy távolságra a hőfelhasználási pontoktól. Gyakorlati jelentősége olyan esetben lehet, amikor egy ipari üzem közel fekszik a vasúthoz, és az általa ellátott középület, lakossági épületek nem túl közel, de szintén a vasút közelségében fekszenek. Ekkor megvalósítható lehet egy rendszeres hőszállítás akár ipari sínpárok használatával. Hátrány azonban, hogy tehergépjármű, targonca használatára mindenképpen szükség van a be- és kipakolásnál. Előnynek sorolható, hogy a többletenergia költsége és CO₂ kibocsátása sokkal kedvezőbbnek mondható (67 €/MWh és 29,5 kgCO₂/MWh_{th}), arányaiban a szállítás pedig jóval kevesebb energiafogyasztással jár. A kapott értékeket a szakirodalommal (Chiu, 2016) összevetve jelentős eltérést nem tapasztalható. Feltétel a közútihoz viszonyítva a nagyobb szállított mennyiségek megléte. Nagy távolságra szintén nem éri meg elszállítani a modulokat (max. 30 km), de hulladékhő vagy megújulóenergia rendelkezésre állása esetén és meglévő vasút közelségében lévő jelentős hőigények mellett elképzelhető a gazdaságos hőszállítás vasúton.

A hőtároló modulok és a csővezeték kivitelezésének közvetlen költségei kapcsán mind fennáll a jelentős tőkeigény, az alkalmazási korlátok szűkülése pedig remélhetőleg teret ad az újabb technológiák bővülésének is.

4 HŐTÁROLÁSI PROJEKTEK

4.1 POWER-TO-HEAT TECHNOLÓGIA

A villamosenergia-rendszer stabilitása szempontjából elengedhetetlen a flexibilis rendszeremlék megléte, hogy azok segítségével az ingadozó megújulóenergia termelés gazdaságosan és fenntartható módon szabályozható legyen. (Bloessa, 2018) A technológia lehetővé teszi nagyobb megújulóenergia kapacitás telepítését, így hozzájárulva az energia szektor dekarbonizációjához. A P2H (power-to-heat) elve az, hogy a villamosenergia-termelés szempontjából egy rugalmas szabályozási és tárolási kapacitást bocsásson a rendszerüzemeltető rendelkezésére a hő szektorral való összekapcsolás által. A rendszerben az azonnal nem hasznosított, eltárolt hő a hőellátó rendszer igényei és fogyasztói által kerül felhasználásra. Fontos elem, hogy ennek az időtávja jelentősen nagyobb lehet a hő előállításának idejénél, így az optimális időbeli energiaelosztás megvalósítható. Az energia elosztásának időbeli elkülönítése mellett tehát a hőellátó- és villamosenergia-rendszer összekapcsolása és integrálása is megtörténik, amely az energiabiztonság szempontjából is előnyös.



9. ábra: P2H struktúrája és megvalósulási formái - (Bloessa et al., 2018)

Opciók szintjén beszélhetünk központosított (centralizált) és elosztott (decentralizált) P2H megoldásokról, attól függően, hogy mekkora hőellátó rendszer kerül kiszolgálásra. A centralizált megoldásokhoz tartozik a távhőrendszer rugalmassági eszközei, a

decentralizált technológiák közé pedig többek között a háztartási villamos kazán, hőszivattyú, valamint a szabályozott elektromos fűtés sorolható. A centralizált rendszerek jellemzője, hogy a hő előállítási és felhasználási pontja távol esnek egymástól. Emellett elkülöníthetők a direkt fűtéses, valamint a hőtárolóval ellátott P2H eszközök. Az utóbbi időben a fejlett telekommunikációs és szabályozási rendszerrel felszerelt megoldásokat „okos” elektromos hőtárolónak hívják, általuk a korábbinál gyorsabb és hatékonyabb módon érhető el a hőtermelés.

A P2H jelenlétével összességében biztosítható a csúcsterhelés csökkentése, a termelt energia eltárolása és elosztása, a hőerőművek és távhőrendszerek hatékonyabb üzeme, valamint a nagyobb megújulóenergia penetráció. A technológia a fogyasztói oldali befolyásolás (DSM) lényeges eleme. A későbbiekben egy magyarországi CHP erőmű területén üzemelő P2H rendszer bemutatása történik meg, a gyakorlati kihívások, megoldások részletezésével. Az ismertetett rendszerben az energia belső hasznosításának elemzése történik meg, azonban ez természetesen kiterjeszhető szélesebb skálára.

4.2 MAGYARORSZÁGI ERŐMŰ TERÜLETÉN LÉTESÜLT HŐTÁROLÓ

4.2.1 Ismertetés

A bemutatásra kerülő ipari hőtároló egy hazai kombinált ciklusú erőmű területén létesített, villamos kazánal együtt működő tároló. Az energiatermelő szektorban nagy potenciája van a hőtárolási technológiák alkalmazásának, mivel sokszor jelentős felhasználatlan hőenergia mennyiség áll rendelkezésre, amelynek hasznosítása képes az erőmű minél gazdaságosabb üzemét is biztosítani. Emellett a fosszilis tüzelőanyagok kiváltásában és a kiegyenlítő energia termelésében is nagy szerepet játszanak, így méretéből is adódóan szükségesnek találtam megvizsgálni a telephelyen működő rendszert.

Az erőmű építésénél 2 db 8000 m³ térfogatú, 20 méter átmérőjű duplafalú olajtartály kapott helyet a működéshez szükséges tartalékok biztosítása érdekében. Az üzemelési gyakorlat optimalizálása révén azonban kiderült, hogy nincs szükség mindkét tartály tárolókapacitására, így az egyik kiürítésre került később. Mivel a tartály ennek megfelelően rendelkezésre állt, így felmerült hőtároló létesítése az erőműben. Pár évvel korábban a szabályozási potenciálok kihasználására egy villamos kazán is telepítésre került az

erőmű területén, így fenn állt a lehetőség, hogy több rendszer kombinálásával egy hatékony hőtárolási struktúrát hozzanak létre.

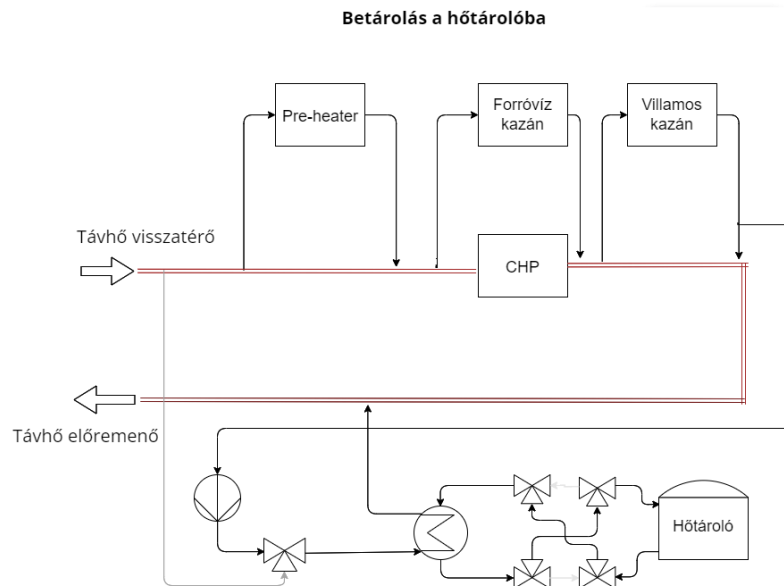


10. ábra: Bemutatott hőtároló látképe

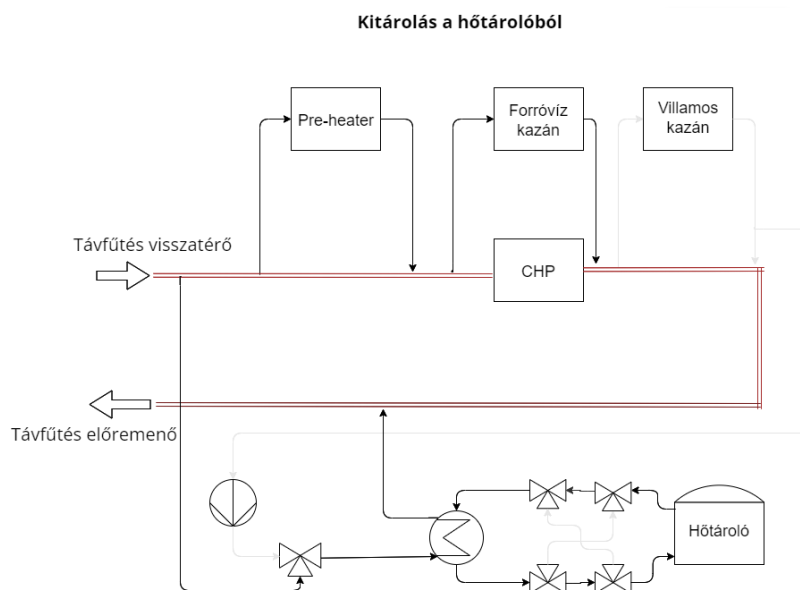
4.2.2 Műszaki elemzés

A tároló oldala duplafalú acéllal borított, biztonsági okok miatt 1000 mm-es légréssel, amit szükséges volt 100 mm közetgyapattal belülről körbeszigetelni. A tároló alján is szükségesnek látszott leszigetelni a tartályt, mivel a tároló teljes feltöltése esetén a 80-90 °C hőmérsékletű víz komoly hőfeszültségeket okozhatott volna az alapozásban, ezt egy nagyobb szilárdságú anyaggal kellett megoldani tekintettel a víz tömegére. A korrózió elleni védekezés miatt sótalánvíz került a tartályba, oldószerként pedig kis koncentrációban egy illékony vegyszert adtak hozzá, hogy a felülről bejutó levegő ne okozhasson kárt a szerkezetben. A tartály atmoszférikus nyomáson üzemel, amely ár és biztonság szempontjából kedvező, hiszen nyomástartás során sokkal jelentősebb falvastagságoknak és biztonsági kritériumoknak kell eleget tenni, valamint jelen esetben a tároló geometriája, szerkezete eleve adott volt. Előfordul, hogy hasonló tartályoknál gőzpárnát használnak a beszökő levegő elkerülésére és így a korrózióvédelemre, azonban jelen esetben a vegyszeres megoldás lett kiválasztva. Ennek előnye, hogy nem szükséges hozzá pótlólagos villamos gép igény, amely akár több tíz kW teljesítményű is lehet, hátránya viszont, hogy a vegyszer pótlásáról gondoskodni kell. A tároló tetején nyitott légző található, amin keresztül a nyomás kiegyenlítődése megvalósult. A tartály tetején túlfolyó is felszerelésre került, amelynek leürítése biztonsági szempontból nagyobb, mint a tartályt ellátó vezeté-

kek, ezáltal a tartály túltöltése elkerülhetővé vált. A rendszerbe beszerelt keringtetőszivattyú hűtését meg kell oldani megfelelő módon, hiszen kitérőkor az akár 95°C-os víz átáramlása növeli a hűtési igényeket.



11. ábra: Hőtárolóba való betárolás az erőmű sematikus távhőellátó rendszerábrázolásával – saját szerk.

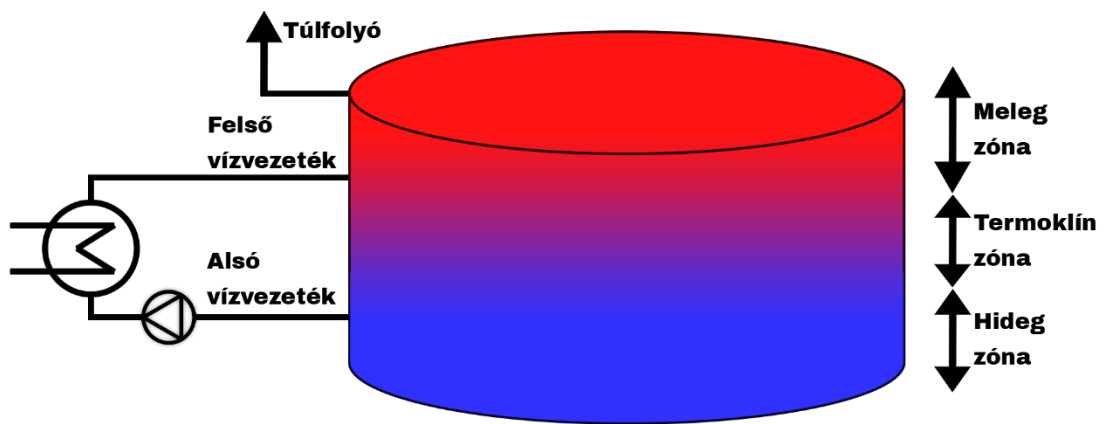


12. ábra: Hőtároló kisütése az erőmű sematikus távhőellátó rendszerábrázolásával – saját szerk.

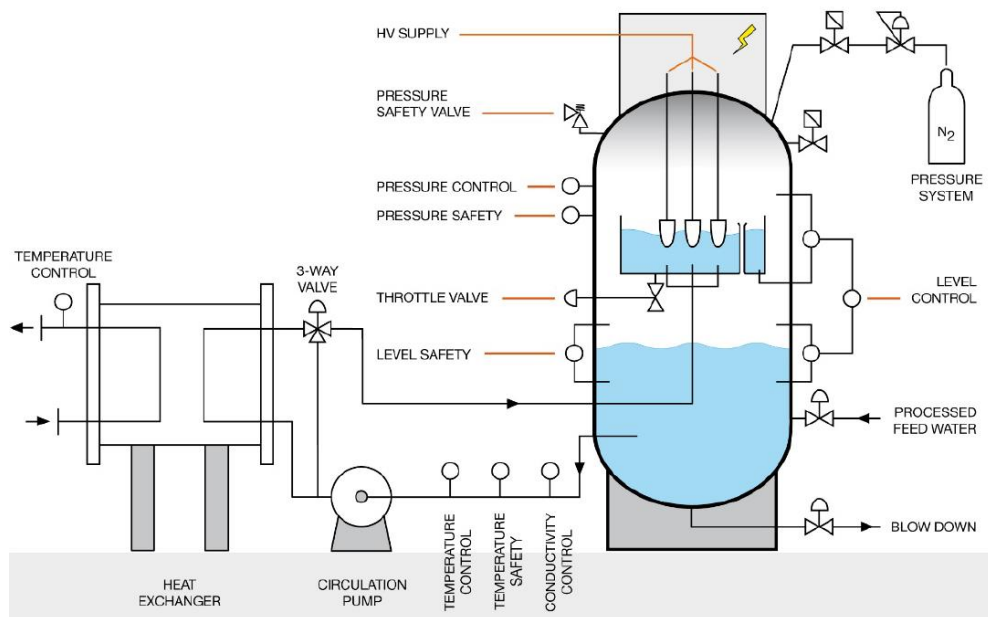
A tartály hőrétegződéses kialakítású, a hideg és meleg víz között jól behatárolható határreteg (Rakesh, 2019) alakul ki. A tartályba felül egy kúp alakú, kéttálcás elem segít-

ségével jut be a meleg víz, alul a hideg víz bejuttatását egy ötágú elosztó csőhálózat biztosítja. A víz bejuttatásának a módja azért is fontos, mivel kitároláskor és betároláskor is biztosítani kell a lamináris áramlás meglétét kiömléskor. Így a víz egyenletes be-, illetve kiáramlásával elérhető a tartályon belül a minél nagyobb szeparáció, amely nagyobb megjelenő hőfokként, illetve kitárolható teljesítményként jelentkezik. A teljesen feltöltött és teljesen kisütött állapot között jelentős térfogatbeli különbség van, számolások alapján a vízszint teljesen feltöltött állapotban 709 mm-el alacsonyabban található, ez folyamatos szintméréssel monitorozható.

Indirekt TTES egyszerűsített kapcsolás



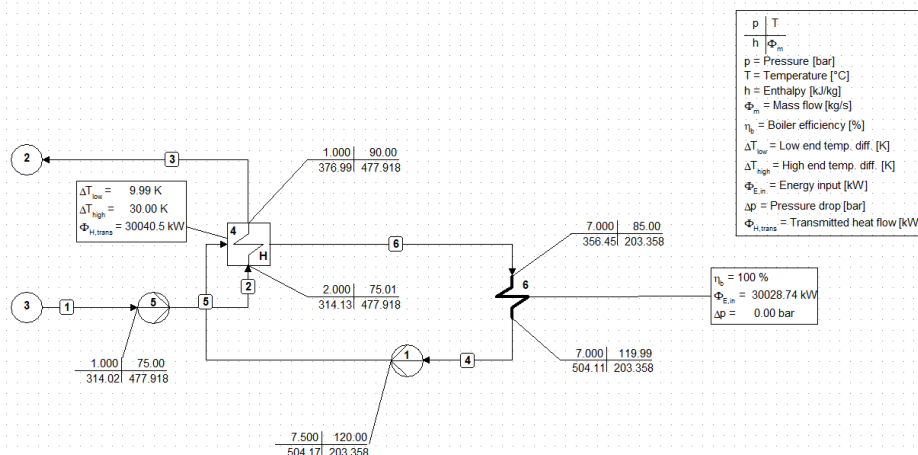
13. ábra: Hőretegződéses tartály egyszerűsített ábrája (félig feltöltött állapotban) - saját szerk.



14. ábra: VK rendszerének sematikus felépítése - (FCT, 2019)

A hőtároló 30 MW teljesítménnyel képes be, illetve kitárolni, a maximum névleges kapacitás 300 MWh. A tárolt víz 95 °C-ig tárolható, efelett a hőmérsékletkorlátok megszüntetik a töltést. A hőtároló rendszere egy hőcserélőn keresztül kapcsolódik a fűtött rendszerre, a körben pedig található egy váltószelepes áramlásfordító, amely a ki-tárolás és betárolás irányát hivatott megfordítani a változó üzemi körülmények függvényében. A hőcserélő nyomásleválasztó szereppel is bír, mivel az alacsonyabb nyomású hőtároló kört választja el a magasabb nyomású távhőrendszertől.

Az erőmű összeköttetésben van a közeli városban működő távhőhálózattal, ennek hőfoklépcsője 70/110, üzemi nyomása 25 bar. A távhőrendszerre való rátermelés több forrásból is teljesülhet az erőmű területén belül. A hőhasznosító kazán előmelegítői képesek rádolgozni a rendszerre, ezután tovább fűthető a víz a gőzturbina megcsapolásán keresztül is. Arra az esetre, amikor nem termel az erőmű, nagyvízterű forróvízkazánok lettek telepítve, amelyek a szükséges hőigényt képesek ellátni, azonban természetesen az üvegházhatású gáz kibocsátást is növelik a telephelyen. A távhőrendszer szabályozása fojtásos szabályozással valósul meg a szivattyúkon keresztül, az erőmű rendszerein egy kb. 1,5 bar-os nyomáscsökkenés tapasztalható. A hőigényeket tekintve elég változatos értékeket tapasztalhatunk, nyáron nagyjából 800 m³/h, míg télen 2000 m³/h körül alakul a térfogatáram. Az időjárás, valamint a fogyasztások drasztikus alakulása miatt azonban sokszor jelentős pillanatnyi hullámzások, kitérések jelennek meg a hőigényben, ennek kiegyensúlyozását pedig a hőellátó rendszernek kell megoldania.



15. ábra: Hőtároló rendszer modellje Cycle-Tempo programban

A hőtároló kivitelezését megelőzően egy 35 MW-os villamos kazán is telepítésre került az erőműben azzal a célzattal, hogy a le irányú szabályozási piacon részt tudjon venni az erőmű egy újabb rugalmasságot növelő beruházás által. A VK felépítését tekintve 3 db, a felső részen elhelyezett háromfázisú elektródából áll, alatta egy kisebb, és egy nagyobb térfogatú tápvíz tartó kapott helyet. A kazán vízszintszabályozással működik, amelynek lényege, hogy az elektródák leadott teljesítmény a kisebb tápvíz tartón mért vízszint függvénye, nagyobb teljesítmény leadása esetén jobban érintkeznek a vízzel az elektródák, míg kisebb teljesítménynél kevésbé lógnak bele. A kazán 9 bar-on üzemel, a kilépő vizet 150 °C-ra képes felfűteni. A potenciálisan képződő hidrogén elleni védelem miatt szakaszos gázlefúvató rendszer is működik a kazánban. Az ipari rendszerekben elterjedtebbek a 12 bar alatt üzemelő villamos kazánok, mivel előlött már szerkezeti és védelmi szempontból költségesebb lenne a beruházás.



16. ábra: Villamos kazán (VK) az erőműben

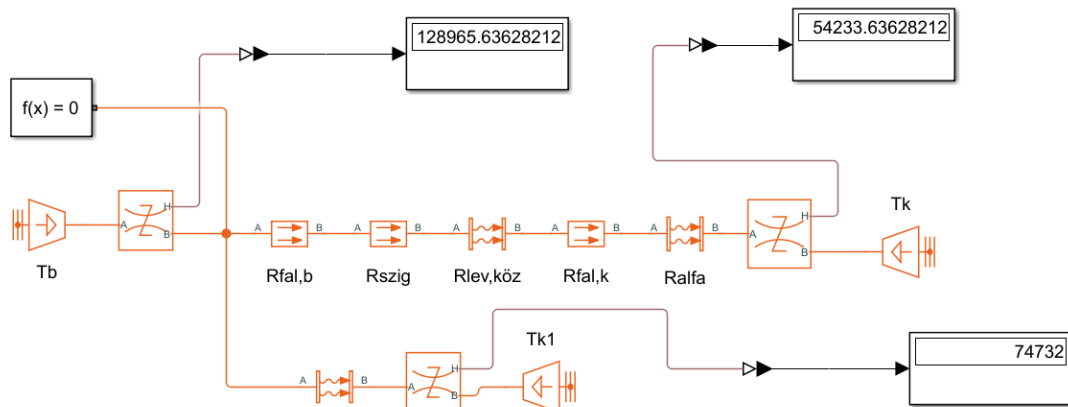
Az újonnan kivitelezett rendszerben a villamos kazán is képes a város távhőellátására rátermelni, emellett képest a rendszerirányító számára negatív aFRR szabályozási energiát is szolgáltatni. A hőtároló töltése is történhet több forrásból, egyrészt képes az erőmű füstgázhasznosításából keletkező hő egy részét eltárolni, másrészt a VK működése során keletkező hőt is képes az eszközbe betárolni. Kitérő kapcsán az erőmű készenléti

üzeme alatt tud a távhőhálózatra rátermelni, így részben vagy egészben kiváltva a forróvíz kazánokat, ezáltal csökkentve a rendszer CO₂ emisszióját.



17. ábra: Csatlakozó felső vízvezeték a hőtárolónál

A tároló névleges kapacitása 300 MWh, ennek feltétele a tárolóban elérhető legmagasabb hőfok. Emellett a távhő visszatérő hőmérséklete is hatással van, a tároló 95°C-os teljes felfűtése esetén a fűtési visszatérő hőmérsékletnek 63°C-nak kell lennie. Ez nagyjából megfelel a tapasztalati értékeknek is, a 70°C-os névleges visszatérő hőmérsékleti értéktől bizonyos szintű eltérés mindig tapasztalható. Megvizsgálható, hogy egy nagyon hatékony, alacsony hőfokkal működő távhőhálózat számára mekkora kapacitással tudna jelen lenni ugyanez a tároló. Feltételezzünk egy 45/25-ös alacsony hőfoklépcsőjű rendkívül hatékony távhőrendszert, melyben a lakások teljes hányada padlófűtéssel rendelkezik, emellett akár uszoda, vagy kert hőellátó rendszere is szóba jöhet alacsony hőmérsékletű hőfelhasználás kapcsán. A hőtárolóból kinyerhető névleges hőenergia ilyen hasznosítás esetén 465 MWh lenne, ami 55%-kal nagyobb hasznosítást tenne lehetővé, mint az eredeti esetben a tároló fizikai működésének és paramétereinek megtartása mellett. Ebből látható, hogy a TTES hőtárolók minél hatékonyabb kihasználása érdekében érdemes összpontosítani az alacsony hőmérsékletű hőfogyasztás elősegítésére, az épületek és a fűtési rendszerek korszerűsítésére.



18. ábra: A hőtároló hőveszteség modellje

A hőtárolók hatásfokának meghatározásakor, valamint értékelésekor lényeges szempont a veszteségek mértékének figyelembevétele. A TTES tárolók esetén a hőveszteségek minimalizálásához szükséges hőszigetelés beépítése, hiszen anélkül mind a tárolt energiamennyiség, mind a felhasználható hőfok csökkenne. Az ismertett tárolóhoz készítettem egy hőveszteség modellt, amely segítségével becsülhető a veszteségek mértéke. A hőközlés modellben belső hőmérsékletnél a névleges 95°C -kal, külső hőmérsékletnél 10°C -kal számoltam. Figyelembe vettem a belső és külső acélfal hővezetését, a belső fal külső felén elhelyezett szigetelés hővezetését, a közbenső légréteg hőátadását, valamint a külső falnál történő hőátadást. A falon átmenő hőáramon túl számoltam a tartály felső légrétege felé történő hőközléssel. A belső izotermikusnak tekintett melegvíz hőtároló tömeg hőtranszportjára a környezet felé $128,97\text{ kW}$ érték adódott, amely a modell szerint a tárolónál heti szinten $21,66\text{ MWh}$ hőveszteséggel jár, ami a teljes kapacitás mindössze $7,22\%$ -a, a valós veszteségek minimálisan nagyobbak lehetnek a hőátadás változása és a hőhidak miatt ennél. A hőátbocsátási tényező $0,95\text{ W/m}^2\text{K}$ -nek adódott.

A hőtranszport megoszlásából látható, hogy a hidegebb vízrétegek felé történő hőátadás csekély mértékű a környezet, valamint a felső légréteg irányában tapasztalt hőveszteségekhez képest. A pár napos és heti időtávú tárolást tekintve ez elfogadható érték. Érzékenységvizsgálat során két jellemző értéknek van jelentős hatása a hőveszteségekre; a felső légréteg hőszigetelő hatásának, valamint az oldalsó szigetelés jóságának. Ennek alapján megállapítható, hogy a rendszer hőszigeteléssel való ellátása rendkívül szükséges elem a rendszer hatékonysága és a hőveszteségek minimalizálása szempontjából.

4.2.3 Gazdaságosság

A hőtároló rendszer kivitelezése magában foglalja a villamos kazán, a csővezeték rendszer, a védelmek kiépítését, a szabályozási rendszer átalakítását, valamint a tartály átalakítását, szigetelés beépítését. A rendszer üzemeltetése az élettartamra vetítve nem jelentős, az erőművi kezelőszemélyzet képes a hibák detektálására és azok elhárítására. A rendszerrel kapcsolatosan felmerül a vegyszeradagolás költsége, a teljes élettartamra vetítve ezzel mindenképpen számolni kell. A hőtároló a működés során segít a teljes erőmű gazdaságos üzemeltetésében, hiszen szükséges hőkiadás esetén a kombinált ciklus az optimális munkapontban működtethető. Ennek a megtakarításnak a mértéke nem meghatározott, azonban szakirodalmi kutatások alapján (Teng et al., 2019) további részletes vizsgálattal kiegészítve felmérhető lenne. Az erőművi hulladékhő hasznosítása kiegészül kis hőigény esetén a gőzturbina megcsapolásairól származó hővel, valamint a villamosenergia-rendszerben fellépő túltermelési időszakban a VK termeléséből származó hővel. Utóbbi értékelhető a legköltségesebbnek, mivel a villamos energia rendelkezik a legnagyobb primerenergia tényezővel, felhasználása kizárólag a rendszer egyensúlyának érdekében indokolt. Nagy előnye viszont, hogy a szabályozási piacon való részvétele miatt jelentős rendelkezésre állási és szabályozási díjak realizálhatóak, amik javítanak a projekt megtérülésén.

A megtérülés számításánál az látható, hogy kiadások oldalán megjelenik a szigeteléshez, a vegyszerezéshez, a szabályozás és a védelmek kiépítéséhez, a tartály átalakításához, a csővezetékrendszer kiépítéséhez és a szivattyúk, hőcserélők telepítéséhez kapcsolódó állandó költségek, valamint a rendszeres karbantartáshoz és a szivattyúzási munkához kapcsolódó változó költségek. A szakirodalomban (Evans et al., 2012) megjelenik a TTES telepítésének fajlagos költsége, amely 20 £/kW. A számításaim során ennél alacsonyabb beruházási költség adódott, aminek az lehet az oka, hogy a vizsgált esetben a hőtároló szerkezet már rendelkezésre állt. Bevételi oldalon megjelenik az aFRR rendelkezésre állási és kiegyenlítő energia díja, valamint a hatékonyabb hőellátással összefüggésben az erőmű rendszeréből származó, a hőtárolás által fellépő energiamegtakarítás mértéke. Számításaim alapján a kivitelezett rendszer alig pár éven belül megtérül, erre azonban jelentős hatással lehet a kiegyenlítő energia, valamint a távhő díja, így mindig szükséges az adott piacon vizsgált gazdaságossági számítás. Ez alapján Magyarországon a tapasztalható jelentős megújuló-terjeszkedés miatt jelenleg van potenciál P2H technológia és hőtároló létesítésére.

A projekt kapcsán nagy előnynek mondható, hogy egyszerre erőművi hulladék hő felhasználás, valamint szabályozáshoz kapcsolódó villamos kazán is kapcsolódik a rendszerhez, továbbá jelentős hőigények kielégítésében tud részt venni a távhőellátás kapcsán. Ez speciális alkalmazásnak tekinthető, azonban igazán segíthet további ipari hőtároló technológiák lehetőségeinek az elemzésében.

5 ÚJ HŐTÁROLÁSI PROJEKT MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGI ELEMZÉSE

5.1 IPARI KÖRNYEZET BEMUTATÁSA

Az ipari szektor a teljes globális energiafogyasztás mintegy 35%-át teszi ki (Seyitini, 2023), ennek jelentős részét, megközelítőleg 74%-át hőenergia formájában hasznosítják. Felhasználás módja szerint az energiafogyasztás 60%-a az ipari folyamatok hőellátására, míg 11%-a helyiségek fűtésére fordítódik. Ipari hőelőállítás kapcsán megállapítható, hogy jelentős ÜHG kibocsátás kapcsolódik a szektorhoz, mivel számottevő a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása, az ipari telephelyeken általában nagyvízterű ipari kazánok biztosítják az ipari folyamatokhoz szükséges hőt. Az ipari folyamatok fő jellemzője a hőmérséklet, a gyártástechnológia gyakran szigorú szabályozott paramétereket kíván meg az optimális üzemeltetés érdekében. Hőmérséklettartományt tekintve rendkívül széles spektrum tárul elénk, 30 °C-tól pár ezer °C-ig találkozhatunk ipari hőfelhasználó technológiákkal.

Számos kutatás említi a szilárdanyagok hőtárolók gyakorlati alkalmazhatóságát ipari magashőmérsékletű hőellátás biztosítására. Jelenlegi kutatásomban nem a magashőmérsékletű alkalmazhatóságra fókuszáltam, hanem a gyakorlati megvalósíthatóságra. Emiatt munkámban egy fiktív TTES hőtárolót, valamint annak rendszerét tekintettem, hiszen ez egy kiforrottabb és olcsóbb beruházásnak tekinthető, továbbá egyszerűen telepíthető az ipari telephelyeken. A telephelyen egy fiktív italgyártó üzem működik, amely a relatív alacsony technológiai hőfok miatt került előtérbe. Az étel és italgyártási szektor világszinten kb. 30%-át teszi ki az ipari fogyasztásnak, így mindenképpen kiemelt területnek tekinthető. Az italgyártás során (Sovacool et al., 2021) szükség van tisztításra 30-70°C-on, melegítésre 20-60°C-on, és sterilizálásra 70-90°C-on. A telephelyen eredetileg a technológiai hőigényeket egy 12 MW-os ipari forróvíz kazán látja el, amely az épület fűtési rendszerét is fűti. Az épületek fűtésének igénye jelentős lehet egy ipari telephelyen, azonban a technológiai hőigényekhez képest jelen esetben kisebbnek mondható. A termelőüzem gyártósorainak névleges áramfelvétele 317 kWh/t_{termék}, hőfogyasztása 253 kWh/t_{termék}, a gyártóteljesítmény 15 t_{termék}/h. Az épület alapterülete 734 m², a naperőmű részben az épület tetején, részben a környező területeken helyezkedik el.

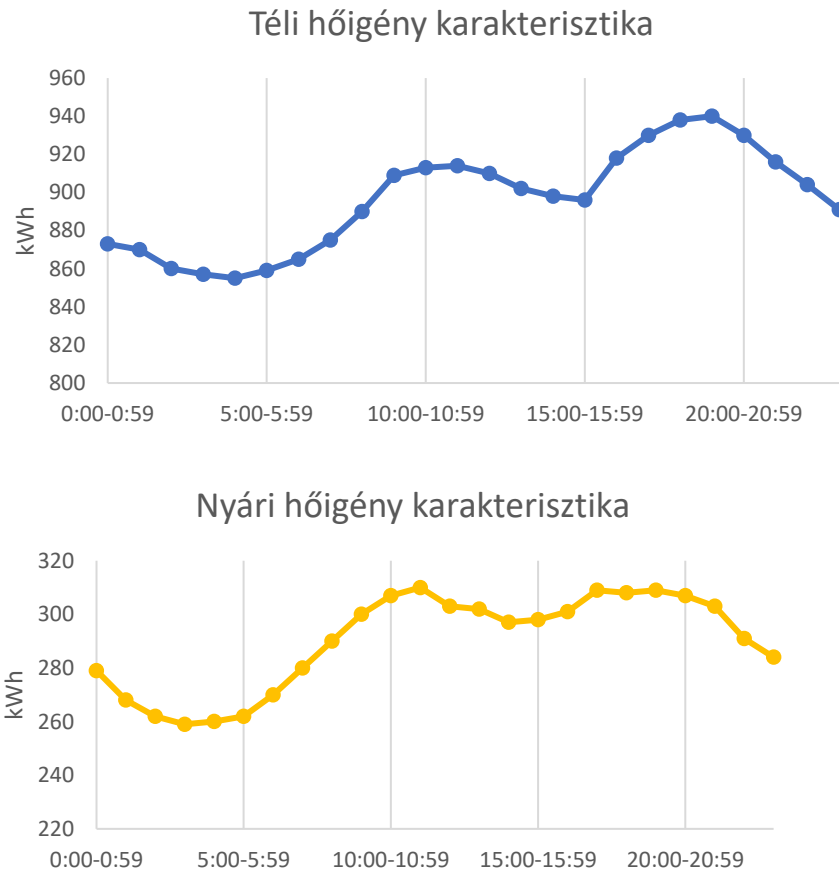
Egy megvalósuló beruházás keretében egy 8,8 MW-os naperőmű telepítése történik meg a helyszínen a telephely megújuló energiával való ellátása okán. A telephely flexibilis energiaellátása miatt egy villamos kazán és egy TTES rendszerű hőtároló létesítése is megtörténik. A hőtároló hőellátását az elektromos elektródás kazán látja el, a hőtároló atmoszférikus, hőrétegződéses kialakítású. A hőtároló kapacitása 14,8 MWh, térfogata 200 m³, a hőt maximum 95°C-on képes eltárolni. Magassága 10 m, így egy nagyobb belmagasságú temperált hőmérsékletű rakodótérben került elhelyezésre. A VK-nak nagy előnye a halk üzemvitel, így nem kell gondoskodni a munkatértől való elválasztásáról. A villamos kazán teljesítménye 5,8 MW, hatásfoka 99%, 4,16 kV-on veszi fel az áramot a hálózatról, 13 bar-on üzemel.

Az elemzés során elsősorban a helyi megújuló energia hasznosítást helyezem előtérbe, emellett viszont a negatív aFRR szabályozásban képes lehet részt venni a hőtároló rendszer, mivel kisütési ideje a kritériumnak tekinthető 2 óra felett van.

5.2 A TERVEZETT RENDSZER BEMUTATÁSA

A hőtároló rendszer bemutatása során fontos szempont a hőellátó rendszerekhez való kapcsolódás. A TES kitárolása során elsősorban az épület fűtésére képes rátermelni, valamint a HMV előállításában is részt vehet. Azért szükséges elsődlegesnek tekinteni, mivel a technológiai hőigényhez képest alacsonyabb hőfokok szükségesek, így a tároló kihasználásának hatékonysága nagyobb lehet. Másodsorban a TES a technológiai hőigényeket elégíti ki, ennek megvalósítása is kaszkád rendszer kialakításával lehet, tehát a legalacsonyabb hőmérsékletű hőellátásba kapcsolódik be először a tároló, a maradék hőigényt a technológia, a fűtés, illetve a HMV hőigényt tekintve a forróvíz kazán látja el. Emiatt a TES gyakorlatilag kiegészítő fűtési rendszerként üzemel a kazánnal párhuzamosan, annak időszakos kiváltásával kibocsátáscsökkenést elérve. A hőellátó rendszer csővezetékes kialakítású, a kis távolságok miatt nincs szükség egyéb megoldásra. Jelentős hasznosítható hulladék hő nem áll rendelkezésre a telephelyen, mivel az alacsony hőmérsékletű hőfelhasználás ezt nem teszi lehetővé. A naperőművi termeléshez kapcsolódó adatokat a PVGIS adatbázisából nyertem. A villamos energia, valamint a hőfogyasztást jellemző kétműszakos napi lefutás alapján generáltam, a HMV és a fűtés hőigényét szin-

tén profilosan vizsgáltam (Seyitini, 2023) két jellemző, egy téli és egy nyári hónap esetére. A villamosenergia árak a HUPX, míg a földgáz árak a CEEGEX oldaláról származnak.



19. ábra: Téli és nyári (fűtési és HMV) hőigény napi karakterisztikák

A rendszerben fontos részt képviselnek a különböző védelmek, amelyek leállítják a rendszer keringtetését hibajelzés esetén, ide tartozik a hőmérséklet relé, a nyomáshatároló, lefűvató szelep, a túlfolyó, és az áramlásfigyelő. A rendszer hatékony működése szempontjából fontos redundáns hőmérsékletmérési és monitorozó rendszer használata, ami által a szabályozó rendszer a leghatékonyabban képes működtetni a rendszert.

5.3 A HŐTÁROLÓ RENDSZER MODELLEZÉSE

A hőtároló rendszert a VK és a TES alkotja, a VK nagynyomású köréből a hő egy hőcserélőn keresztül jut a TES rendszerére betárolásnál, tehát passzív hőtároló rendszer-ről beszélünk. Kitérőnél a TES köréből a hőcserélőn keresztül jut az energia a fűtési körökre. A hőcserélőn alig pár fokos hőmérsékletcsökkenés történik, ezt a későbbiekben

hőátalakítási hatásfokon keresztül vettem figyelembe. A rendszerek szétválasztását a későbbiekben elhanyagoltam, így csak a hőtárolóhoz kapcsolódó hőforrásként, illetve hőfogyasztóként tekintettem a rendszert. A TES kapcsán a hőmérsékleteloszlás szögfüggését nem vettem figyelembe a homogenitás meglétének feltételezésével. A valóságos rendszereink többnyire a kontinuum termodinamika alá tartoznak, az idő- és helyfüggés megléte mellett kezdeti- és peremfeltételeket is szükséges definiálnunk a differenciálegyenletek megoldása végett. A következő

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q + \alpha \cdot (T_k - T) \quad (1.3)$$

általános érvényű mérlegegyenlet felhasználható a leírás során:

$$\dot{Q}_{\text{hővez}} = \frac{A \cdot \lambda}{d} \cdot \Delta T \quad [W] \quad (1.4)$$

$$\dot{Q}_{\text{hőáramlás}} = c \cdot \dot{m} \cdot \Delta T \quad [W] \quad (1.5)$$

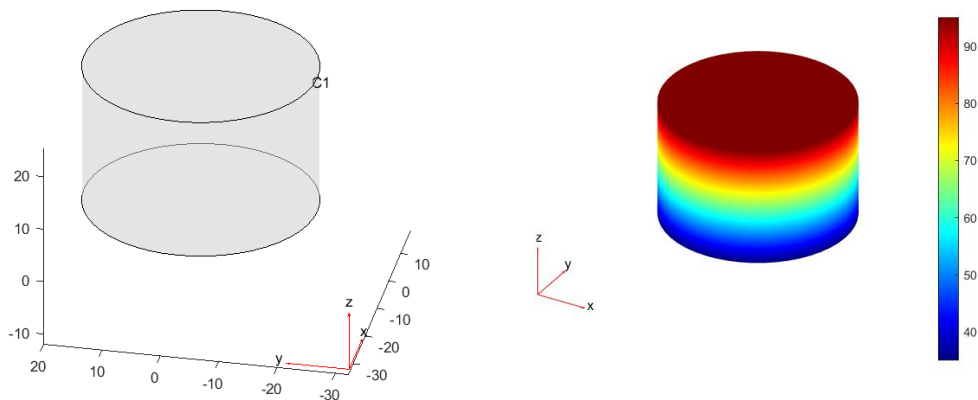
$$\dot{Q}_{\text{hőveszt,transzmissziós}} = U \cdot A \cdot (T - T_k) \quad (1.6)$$

A hőtároló ciklusaival kapcsolatban a következő megállapítások tehetőek:

$$E_{be} = E_{TES} + E_{veszt} \quad (1.7)$$

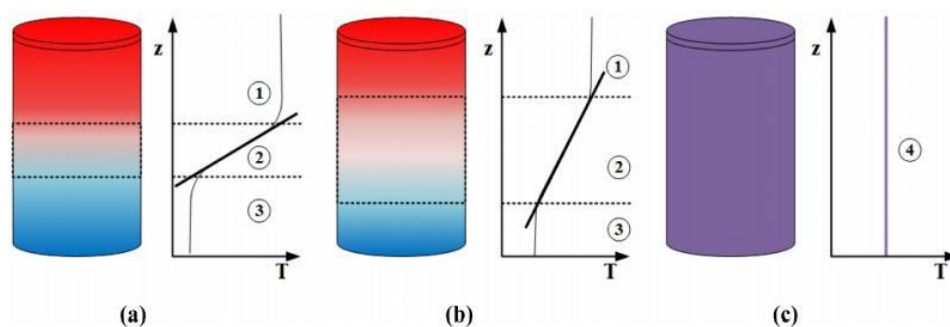
$$E_{ki} = E_{TES} - E_{veszt} \quad (1.8)$$

Betárolásnál tehát a villamos kazánban megtermelt hő egy része veszteségként jelenik meg, kitérítésnél pedig hasonló módon csökken a kitérölhető mennyiség a tárolóban lévő kapacitáshoz képest.



20. ábra: TES geometriai és termikus egyszerűsített modellje

A vízzel történő hőtárolás esetén meghatározható a hőmérséklet eloszlása. Betárolás során az alulról szívott, majd felmelegített víz a tartály felső felébe kerül. Kitárolás során a melegebb víz a hőcserélőn keresztül leadja hőjét, és a tároló alsó rétegébe kerül bevezetésre. Ez azt is jelenti, hogy a függőleges hőrétegződés alakul ki, amely lehet jól rétegzett (a), közepesen rétegzett (b), vagy állandó hőmérsékletű (c). Ez utóbbi a tároló teljes feltöltése, illetve kitárolása esetén valósulhat meg, minden más esetben kialakul egy átmeneti, ún. „termoklín” zóna a meleg és a hideg zóna között. Ennek a zónának a változása eltérő lehet más és más tárolókban, hatással vannak rá többek között a hővezetési, valamint a víz be- és kivezetésének áramlási viszonyai is.

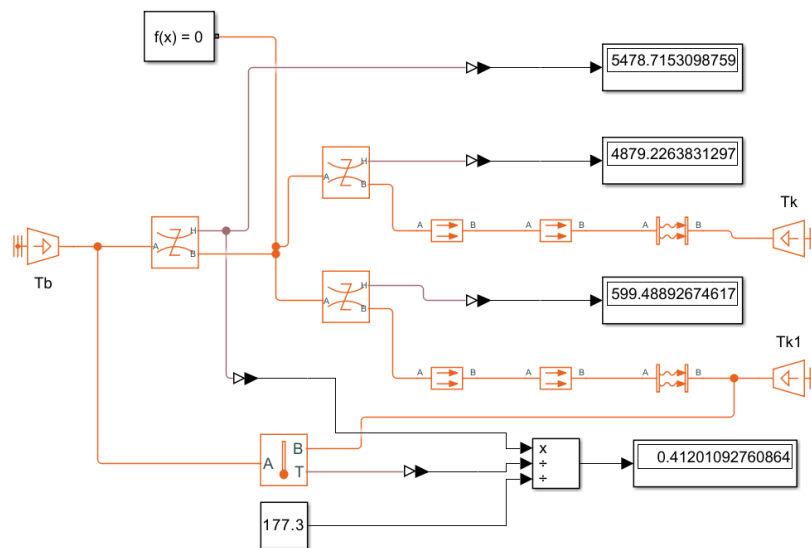


21. ábra: TTES hőtároló hőmérséklet eloszlása - (1) meleg zóna, (2) termoklín zóna, (3) hideg zóna, (4) izoterm állapotú tároló – (Dahas, 2019)

Borbély Tibor (2014) disszertációjában említést tesz a kaszkád rendszerek előnyéről, valamint megkülönböztet különböző hosszúságú (L/D arányú) tárolókat. Megállapításai között szerepel, hogy a minél ideálisabb működés érdekében a lehető legnagyobb hőmérsékleti rétegződést kell lehetővé tenni, így a termoklín zóna szélességét le kell csökkenteni. A hőtároló geometriáját mindig az adott alkalmazás vonatkozásában kell megvizsgálni, hiszen a rövid és hosszú tárolónak is vannak előnyei és hátrányai. A hosszú tárolóból egy ciklus alatt kinyerhető energiamennyiség nagyobb, valamint magas előremenő hőmérséklet érhető el. Hátránya viszont, hogy a szállítási teljesítményszükséglet nagyobb, a felület-térfogat arány miatt pedig a hőveszteségek is nagyobbak. Ezeket a szempontokat új hőtároló tervezésekor figyelembe kell venni a hőfelhasználás és a rendszer működtetésének vonatkozásában.

A modellezés során szükséges volt egyszerűsítések megtétele. A sűrűségváltozásból fakadó szintváltozást, a sűrűség és a fajhő hőmérsékletfüggését nem vettem figye-

lembe, a tartományon vett átlagos értékekkel számoltam. Emellett a radiális irányú hőmérsékletkülönbséggel egyszerűsítettem, egy hideg és egy meleg izotermikus részre bontottam a tárolót, külső hőleadás így az izoterm palástfelületeken történik. Ez tehát egy fix hőmérsékletű, elválasztott modellt jelent. A termoklín zóna meglétét is elhagytam, ez gyakorlatilag megfelel a tökéletes vízbejuttatásnak, illetve elszívásnak. A modell megalkotása során a hőátbocsátási tényező értékét a külön elkészített hőveszteség modellből volt alkalmam felhasználni.



22. ábra: A tervezett hőtároló hőveszteség modellje

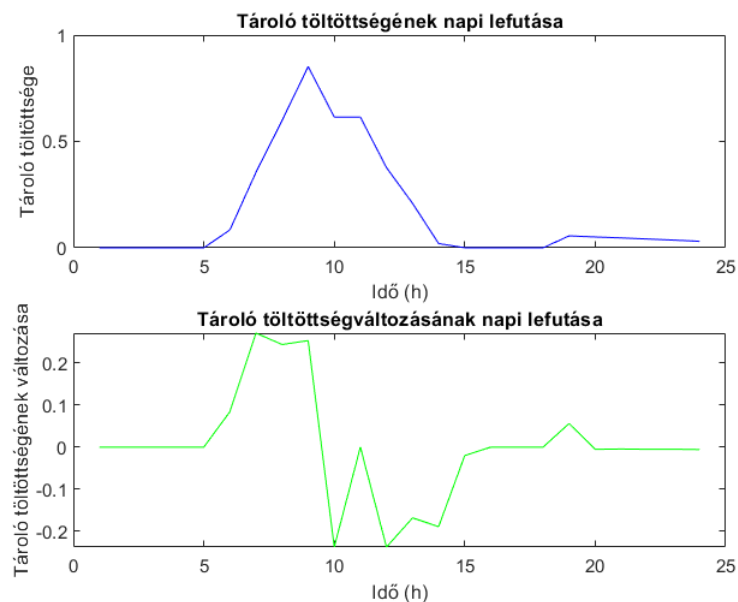
A hőveszteség számítása a tervezett rendszerhez kapcsolódóan hasonlóan zajlott, mint a 4.2.2. fejezetben. A külső hőmérséklet 20°C -nak lett felvéve az épület belső viszonyai miatt, a tároló maximális hőveszteségét teljesen töltött állapotban éri el. A korábban ismertetett okok miatt hőszigetelés elhelyezése szükséges, jelen esetben 10 cm kőzetgyapot szigeteléssel számoltam. Az így számolt rendszerben a maximális hőveszteség értéke 5,5 kW, amely heti szinten 6,8%-os csökkenést jelent. A hőátbocsátási tényező értéke $0,412 \text{ W/m}^2\text{K}$ -nek adódott, amely jóval alacsonyabb a korábbi, nagyméretű hőtárolónál. Ennek az lehet az oka, hogy ugyanakkora hőszigetelő réteg került mindkét berendezésre, ez fajlagosan azonban a kisebb rendszer jobb hőszigetelését eredményezi.

Idő kapcsán napon belüli óras adatokkal dolgoztam az egyszerűség kedvéért, ez szükség esetén könnyen konvertálható akár negyedórás bontásra is. Kezdeti feltételnek a tároló üres állapotát tekintettem, ekkor az izotermikus hideg rész aránya 100%-ot tett ki. Definiálhatunk a tároló leírásához egy SOC (state of charge) értéket, amely tört formában

adja meg a tároló töltöttségét, jelen esetben pedig az elhatároló zóna magasságát is a teljes magassághoz viszonyítva. Peremfeltételeknek a külső 20°C-os, a hideg közeg 30°C-os és a meleg közeg 95°C-os hőmérséklet értékei számítottak. Átalakítási hatásfoknak 98%-ot vettem fel. Így látható, hogy a hőtároló minimális különbségű ki- és betárolása esetén az egyszerűsített modell szerint a rendszerhatásfok 87% körüli, ha a hőhasznosító rendszer 92%-os hatékonyságú. Természetesen ehhez a hosszabb időtávú tárolás során még hozzáadódnak a transzmissziós veszteségek is.

5.4 EREDMÉNYEK

A szimuláció során kapott eredmények a 23. ábrán láthatóak, egy tipikus tél eleji napra vonatkoztatva. A tároló töltöttsége emelkedett, amikor a naperőművi termelés meghaladta a telephely energiafogyasztását, így a telephelyen azonnal nem felhasználható energia eltárolása megtörténhetett. Ez azt is jelenti, hogy a villamosenergia rendszer terhelés csökkenthető, hiszen tároló nélkül a hálózat irányába jelentős teljesítményleadás lett volna. A tároló szabályozási logikáját követve miután felfutott az üzem termelése és a naperőművi termelés alábbhagyott, úgy kisütési állapotba került a hőtároló. Az eltárolt hőt először a fűtési és HMV rendszernek adja át, majd ezután a technológiai hőellátó rendszerre segít rá.



23. ábra: A szimuláció eredményeképpen a tároló töltöttségének napi lefutása

Ugyan korlátként van jelen a maximális ki- és betárolási teljesítmény, annak korlátozó hatása nem jelent meg a bemutatott esetben. Ez a tároló töltöttségének változásából látszik, hiszen a 2 órás kisütési teljesítményhatárt csak 0,4-es változás esetén érné el. Az említett diagramból megfigyelhető a töltés és a kisütés változó intenzitása.

Az eredmények elemzése során látható, hogy a tároló betárolásnál megfelelően elláthatja az időjárásfüggő termelők eltéréséből adódó teljesítményváltozásokat, valamint képes lehet szabályozási tartalék biztosítására. Emellett nagy potenciál van az aFRR tartalék biztosításában is, hiszen a tároló jelentős kapacitása rendelkezésre áll a nap során, valamint a terhelésváltoztatás intenzitása is növelhető.

Fontos még a megfelelő méretezés a hőtároló esetében. A modellalkotás során 200 m³-es tartályt tekintettünk, azonban látható a napi elemzés során, hogy nem éri el a maximális töltöttségi szintet, így túlméretezettnek tekinthető jelen állapotában. A számítások során az ideális tárolóméretnek 170 m³ adódott, amely esetben a tároló a nap során egyszer kerül teljesen töltött állapotba, ez a 24. ábrán figyelhető meg. Ideálisnak a tároló teljes kihasználását tekintem, azonban ebben az esetben vigyázni kell, mivel bizonyos pillanatokban nem áll rendelkezésre szabad kapacitás, így a kiegyenlítő energia szolgáltatásában sem tud részt venni ezen időszakokban. Emiatt indokolt lehet költség szempontból a tárolót kis szinten túlméretezni.



24. ábra: TES töltöttségének alakulása ideális méretezés esetén

Érzékelhető, hogy a tároló hatékonyságát jelentősen befolyásolja a tároló fogyasztói oldalával való kapcsolata, így igazán optimálisnak az alacsony hőfokú hőfogyasztók tekinthetőek.

Valós esetet vizsgálva belátható, hogy a VK működési költségei nagyban függenek a villamosenergia aktuális árától. Szabályozás kapcsán a kiegyenlítő energia is jelentősen megnöveli a rendszer életképességét, ezen belül a díjnak a túlnyomó részét a rendelkezésre állási díj teszi ki. Gazdaságossági szempontból a fűtési célú használat kifejezetten előnyös, kizárólag az ipari magashőmérsékletű hőtárolás viszont nem hatékony.

6 ÖSSZEFOGLALÁS

6.1 KÖVETKEZTETÉSEK

Összességében elmondható, hogy a hőtárolási technológiáknak jelentős szerepe van a megújuló energiatermelés integrációjában, a dekarbonizáció és a gazdaságos rendszerszabályozás előrehaladásában. Ipari viszonylatban inkább a szilárdtöltetes tárolók elemzése a gyakori, de alacsonyabb hőellátásként mint kiegészítő hőforrás, megfelelő méretezés esetén használható lehet.

A hőtároló technológiák megismerésével az is látható, hogy számos esetben érdemes benchmarkok mentén áttekinteni az adott tárolási feladatot, a jelenleg rendelkezésre álló technológiák mellett pedig egyre inkább ajánlott újabb, innovatívabb megoldások figyelembevétele is a kiemelt előnyök kihasználása miatt. Szükséges a jelenleg üzemelő hőtároló rendszerek vizsgálata, a műszaki megvalósítás és üzemelés során fellépő kihívások kezelése, és a problémás pontok részletes elemzése. A jövőben várakozásaim szerint mindenképpen több megvalósuló hőtároló projekt indulhat a gazdasági előnyök érzékelése miatt, amely remélhetőleg az ipari alkalmazás területére is kiterjed.

A hulladék hő hasznosítás kiemelt vizsgálata szükséges lehet, mivel globálisan jelentős potenciál rejlik a hőtároló rendszerrel való összekapcsolás terén is. Az általam bemutatott egyszerűbb szabályozási és modellezési rendszer természetesen alkalmazástól függően tovább specifikálható, a szabályozási logika beállításánál azonban tekintettel kell lenni az idősoros ingadozásokra, a hőátvitel megfelelő kialakítására. Emellett figyelembe vehetők akár az ár alapú szabályozó rendszerek, hiszen ezek a piacon tapasztalt jelentős volatilitás hatására meg tudják emelni a tároló által elért megtakarítás mértékét. A modell kapcsán célokom a pénzügyi optimalás kérdéskörének további részletesebb vizsgálata, valamint szélesebb időtáv áttekintése, akár több tipikus napi szcenárió összehasonlításával.

7 FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Evans A, Strezov V, Evans T. J. (2012): Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 4141–4147
2. Few S. PhD, Schmidt O., Gambhir A. (2016): *Electrical energy storage for mitigating climate change*. Grantham Institute, Imperial College London
3. EPRI: Electric Power Research Institute (2023); *Energy Storage Technologies In: Storage-Wiki* https://storagewiki.epri.com/index.php/Energy_Storage_101/Technologies (Letöltés időpontja: 2023.10.08.)
4. EU1: Európai Unió Tanácsa, Európai Bizottság (2022); *Az Európai Parlament és a Tanács Irányelve 2021/0218 (COD)*. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10746-2021-INIT/hu/pdf> (Letöltés időpontja: 2023.10.08.)
5. EU2: Európai Unió Tanácsa, Európai Bizottság (2022); *Az Európai Parlament és a Tanács Irányelve 2021/0218 (COD)*. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10745-2021-INIT/hu/pdf> (Letöltés időpontja: 2023.10.08.)
6. EU3: Európai Unió Tanácsa, Európai Bizottság (2022); *REPowerEU terv, COM 230 final*. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc930f14-d7ae-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF (Letöltés időpontja: 2023.10.08.)
7. EU4: Európai Számvevőszék (2019), *Az energiatároláshoz nyújtott uniós támogatás* https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/BRP_ENERGY/BRP_ENERGY_HU.pdf (Letöltés időpontja: 2023.10.08.)
8. Gerse K. (2020): *Energiatárolók [Digitális kiadás]*, Akadémiai Kiadó, ISBN 978 963 454 493 7
9. Wolf M. (2012): *Program Design and Analysis*. In: *Computers as Components* (3rd edition)
10. IRENA (2020): *Innovation Outlook: Thermal Energy Storage*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, ISBN 978-92-9260-279-6. www.irena.org/publications.
11. Seyitini L., Belgasim B., Enweremadu C. C. (2023): *Solid state sensible heat storage technology for industrial applications – A review*, *Journal of Energy Storage* 62, 106919
12. Andrassy Z. (2021): *Fázisváltó anyaggal töltött hőtároló modellezése, optimalizálása és épületgépészeti rendszerekbe illesztése*, doktori disszertáció, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárás-technika Tanszék
13. Sinha R., Zareipour H., Bak-Jensen B. (2019): *Flexibility from Electric Boiler and Thermal Storage for Multi Energy System Interaction*. *Energies* 13(1):98, DOI: 10.3390/en13010098
14. Teng Y., Sun P., Leng O., Chen Z., Zhou G. (2019): *Optimal Operation Strategy for Combined Heat and Power System Based on Solid Electric Thermal Storage Boiler and Thermal Inertia*. *IEEE Access* 1109/ACCESS.2019.2958877
15. Ho C. K., Ambrosini A. (2021): *Thermal Energy Storage Technologies*. Sandia National Laboratories Publications
16. Fang T., Lahdelma R. (2016): *Optimization of combined heat and power production with heat storage based on sliding time window method*. *Applied Energy* 16, 723–732
17. PV: Enkhardt S. (2023): *PV magazine highlight top business model für Kraftwerk: Mehr als heiße Luft*. *PV magazine [online kiadás]*, 2023.06.13.

18. Varga-Grund Sz. (2021): Biogáz-tüzelésű gázmotor hulladékhőjének szezonális hőtároláson keresztüli hasznosíthatóságának vizsgálata. Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar
19. Dahash A., Ochs F., Janetti M. B., Streicher W. (2019): Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems. *Appl. Energy*, vol. 239, no. October 2018, pp. 296–315, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.189.
20. Borbély T. (2014): Szilárd töltetű hőtároló optimális kihasználása. PhD értekezés, Pannon Egyetem, Vegyészmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskola
21. FCT: FCT International Burners, Correspondance (2019). *Technology Data – Industrial process heat*. Danish Energy Agency p.103
22. Wang D. (2023): Heat loss along the pipeline and its control measures. *SN Applied Sciences* 5, article number: 2 (2023)
23. J.NW. Chiu, J. Castro Flores, V. Martin, B. Lacarrière (2016): Industrial surplus heat transportation for use in district heating. *Science Direct, Energy* 110 (2016) p.139-147
24. Kuta M. (2023): Mobilized thermal energy storage (M-TES) system design for cooperation with geothermal energy sources. *Applied Energy* 332 (2023) 120567
25. García-Álvarez A., Perez-Martinez P. J., González-Franco I. (2012): Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions in Rail and Road Freight Transport in Spain: A Case Study of Car Carriers and Bulk Petrochemicals. *Journal of Intelligent Transportation Systems Technology Planning and Operations* 17(3), 2012. 01., DOI:10.1080/15472450.2012.719456
26. Bloessa A., Schillb W-P, Zerrahn A. (2018): Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials. *Applied Energy* 212 (2018) 1611–1626
27. Sovacool B., Bazilian M., Griffiths S., Kim J., Foley A. M., Rooney D. (2021): Decarbonizing the food and beverages industry: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 143(6517):110856 DOI: 10.1016/j.rser.2021.110856

8 SUMMARY

Inspection of heat storage and transportation technologies concerning industrial heat supply

Keywords: *thermal storage, decarbonization, industrial heat supply*

Different weather-dependent renewable energy producers cause a lot of imbalances and fluctuations in the electrical grid nowadays. Thus, a great amount of balancing energy is needed in the system. Renewable source energy production at industrial sites must be the most efficient, if most of the produced energy is used locally, and this aspect becomes more and more relevant because of emerging problem of capacity saturation on the electrical grid. For tackling these problems, thermal storage (TES) applications could come into sight. Storing heat could be realized through many technologies, such as using hot water or phase change material (PCM) storages. Integrating renewable energy source producers better as well as reaching the current climate targets could be achieved with the expansion of the thermal storages, so they could appear as a relevant solution in the future. Reducing the balancing energy demands could result in having larger renewable source production ratio in the electrical grid, furthermore, it can help in reaching carbon neutrality. In addition, system efficiency could be increased in industrial environments with significant heat demands and in district heating networks. Hereby, further fossil primary energy source use could be replaced, which might contribute to the economical operation of energy use. Heat transportation methods seem like an important part while inspecting thermal storage systems, mobilized thermal storages (M-TES) also appear in the last decade more and more often, so reviewing the possible application of this technology is sufficient. There is a power-to-heat (P2H) based project in progress in Dunamenti Power Plant, which includes an electric boiler and a thermal storage. The apparatus would provide balancing energy supply for the grid; besides, the stored heat would be used in the local district heating system as well as for supplying the power plant technological systems. In my work, exposition and analysis of the mentioned thermal storage play a special role. Based on the model of the displayed thermal storage, a new energy storage project will be observed, emphasizing the importance of technical and economic aspects. The energy saving potentials will be watched thoroughly in the planned industrial system, as well as the feasibility of the invention.