

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

LEVELES PÉTER
MATÁSZSZ DR. BÜKI GERGELY TÁVHŐ ÍGÉRETE
ELISMERÉS PÁLYAMUNKA
Hőtárolási és szállítási technológiák vizsgálata ipari hőellátás
szempontjából

Témavezető:

Dr. Szücs Botond
egyetemi adjunktus

TARTALOMJEGYZÉK

Jelölések jegyzéke	iii
1. Bevezetés.....	1
1.1. Célkitűzések.....	1
1.2. Hőtárolás háttérének áttekintése	2
1.2.1. Elvek és módszerek	2
2. Szakirodalmi áttekintés	4
2.1. Energiatárolás.....	4
2.2. Hőtárolás.....	6
2.2.1. Szenzibilis	7
2.2.2. Látens.....	10
2.2.3. Termokémiai.....	12
2.3. Hőszállítási módok	14
2.3.1. Csővezeték rendszeren keresztül történő hőszállítás.....	16
2.3.2. Közúti szállítás	17
2.3.3. Vasúti szállítás.....	18
3. Hőtárolási projektek.....	20
3.1. Power-to-heat technológia.....	20
3.2. Csepeli Erőműben létesült hőtároló	21
3.2.1. Ismertetés	21
3.2.1. Műszaki elemzés	22
3.2.2. Gazdaságosság	28
4. Új hőtárolási projekt műszaki és gazdasági elemzése.....	30
4.1. Ipari környezet bemutatása	30
4.2. A tervezett rendszer bemutatása	31
4.3. Hőtároló rendszer modellezése	32
4.4. Eredmények.....	36
5. Összefoglalás.....	41
5.1. Következtetések	41
5.2. Összegzés	42
6. Felhasznált források	43

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
c	fajlagos hőkapacitás (fajhő)	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
C	hőkapacitás	kJ/kg
d	hossz	m
m	tömeg	kg
$\dot{Q}$	hőáram	W
T	hőmérséklet	$^{\circ}\text{C}$
t	idő	s
U	hőátbocsátási tényező	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
V	térfogat	m^3

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
α	hőátadási tényező	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
η	hatásfok	1
λ	hővezetési tényező	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
ρ	sűrűség	kg/m^3

Rövidítések

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
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)

1. BEVEZETÉS

1.1. Célkitűzések

Napjainkban az energia megfelelő időben történő rendelkezésre állása kritikus pont, amely a jövő energetikai rendszerében mindenképpen hangsúlyos szerephez juthat. A villamosenergia- 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.

Céлом 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 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 kitüntetett 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 Csepeli Erőmű telephelyén létesült, már üzemelő hőtároló és villamos kazán projektjének bemutatása is nagy jelentőséget kap, amivel céloom a gyakorlati alkalmazhatóság és a jelenlegi innovációk vizsgálata.

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.

1.2. Hőtárolás háttérének áttekintése

A megújuló energiaforrások nagyobb mértékű felhasználása kiemelt fontosságvá 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 válaszingázások is jelentős szereppel bírnak. A REPowerEU terv (EU3, 2022) kiemeli az energiatárolás előnyeit: az energia megfelelő időben történő felhasználásának, az energiaellátás rugalmasságának, az ellátásbiztonságnak, és a megújulóenergia-termelés integrációjának az elősegítése. A direktívák alapján szükséges mind a távfűtési és -hűtési rendszerek kombinálása hőenergia-tárolással, mind a megújulóenergia forrású villamosenergia-többlet hőtárolásának, illetve az ipari célú hőtárolásának fejlesztése.

A hőtárolás témakörével azért kezdtem el foglalkozni, mivel úgy gondolom, hogy a különböző energiatárolókra a jövő energiahálózatában az időjárásfüggő termelők miatt kiemelt igény mutatkozik. Az energiatárolók közül a hőtárolók képesek lehetnek nem csak kiegészítő 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, ebben a témában a Csepeli Erőmű telephelyén lévő hőtároló bemutatása és értékelése történik meg. Ezen túlmenően egy új ipari hőtárolási projekt műszaki és gazdasági lehetőségeinek kiaknázása történik meg.

1.2.1. ELVEK ÉS MÓDSZEREK

1.2.1.1. 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 folyamatlemezési 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. A lényegi vizsgálat részletességének visszavételével a pontosság ugyan csökkenhet, az áttekinthetőség azonban növekszik.

1.2.1.2. Hőtároló modellezése

A modellezett hőtároló rendszert kutatásom során Matlab környezetben, Simulink bővítmény kiegészítésével valósítottam meg, a szimulációknál háromdimenziósból leképzett egydimenziós dinamikus modellt alkalmaztam. Simulink esetében Simscape Thermal bővítményt használtam a hőveszteség-modellek leírásához. Ezt az egyszerűbb számítások szintjén Excel program használatával egészítettem ki. A rendszerben fellépő térfogatáramok leírására Cycle-Tempo programot használtam.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Energiatárolás

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

Elektromechanikai tároló	Elektromos tároló	Hőtároló	Kémiai tároló	Elektrokémiai tároló
- Szivattyús energiatároló - Sűrített levegős tároló - Lendkerékes energiátároló - Energy Vault	- Szuperkondenzátoros energiátároló - Szupravezető mágneses energiátároló	- Sólóvadékos hőtároló - Fázisváltó anyagok tároló (hőakkumulátor) - Szenzibilis hőtároló - Alacsony hőmérsékletű (csappolyított, kriogén levegős) tárolás - Termokémiai hőtároló	- Power-to-Hydrogen (P2H) - Power-to-Hydrogen-to-Power (P2H2P) - Power-to-Ammonia	- Akkumulátoros energiátároló (Li-Ion, NaS, ólom-savas, stb.) - Redox folyadék áramú akkumulátor

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

Az energiátárolás folyamata (Gerse, 2020) három részből, a betárolásból, a tárolásból, és a kitárolásból áll. Az energiátárolási technológiák időbeli működése (Few et al., 2016) kapcsán megkülönböztetünk szezonális, napi, illetve ennél rövidebb működésű, hálózattámogató szolgáltatást nyújtó energiátárolókat. Céljukat tekintve a szezonális hőtárolóknál a kitárolás-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 energiátárolásnak 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 energiátárolás lehetővé teszi a rendszer csúcsteljesítmény igényének csökkentését, a menetrendi eltérések kiegyenlítését, valamint az időjárás megváltozásából eredő kiegyenlítőeségek kezelését is. Az időbeli működés kapcsán a különböző technológiák elkülöníthetőek az energia/teljesítmény [kWh/kW] viszonyszám alapján.

A korábbiakban ki nem emelt, bevált energiátárolási mód a földgáztárolás. A szakirodalom a jelentősen hosszabb időtartamú energiátárolás kapcsán a földgáztárolást

emeli ki, mint leggazdaságosabb opció, hiszen a már megépült rendszerek és a szezonális tárolhatóság lehetővé teszi a hosszú távú energiatervezést. A földgáztárolás valóban rendkívül előnyös és kiforrott technológia tárolási szempontból, hiszen kis veszteségek és nagy rendelkezésre állás mellett képes energiahordozót biztosítani, azonban jelentős CO₂ kibocsátás köthető hozzá. A földgáztárolási szektor elkülönült elem az energetikai rendszerben, külön ismertetésére nem kerül sor jelen dolgozatban.

Szükséges tárolási technológia...		Akkumulátorok								
... a hálózatban...	Vízszivattyú	Lítiumion-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 előállítás és ipari hőigények jelentős részt képviselnek a teljes energiafogyasztásból, ezért az energiát hő formájában tárolni a felhasználás szempontjából előnyös lehet. A Termodinamika II. főtételenek következményeképp a munka teljes egészében hővé alakítható, így az energiaátalakítás hatékonysága kedvező lehet más technológiákkal szemben, 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, villamos oldalról az elektromos kazánok akár másodperces reakcióidővel is képesek a terhelésváltoztatásra, a teljes rendszer hatásfoka 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 energiatarolási módok közül részletesen a hőtárolási megoldásokat elemzem, azon belül is különösen a meleg energia tárolására fókuszálva.

2.2. 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.

$$\eta_{\text{tároló}} = \frac{E_{\text{kitárolt}}}{E_{\text{betárolt}}} \quad (1)$$

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.

Hőtárolási technológiák		
Szenzibilis	Fázisváltó anyag	Termokémiai
- Melegvízes hőtároló (WTES) - Különálló tartályos kialakítás - Sóolvadékos/fémolvadékos hőtároló - Homokakkumulátor - Naptó - Közettárolók	- Jeges hőtároló - Gőztároló - PCM hőtároló (szerves, szervetlen, eutektikum)	- Reverzibilis kémiai tárolás - Adszorpció - Abszorpció

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 anyag hőtárolók és a szilárd anyag szenzibilis hőtárolók demonstrációs, vagy prototípus fázisban járnak, a termokémiai technológiák közül pedig számos még csak kutatás szintjén létezik. Területek szerinti megoszlást tekintve (IRENA, 2020) a hőtárolók használata a távfűtési rendszerek és a háztartások esetében jelentős, az iparban pedig

jelenleg kifejezetten alacsony, a melegvizes 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.

2.2.1. SZENZIBILIS

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:

$$Q_{\text{tárolt}} = \rho \cdot V \cdot \int_{T_{\text{alsó}}}^{T_{\text{felső}}} c_{\text{szenz}}(T) dT \quad (2)$$

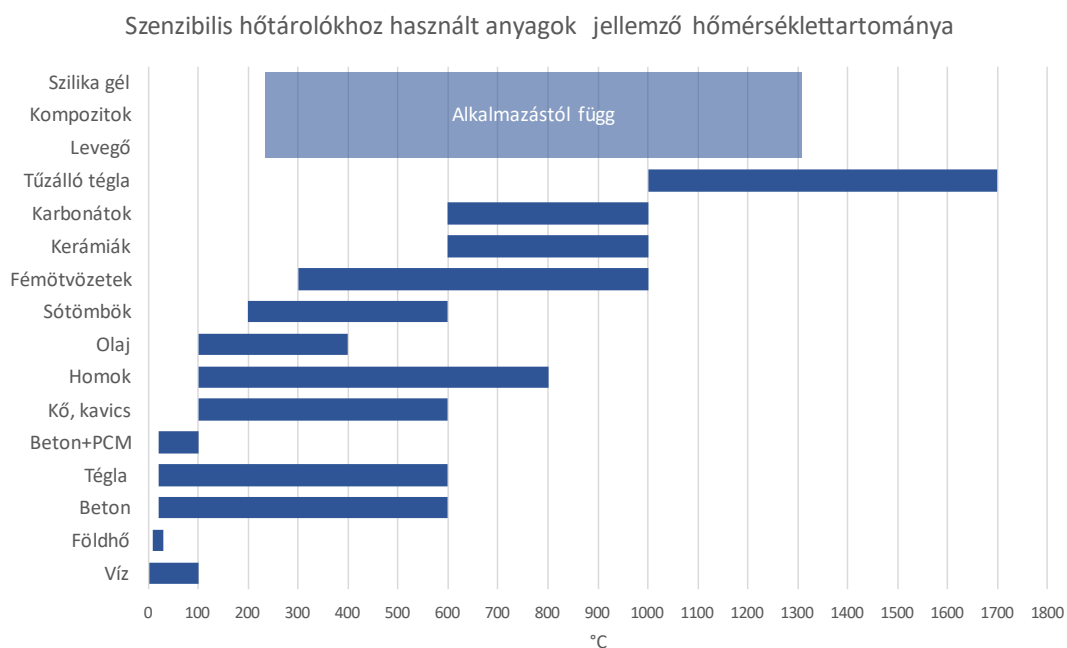
ahol $c_{\text{szenz}}(T)$ az anyag fajlagos hőkapacitása, zárt rendszerben pedig a közeg tömege ($\rho \cdot V$) konstans. Ha a fajlagos hőkapacitást állandónak tekintjük, akkor kijelenthető, hogy a tárolt hő arányos a hőmérsékletváltozással és a fajhővel, így egyszerű módon számolható. Ez számos esetben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

A legelterjedtebb szenzibilis technológia a melegvizes tárolós alkalmazás (TTES – tank thermal energy storage), ez egyben a legegyszerűbb és legolcsóbb megoldások közé tartozik. A beruházási költség általában a víz bekerülési költsége miatt kedvező, annak ismert hőtani tulajdonságai miatt pedig pontos viselkedést és működést tudunk kivitelezni. (Andrássy, 2021) Az előnyök közé tartozik továbbá, hogy nem kell a fázisváltás problémaival, aláhúléssal, 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 az alapozás megfelelő terhelhetőségére is tekintettel kell lenni.

Az utóbbi időben egyre több kutatás középpontjába került a szilárd anyagos hőtárolás is. *Teng et al. (2019)* elemezte egy lehetséges szilárd anyagos hőtároló összekapcsolását egy kombinált ciklusú erőműegységgel, valamint szélenergia 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 csúcsidőszakokban 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 vizsgálhatóak, 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 anyagos magas hőmérsékletű hőtárolásnál előnyös. A 4. 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 levegőbefúvás megfelelő elosztása a hőtároló anyag optimális felfűtése és lehűtése érdekében.



4. ábra. Szenzibilis hőtárolók anyagainak hőmérséklettartománya – saját szerk. (Seyitini et al., 2023) alapján

A szenzibilis hőtárolás emellett 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)

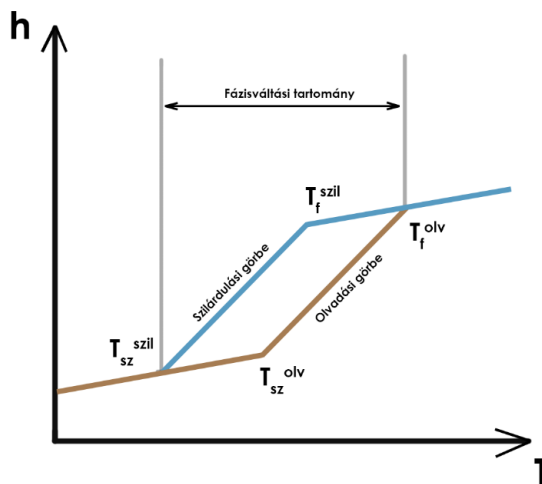
Energiatermelés kapcsán jellemző szenzibilis technológia a sóolvadékos hőtárolás, amelyet leginkább naphőerőművek beépített elemeként használnak az energia-termelési szektorban. (IRENA, 2020) A koncentrált naphőerőművek által termelt hő betárolásra kerül a sóolvadékos tárolóba, amely annak akár többnapos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

2.2.2. LÁTENS

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 fázisváltozási 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.



5. 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.

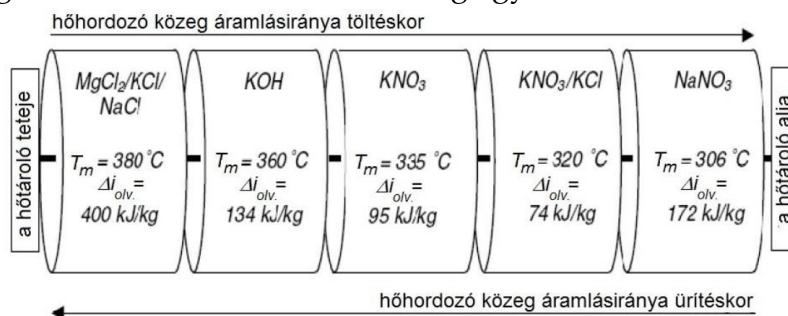
Kivitelként léteznek táblás, mikrokapszulás, ömlesztett és szőnyegszerű kialakításban megjelenő fázisváltó rendszerek. Táblás és szőnyegszerű kialakítással főként az épületgépészeti rendszerekben találkozhatunk, ömlesztett adagolás pedig a bordás-csöves hőcserélőkben való alkalmazás során tapasztalható. 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 aláhűlés 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 hó 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.



6. ábra. Kaszkád PCM rendszer – (Borbély, 2014)

2.2.3. TERMOKÉMIAI

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) Kitároláskor 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)			
- Zeolit rendszerek - Amin-víz reakciók		- Sóhidrátozott rendszerek	
- Szilárd-oxidok - Fémhidrátos - Karbonátos		- Ammónia-víz - Szerves vegyület (pl.: dikarbonsav) - Kén-alapú	

7. 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 nap-erőművi 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 8. 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
 Relatív méret	Nagyobb	Kisebb	Kisebb
 Előnyök	- Olcsó - Egyszerű, stabil - Alacsony működési költségek	- Alacsony hőm. hőforrások - Nagy energiasűrűség - Izotermikus alkalmazás	- Nagyon magas energiasűrűség - Kis hőveszteség - Kompakt tároló
 Hátrányok	- Nagy hőmérséklettartomány - Alacsony energiasűrűség - Szigetelés	- Anyagproblémák - Komplexebb - Drága	- Komplex felépítés - Drága - Kis stabilitás - Alacsony ciklusszám
 Fejlettség	TTES, sóolvadákos kipróbált technológia	Közepes	Alacsony

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

2.3. Hőszállítási módok

Energetikai viszonylatban az energiatároló fogalma gyakran egy egész energiatároló rendszert (Gerse, 2020) jelent, hiszen a konkrét berendezésen túl be- és kítároló 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 széndioxid 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 berendezéseire, 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 tértépen 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 hőszállítás szerepel opcióként, a vízi hőszállítás 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 rejt 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 csúcsgény 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.

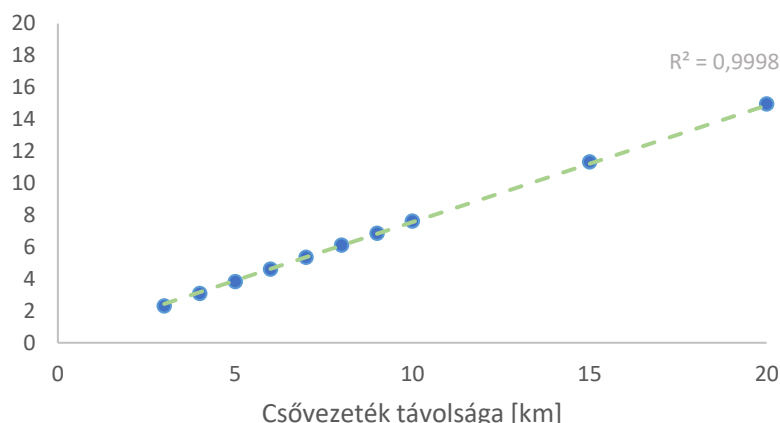
Kiegészítő hőtermelőként nem feltétel a széleskörű rendelkezésre állás, így a kisütés és a feltöltés helye rugalmasabban alakítható, mint az első esetben. A harmadik működési jelleg a vészhelyzeti hőellátás. Ennek lényege, hogy az extrém hőigényekkel, energiaárakkal járó időszakokban, valamint sérült 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.

2.3.1. 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 25 MW névleges teljesítményű hőcserélőn keresztül csatlakozik a hőellátó rendszerhez. Paraméterként szerepel a vezetékrendszer hossza, így tekintettem a csőveken keresztül fellépő transzmissziós hőveszteséget (*Wang, 2023*), a beruházás és kivitelezés költségeit, valamint a működési határokat. A vezetékrendszerben (például DN400-esnél kisebb csőméret esetén is) 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 242 millió Ft körüli beruházási költség és 0,171 €/kWh-s többletenergia-költség adódott. Ez utóbbi jó indikátor lehet a szállítás költségének indikálására a teljes energiaköltségen felül. A számításaim során elhanyagoltam a hőmérséklet jelentős megváltozását, ez *Chiu (2016)* tanulmánya alapján csak nagyobb (20 km feletti) vezetékmereteknél 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 (500-1000 €/m) a beruházási költségek alacsonyabbnak adódtak. Hőveszteségek kapcsán az említett tartományban (3-20 km) ütemes lineáris növekedés tapasztalható. Ezt *Wang* szélesebb tartományban vizsgálta a hőmérséklet-csökkenés megléte mellett, azonban a trend jelentősen nem tér el ettől, a nagyobb távolságokhoz jelentős hőveszteségek társulnak.

Hővesztések a csővezetéken [%]



9. ábra. Hővesztések távolságfüggése egyszerűsített számolás esetén – saját szerk.

A számítások alapján az állítható, hogy nagyobb rendszer és távolságok esetén a fajlagos többletenergia költség csökken, viszont a távolság növekedésével jelentősen megnő a hővesztés mértéke. Ez azt jelenti, hogy bizonyos mértékig érdemes a csővezetékrendszert kiterjeszteni, azonban a hőforrástól való jelentős távolság gazdaságtalanná tudja tenni a rendszert. Közeleli (<1 km) csővezetékes szállítás az egyszerűbb kivitelezés és működtetés esetén gazdaságosnak tekinthető. A csővezetékes szállítás nagyon tökeigényes, de jó elérhetőség esetén gazdaságosan üzemeltethető.

2.3.2. KÖZÚTI SZÁLLÍTÁS

A közúti szállítás kapcsán a kompakt hőtárolók teherautóval való szállítását elemeztem, számításaimban egy átlagos 2015-ös európai 12 tonnás 4x2 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

1. táblázat. 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 hulladék hő hasznosítás, és a TCM tárolók szállítása növelheti a közúti szállítás versenyképességét.

2.3.3. VASÚTI SZÁLLÍTÁS

Vasúti alkalmazás kapcsán a M-TES modulok zárt kocsikban való szállítása és átrakodása 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 szerelvénynél. 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 sínparók 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.

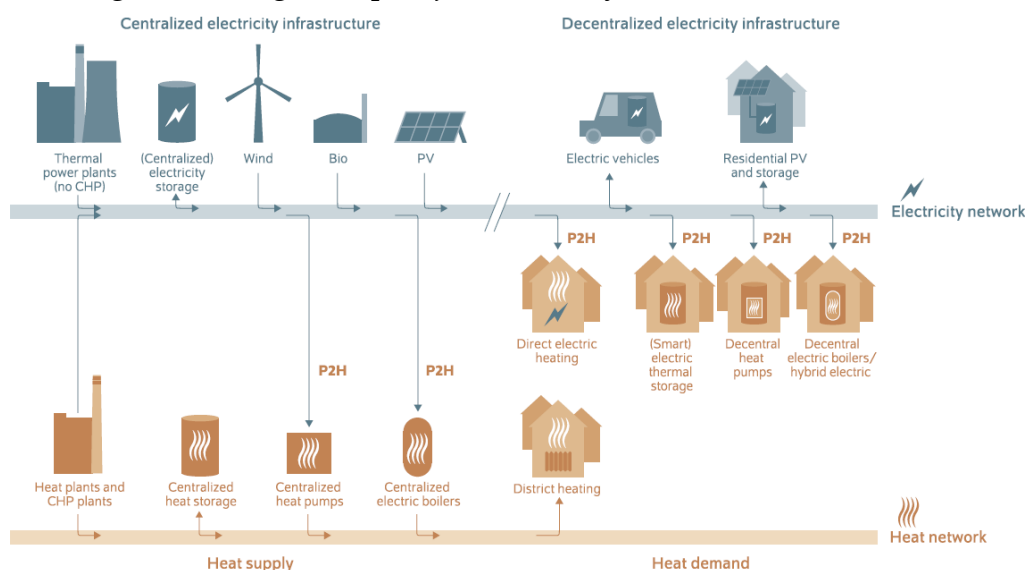
30 km), de hulladékhő vagy megújulóenergia rendelkezésre állása esetén és meglévő vasút közelségében lévő jelentős hőigények mellett elképzelhető a gazdaságos hőszállítás vasúton.

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. Jelenleg a közúti és vasúti szállítás-hoz kapcsolódó szállítási költségek és a tárolók kis energiasűrűsége nem teszi gazdaságossá a hőszállítás ezen formáit, azonban vészhelyzeti hőellátás biztosítására, valamint nagyon távoli elérés esetén lehet relevanciájuk a csővezetékes szállítás mellett.

3. HŐTÁROLÁSI PROJEKTEK

3.1. Power-to-heat technológia

A villamosenergia-rendszer stabilitása szempontjából elengedhetetlen a flexibilis rendszerelemek 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.



10. 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 esz-

közök. 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 kiterjeszthető szélesebb skálára.

3.2. Csepeli Erőműben létesült hőtároló

3.2.1. ISMERTETÉS

A bemutatásra kerülő ipari hőtároló a csepeli kombinált ciklusú erőmű területén létesített, villamos kazánnal 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.

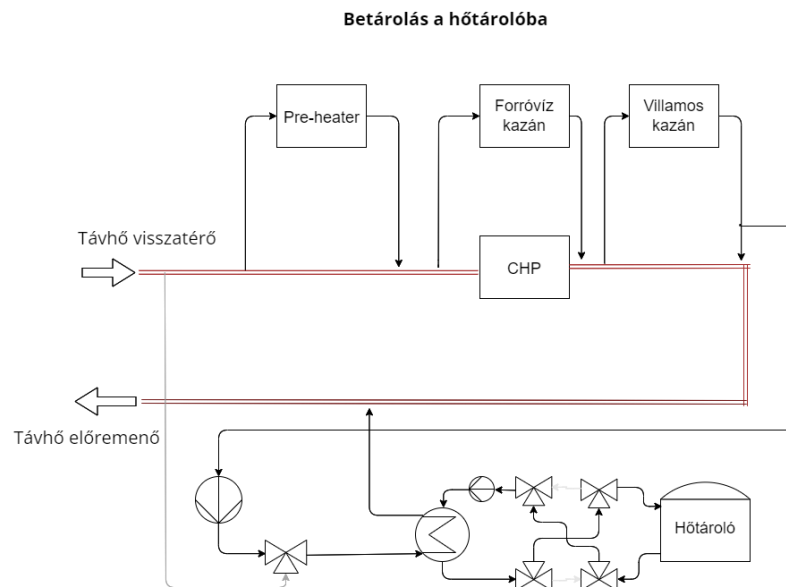
Érdemes megemlíteni, hogy a Dunamenti Erőműben jelenleg kivitelezés alatt áll egy, a csepelihez igen hasonló hőtárolási projekt. Így a TTES és P2H technológiák magyarországi gyakorlati alkalmazásaira van még ezen túlmenően potenciál, pár éves működés után a közeljövőben a két projekt összevetése szükségszerű lehet.



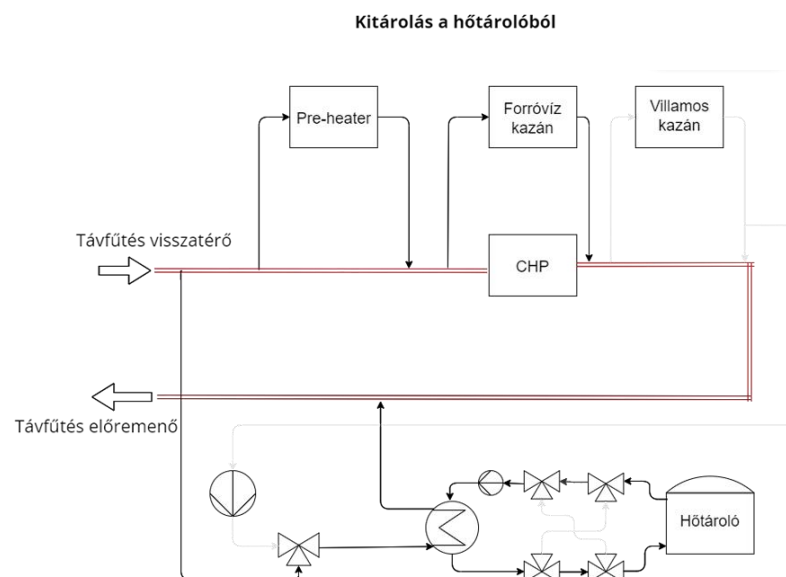
11. ábra. Bemutatott hőtároló látképe

3.2.1. MŰSZAKI ELEMZÉS

A tároló duplafalú, duplafenekű acéltartály. A két fal között 1 m széles felfogó térrel. A belső falra és a tartálytetőre 200 mm kőzetgyapot hőszigetelés került. A tároló fenéklemezére is készült hőszigetelés, mert a tartály aszfalt ágyazaton áll, és a tároló teljes feltöltése esetén a 80-90 °C hőmérsékletű víz hatására felmerülhet az aszfalt ágyazat stabilitásvesztésének kockázata. A korrózió elleni védekezés miatt a tartály sótanlanvíz töltetébe illékony korróziógátló vegyszer került adagolásra. A vegyszer a nyitott rendszerű tartályba bejutó levegő O_2 tartalma miatti korrózió ellen is védi a tartály acélszerkezeteit. A tartály atmoszférikus nyomáson üzemel, amely ár és biztonság szempontjából kedvező, hiszen nyomástartás során sokkal jelentősebb falvastagság és biztonsági kritériumok lennének szükségesek, 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 energia 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 kapacitása biztonsági szempontból nagyobb, mint a tartályt ellátó vezetékeké, ezáltal a tartály túltöltése és a hőtágulásból adódó túltöltés is elkerülhetővé vált. A rendszerbe beszerelt keringtetőszivattyú kialakítása olyan, hogy ellenálljon a kitároláskor az akár 95°C-os víz áramlásának.



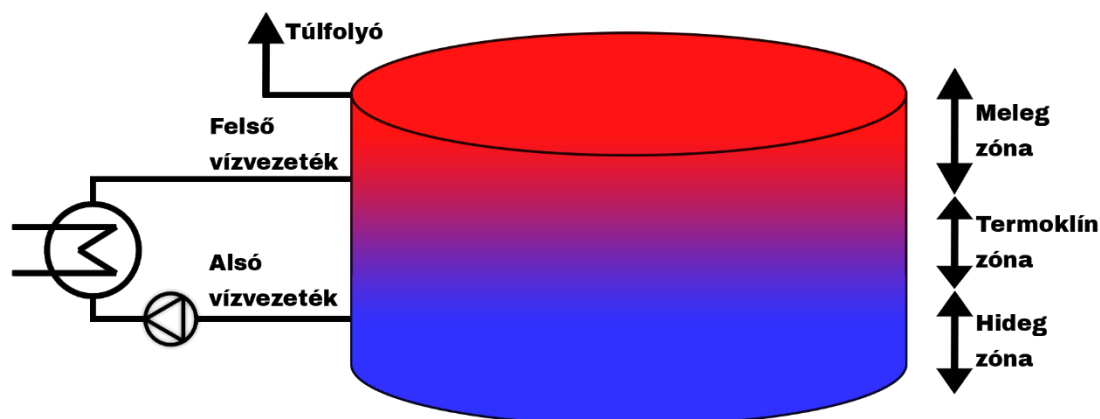
12. ábra. Hőtárolóba töltése az erőmű sematikus távhőellátó rendszerábrázolásával – saját szerk.



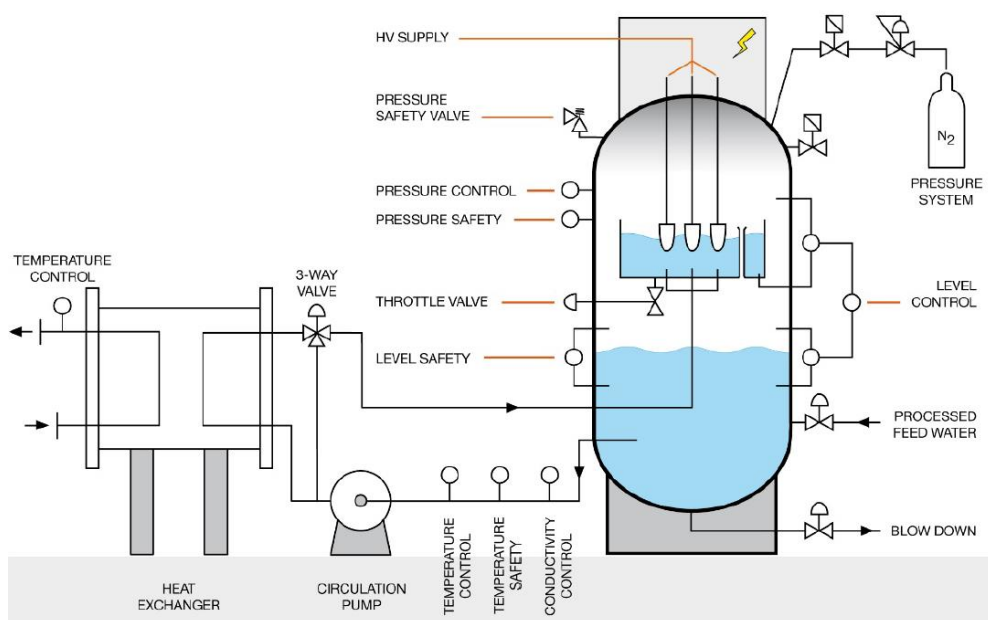
13. ábra. Hőtároló kisütése az erőmű sematikus távhőellátó rendszerábrázolásával – saját szerk.

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



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

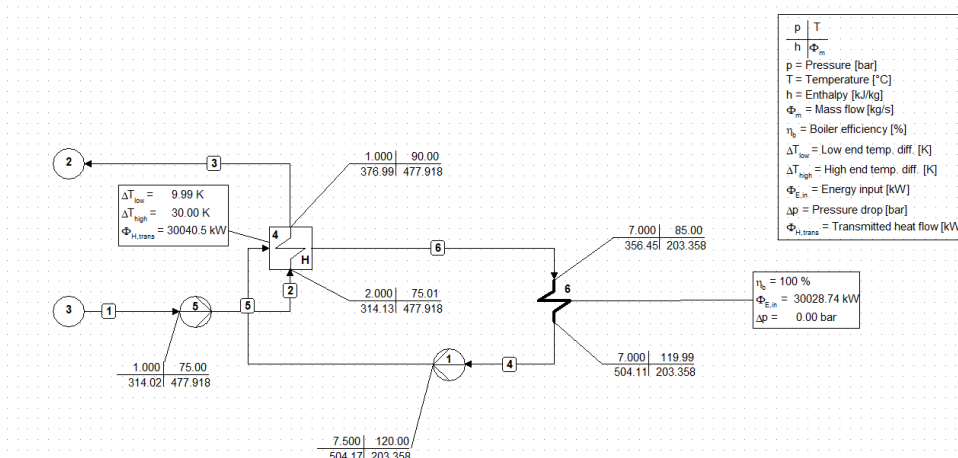


15. ábra. VK rendszerének sematikus felépítése - (FCT, 2019)

A hőtároló 25 MW teljesítménnyel képes be, illetve kitárolni, a maximum névleges kapacitás 300 MWh. A tárolt víz 95 °C-ig tárolható, efelett a hőmérsékletkorlát védelmek megszüntetik a töltést. A hőtároló rendszere egy hőcserélőn keresztül kapcsolódik a fűtött rendszerre, a körben pedig található egy váltószelepes áramlásfordító, amely az áramlás irányát hivatott megfordítani ki- és betárolásnál 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 előmele-

gítói 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.



16. ábra. Hőtároló rendszer modellje Cycle-Tempo programban

A hőtároló kivitelezését megelőzően egy 30 MW-os (később 35 MW-ra bővített) villamos kazán is telepítésre került az erőműben azzal a céllal, hogy a le irányú szabályozási piacon részt tudjon venni az erőmű egy újabb rugalmasságot növelő beruházás által. A VK 3 fázisú betáplálást kap, fázisonként egy-egy elektróda helyezkedik el a VK felső részén. Az elektródák egy kisebb belső tartályba lógnak bele, amelyet a nagyobb külső tartály vesz körül. A kazán vízszintszabályozással működik, amelynek lényege, hogy az elektródák által leadott teljesítmény a belső víztartályban mért vízszint függvénye. A vízszint növelésével a bemerülő elektródahossz növekedik, így a leadott hőteljesítmény is. A kazán 9 bar-on üzemel, a kilépő vizet 150 °C-ra képes felfűteni. A potenciálisan képződő hidrogén elleni védelem miatt szakaszos gázlefűtő rendszer is működik a kazánban. Az ipari rendszerekben elterjedtebbek a 14 bar alatt üzemelő villamos kazánok, mivel efölött már szerkezeti szempontból költségebb lenne a beruházás.



17. ábra. Villamos kazán (VK) az erőműben

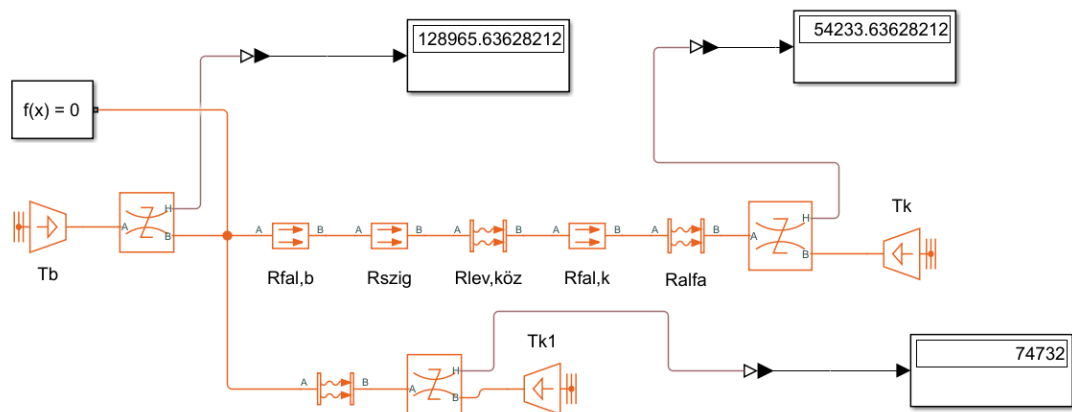
Az újonnan kivitelezett rendszerben a villamos kazán képes a rendszerirányító számára negatív aFRR kiegyenlítő energiát is szolgáltatni, emellett pedig a betárolt hő a megtermelés után később felhasználható a város távhőellátására. A kiegyenlítő energiapiacra való részvétel feltétele, hogy minden időpillanatban rendelkezésre álljon a lekötött kapacitás. Ez úgy került megvalósításra, hogyha a város hőigénye 35 MW alatti, akkor a tároló teljesen feltölthető, hiszen van kitárolható hőigény, ellenkező esetben a tároló részleges töltése történhet meg. A hőtároló töltése 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. Kitárolás kapcsán az erőmű készenléti üzeme alatt tud a távhőhálózatra rátermelni, így részben vagy egészben kiváltva a gázkazánokat, ezáltal csökkentve a rendszer CO₂ emisszióját.



18. 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 méretezési állapotban a távfűtési visszatérő hőmérsékletet 63°C-nak adódik. Ez nagyjából megfelel a tapasztalati értékeknek is, mivel az általában 55-75 °C között alakul.

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. Megjegyzendő azonban, hogy ebben az esetben a keringtetendő vízmennyiség is megnőne, hiszen azonos energiát kisebb hőfokon kell eljuttatni.



19. ábra. A hőtároló hővesztesség modellje Simulinkben

A hőtárolók hatásfokának meghatározásakor, valamint értékelésekor lényeges szempont a veszteségek mértékének figyelembevétele. A TTES tárolók esetén a hővesztések minimalizálásához szükséges hőszigetelés beépítése, hiszen anélkül mind a tárolt energiamennyiség, mind a felhasználható hőfok csökkenne. Az ismertetett tárolóhoz készítettem egy hővesztesség 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 szigetelt tetőn át történő hővesztességgel. A belső izotermikusnak tekintett melegvíz hőtároló tömeg hőtranszportjára a környezet felé 128,97 kW érték adódott, amely a modell szerint a tárolónál heti szinten 21,66 MWh hővesztességgel 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 W/m²K-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 hőveszteségekhez; 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.

Műszaki adatok - Csepeli hőtároló

VK

Villamos kazán teljesítménye	35 MW
Feszültség szintje	10 kV
Hatásfoka	95 %

Távhőrendszer

Nyomásszint	25 bar
Nyári átlagos térfogatáram	800 m ³ /h
Téli átlagos térfogatáram	2000 m ³ /h

Hőtároló

Hőtároló kapacitása	300 MWh
Leadható teljesítmény	30 MW
Hőtároló térfogata	8000 m ³
Energiaintenzitás	37,8 kWh/t
Tárolási időállandó	10 MWh/MW
Hőtároló átmérője	20 m
Hőtároló vízszintje	25,5 m
Hőtároló magassága	30 m
Max. hőfok	95 °C
Max. szintemelkedés (40-90°C)	709,6 mm

20. ábra. A Csepeli Erőműben üzemelő hőtároló műszaki adatai

3.2.2. 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 a kombinált ciklus működése

esetén annak hulladékhője betárolható, amikor pedig áll, akkor gázfogyasztást tud kiváltani. 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 rövid időn 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 későbbiekben az új hőtároló projekt elemzéséhez ezen megvalósult projekttel kapcsolatos számítások lettek alapul véve.

A projekt kapcsán nagy előnynek mondható, hogy egyszerre erőművi hulladékhő 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.

4. ÚJ HŐTÁROLÁSI PROJEKT MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGI ELEMZÉSE

4.1. 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. Hőmérséklet-tartományt 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.

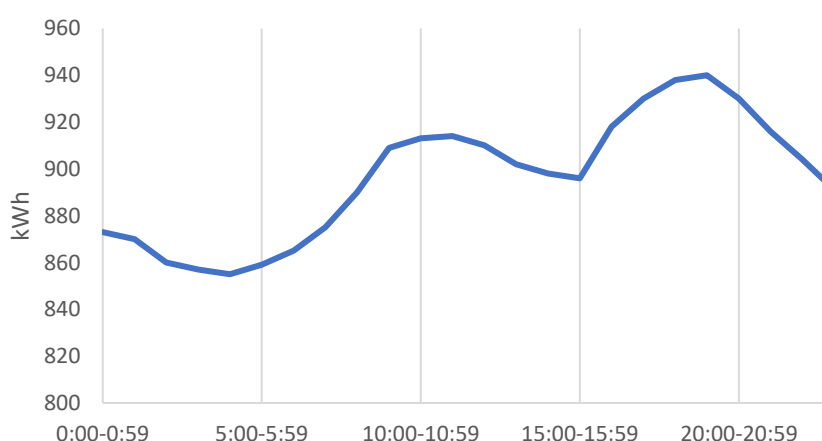
Egy megvalósuló beruházás keretében egy 8,8 MW-os naperőmű telepítése történik meg a helyszínen a telephely megújuló energiával való ellátása okán. A telephely flexibilis energiaellátása miatt egy villamos kazán és egy TTES rendszerű hőtároló létesítése is megtörténik. A hőtároló hőellátását az elektromos elektródás kazán látja el, a hőtároló atmoszférikus, hőretegződéses 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.

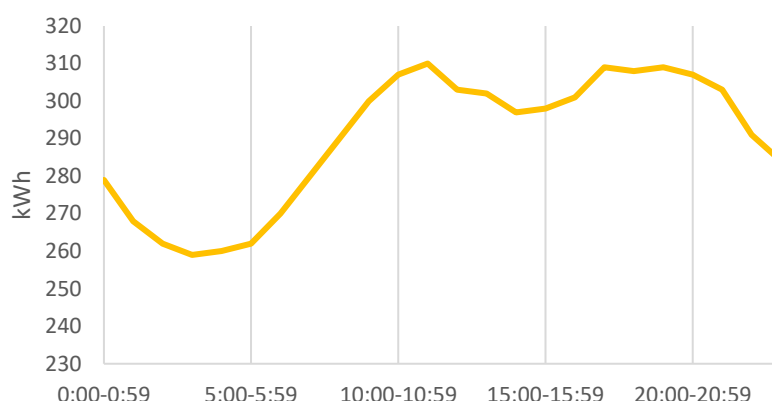
Az elemzés során elsősorban a helyi megújuló energia hasznosítást helyezem előtérbe, emellett viszont a negatív aFRR szabályozásban képes lehet részt venni a hőtároló rendszer, mivel kisütési ideje a kritériumnak tekinthető 2 óra felett van.

4.2. 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. Másodszorban 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 hulladékhő nem áll rendelkezésre a telephelyen, mivel az alacsony hőmérsékletű hőfelhasználás ezt nem teszi lehetővé. A naperőművi termeléshez kapcsolódó adatokat a PVGIS adatbázisából származnak. A villamos energia, valamint a hőfogyasztást jellemző kétműszakos napi lefutás alapján generáltam, a HMV és a fűtés hőigényét szintén 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.

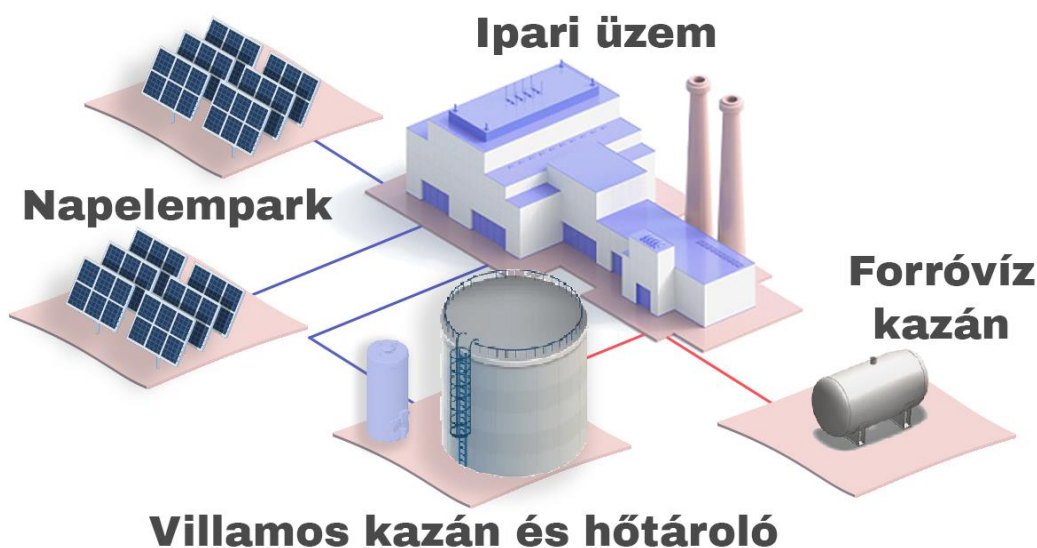


21. ábra. Téli fűtési és HMV hőigény napi karakterisztika



22. ábra. Nyári HMV hőigény napi karakterisztika

A rendszerben fontos részt képviselnek a különböző védelmek, amelyek leállítják a rendszer keringtetését hibajelzés esetén, ide tartozik a hőmérséklet relé, a nyomáshatároló, lefúvató 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.



23. ábra. Az új hőtárolási projekt egyszerűsített látványterve

4.3. 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 rendszerről beszélünk. Kitárolásnál 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

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \dot{Q} + \alpha \cdot (T_k - T) \quad (3)$$

általános érvényű mérlegegyenlet felhasználható a leírás során:

$$\dot{Q}_{hővez} = \frac{A \cdot \lambda}{d} \cdot \Delta T [W] \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{hőáramlás} = c \cdot \dot{m} \cdot \Delta T [W] \quad (5)$$

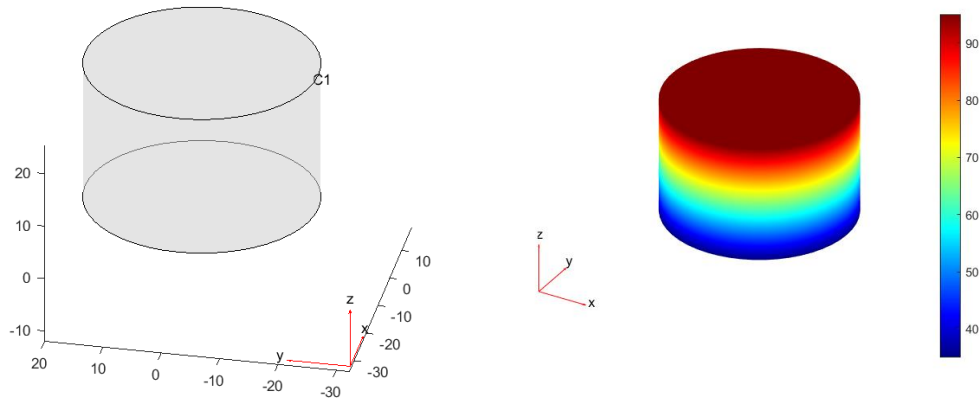
$$\dot{Q}_{hőveszt,transzmissziós} = U \cdot A \cdot (T - T_k) \quad (6)$$

A hőtároló ciklusaival kapcsolatban a következő megállapítások tehetők:

$$E_{be} = E_{TES} + E_{veszt} \quad (7)$$

$$E_{ki} = E_{TES} - E_{veszt} \quad (8)$$

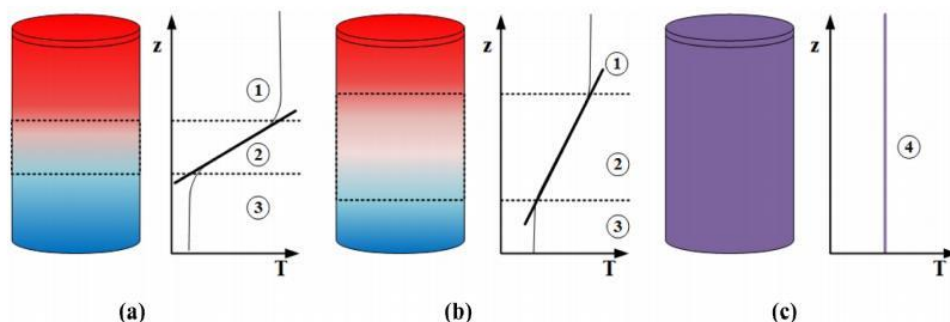
Betárolásnál tehát a villamos kazánban megtermelt hő egy része veszteségként jelenik meg, kitárolásnál pedig hasonló módon csökken a kitárolható mennyiség a tárolóban lévő kapacitáshoz képest.



24. 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.

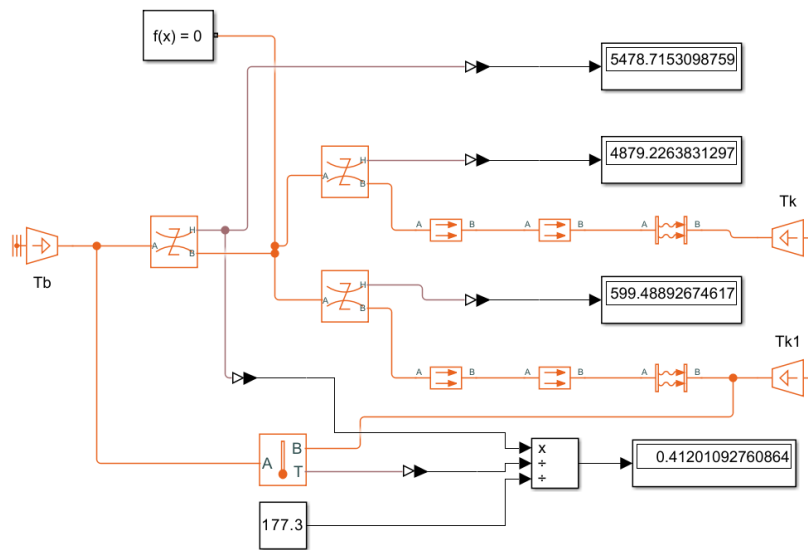


25. ábra. TTES hőtároló hőmérséklet eloszlása – (Dahas, 2019)

(1) meleg zóna, (2) termoklín zóna, (3) hideg zóna, (4) izoterm hőmérsékleteloszlás

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 sűrűségváltozából fakadó szintváltozást, a sűrűség és a fajhő hőmérsékletfüggését nem vettem figyelembe, 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.

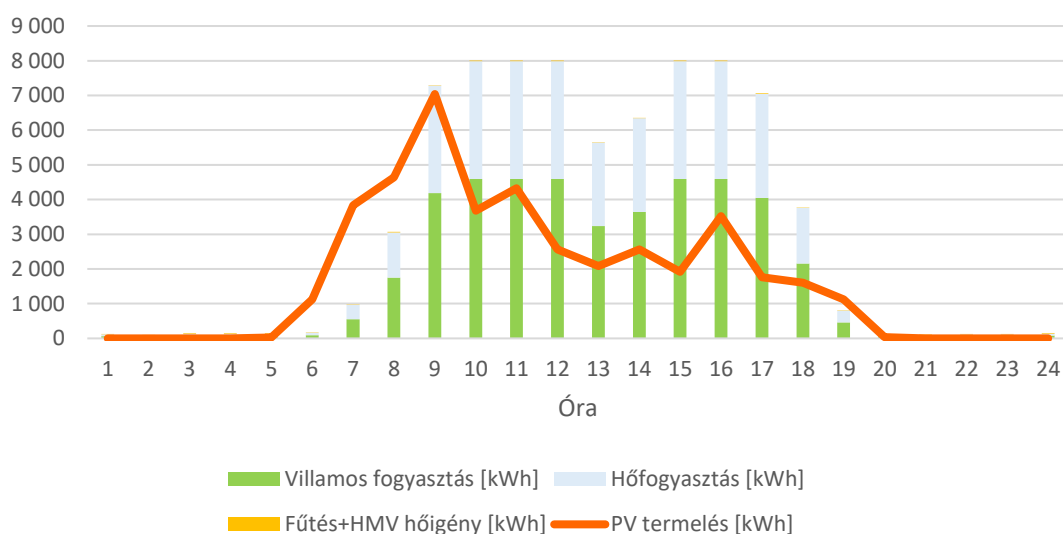


26. ábra. A tervezett hőtároló hőveszteség modellje

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 órák 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. Definíálhatunk 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 ehhez hozzáadódnak a transzmissziós veszteségek is.

Az adatokat egyenlő sorszámú oszlopokból olvastam be, így megjelent a fűtés és HMV igény, a technológiai hő- és villamosenergia fogyasztás és a termelt napenergia is; ezek megoszlása a 27. ábrán látható. A napenergia kapcsán látható, hogy a reggeli órák nagyobb arányú termelése után valószínűleg felhősebben alakult az időjárás, amely a nap közepén kisebb villamosenergia-termelési adatokat eredményezett.



27. ábra. Választott nap energiafelhasználásának megoszlása az üzemben

4.4. Eredmények

A szimuláció során kapott eredmények a 27. ábrán láthatóak, egy őszi 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.



28. 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 érne 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 eltéréseiből 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 27. 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 gazdaságossági szempontból a tárolót kis szinten túlméretezni.



29. 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 tekinthetők.

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 magas hőmérsékletű hőtárolás viszont nem hatékony.

Hőtároló

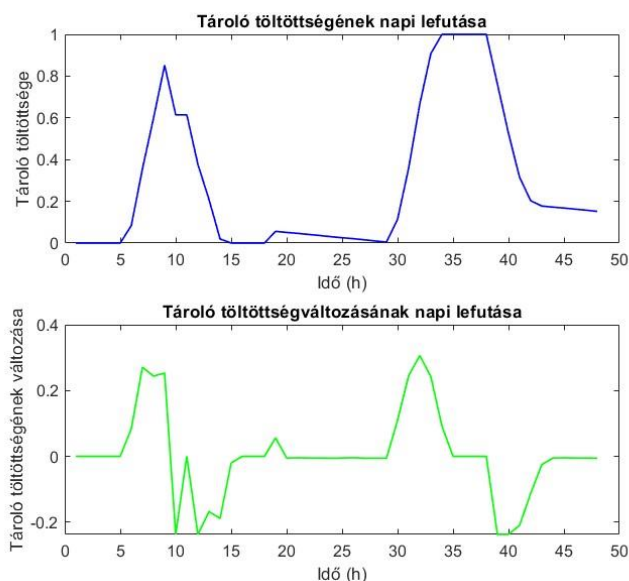
Térfogat	200 m ³
Átmérő	5,1 m
Magasság	9,8 m
Kapacitás	14,8 MWh
Tervezett kisütési idő	2,2 h
Max. kisütési teljesítmény	6,7 MW

Villamos kazán

Teljesítmény	5,8 MW
Feszültség szint	4,16 kV
Hatásfok	99 %

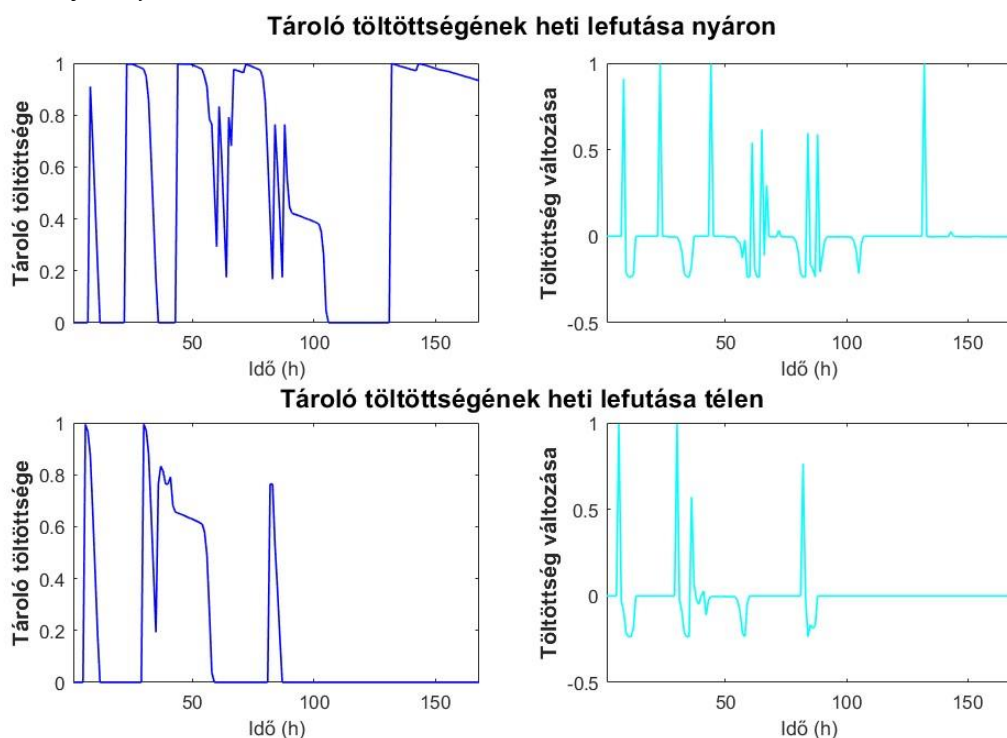
30. ábra. Tervezett hőtároló rendszer műszaki paraméterei

A modell használata során nem kizárólag napi, hanem kétnapi és heti lefutásokat is vizsgáltam. A kétnapi töltöttség-lefutás a 31. ábrán látható. Ez alapján érzékelhető, hogy a naperőművi termelés függvényében jelentős igénybevétel változást okoz az eltérő villamosenergia-termelés, így a hőtároló és a teljes rendszer méretezésénél érdemes lehet egy átlagos nyári napot figyelembe venni. Ez azt is jelentené, hogy a teljes megújulóenergia-termelés eltárolása érdekében általában a maximális töltöttségi szint alatt maradna a tároló, és csak ritkán érné el a teljesen feltöltött állapotot. Ez a gyakorlatban akár kisebb hőfokot jelenthet, amely nem kifejezetten előnyös. Így akár az is megvizsgálható üzemelésnél, hogy a hőtároló csak bizonyos átlagos nyári többletenergia termelést tudna betárolni, és bizonyos napokon a naperőművi termelés leszabályozása lenne szükséges.



31. ábra. Kétnapi töltöttség lefutás

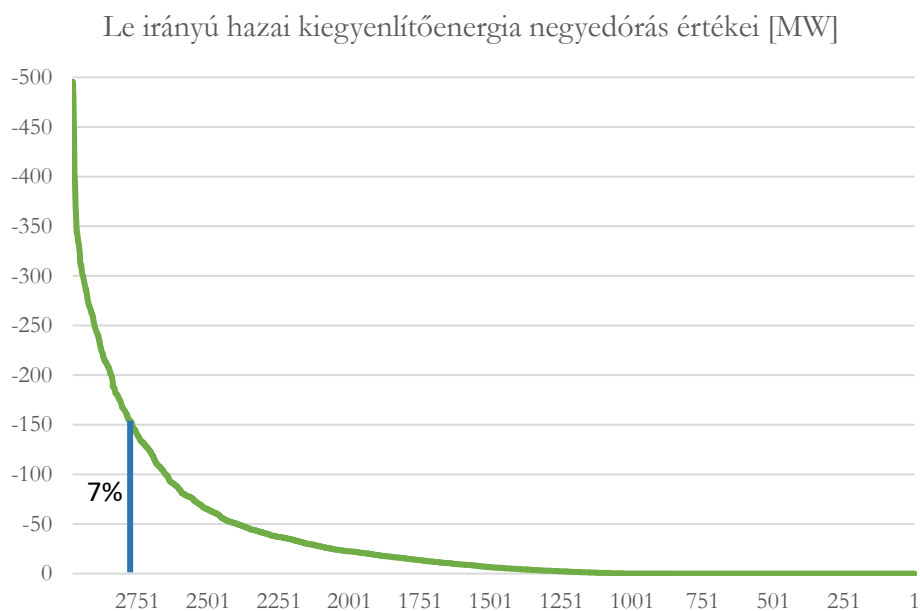
A heti lefutásokat két jellemző, egy téli és egy nyári hétre vonatkozóan tekintetem, a töltöttség lefutások a 32. ábrán jelennek meg. A modellben változás a korábbiakhoz képest, hogy heti lefutások esetén figyelembe lett véve a hőtároló távszabályozása a rendszerirányító által. Az aFRR szabályozás meglétével a naperőművi többletenergia hatása kevésbé jelentős, a kiegyenlítő energia igénybevétele dominál. Valós piaci környezetben a kiegyenlítő energia biztosítására a rendszerirányító „merit order” szerint veszi figyelembe az egyes termelőket, így a szabályozás bekapcsolásának gyakoriságában nagy szerepe van a fajlagos termelési költségeknek. Jelen esetben azonban nem költségek, hanem rendszerszintű igénybevételek alapján vettem figyelembe a bekapcsolási időszakokat. A negatív aFRR tartalékok igénybevételének tartamdiagramja a 33. ábrán látható. A VK a drágábban termelő negatív aFRR tartalékok közé tartozik, így modellem szerint legalább 150 MW negatív aFRR igény esetén a távszabályozás bekapcsol a teljes lekötött kapacitásra vonatkozóan, a valóságban ez természetesen a rendszerirányítótól érkező utasított eltérés jelének függvényében történik. A tartalék igénybevétele az ábra alapján 7%, amely a vizsgált napokon is némileg hasonló. Látható tehát, hogy a hőtároló működése szempontjából tehát a kiegyenlítő energia díja és a rendszerviszonyok egyaránt meghatározóak, azokat a hőtároló rendszer szabályozójának kezelnie kell.



32. ábra. TTES heti lefutásának vizsgálata

További változás a modellben a korábbiakhoz képest, hogy a jellemző nyári hét vizsgálata során a hűtés energiaigénye is figyelembe lett véve. A tervezett hűtést egy 4,6 SEER értékkel rendelkező korszerű folyadékűtő biztosítaná, amelynek fogyasztása a teljes villamosenergia-fogyasztásba lett belefoglalva.

A heti lefutásokat elemezve érzékelhető, hogy napon belül alacsony a veszteségek hatása, ez szigetelés hiányában várhatóan némileg jelentősebb lehetne. Megfigyelhető továbbá az is, hogy a kitárolás kicsit lassabb folyamat a betárolásnál, a hőtehetlenségek részletesebb bevonásával a megjelentnél kevésbé meredek lefutás előfordulhat.



33. ábra. 2023. októberi negatív aFRR igénybevétel tartamdiagramja Magyarország tekintetében

5. ÖSSZEFOGLALÁS

5.1. Következtetések

Összességében elmondható, hogy a hőtárolási technológiáknak jelentős szerepe van a megújuló energiatermelés integrációja, a dekarbonizáció és a gazdaságos rendszerszabályozás előrehaladásában. Ipari viszonylatban inkább a szilárdtöltetes tárolók elemzése a gyakori, de alacsonyabb hőfokú kiegészítő hőforrásként megfelelő méretezés esetén használhatóak lehetnek a melegvizes tárolók.

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 hulladékhő hasznosítás kiemelt vizsgálata szükséges lehet, mivel globálisan jelentős potenciál rejlik a hőtároló rendszerrel való összekapcsolás terén is. Továbbá az ismertetett rendszer kombinálása napkollektorokkal is megvalósulhat, amely további kibocsátáscsökkentéssel járhat. 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 vehetőek 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 célom a pénzügyi optimalás kérdéskörének további részletesebb vizsgálata, valamint szélesebb időtáv áttekintése, ennek kapcsán akár több tipikus napi szcenárió összehasonlításával egy éves áttekintés elkészítése. Emellett a modellbe hulladékhő hasznosítás és napkollektoros rendszer használatának beépítése is célom, amely által a diverzebb forrásoldal és a különböző opciók összehasonlíthatósága emelhető ki.

5.2. Összegzés

Az új hőtárolási projekt tervezése kapcsán megállapítható, hogy nagyobb ipari telephelyen működőképes lehet naperóművi villamosenergia-termelés, kiegyenlítő energiát szolgáltató villamos kazán és ipari TTES hőtároló összekapcsolása megfelelő mértékű belső hőigény esetén. Fontos kiemelni, hogy gazdaságossági szempontból drágább hőt előállítani villamos kazánnal, mint korszerű gázkazánok segítségével, azonban a telephelyen termelt megújuló energia rugalmasabb felhasználása, valamint a villamosenergia-hálózat számára biztosított kiegyenlítő energia miatt már gazdaságosan üzemeltethető a rendszer, továbbá egy minimális rendszerméret is szükséges annak megfelelő működéséhez. A hőtárolónak biztosítani kell kapacitást a megújulóenergia-termelés és a kiegyenlítő energia eltárolására is, így a tervezés során lényeges a naperómű elfogadható méretezése mellett szabad kapacitás fenntartása a hőtárolónál, annak túlméretezése szükséges lehet a gazdaságos kihasználáshoz. Pontos tervezés esetén a hőtároló rendszer képes a fel nem használt naperóművi termelés betárolására, emellett a rendszerszabályozásban is részt tud venni. A bemutatott modell alapján számítani kell a hektikusan megjelenő betárolási igényekre, amely megfelelő szabályozással kezelhető. A betárolt energia felhasználható a telephelyen az épületek és az alacsonyabb hőfokon üzemelő technológia ellátására. A bemutatott fiktív projekt célja az újonnan épülő ipari üzemek számára a hőtárolás átfogó és rendszerszintű vizsgálata, amely által lehetőség nyílhat több ipari hőtárolási projekt megvalósítására.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Andrassy Z. (2021): Fázisváltó anyaggal töltött hőtároló modellezése, optimalizálása és épületgépészeti rendszerekbe illesztése, doktori disszertáció, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék
2. Bloessa A., Schillb W-P, Zerrahb A. (2018): Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials. *Applied Energy* 212 (2018) 1611–1626
3. Borbély T. (2014): Szilárd töltetű hőtároló optimális kihasználása. PhD értekezés, Pannon Egyetem, Vegyészmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskola
4. 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.
5. 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.)
6. 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.)
7. 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.)
8. 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.)
9. 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.)
10. 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
11. 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
12. FCT: FCT International Burners, Correspondance (2019). Technology Data – Industrial process heat. Danish Energy Agency p.103
13. Few S. PhD, Schmidt O., Gambhir A. (2016): Electrical energy storage for mitigating climate change. Grantham Institute, Imperial College London
14. 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
15. Gerse K. (2020): *Energiatárolók [Digitális kiadás]*, Akadémiai Kiadó, ISBN 9789634544937
 16. Ho C. K., Ambrosini A. (2021): *Thermal Energy Storage Technologies*. Sandia National Laboratories Publications
 17. IRENA (2020): *Innovation Outlook: Thermal Energy Storage*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, ISBN 978-92-9260-279-6. www.irena.org/publications.
 18. J.N.W. 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
 19. Kuta M. (2023): Mobilized thermal energy storage (M-TES) system design for cooperation with geothermal energy sources. *Applied Energy* 332 (2023) 120567
 20. PV: Enkhardt S. (2023): PV magazine highlight top business model für Kraftwerk: Mehr als heiße Luft. *PV magazine [online kiadás]*, 2023.06.13.
 21. 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
 22. 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
 23. 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
 - 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
 24. Varga-Grund Sz. (2021): *Biogáz-tüzelésű gázmotor hulladékhőjének szezonális hőtároláson keresztüli hasznosíthatóságának vizsgálata*. Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar
 25. Wang D. (2023): Heat loss along the pipeline and its control measures. *SN Applied Sciences* 5, article number: 2 (2023)
 26. Wolf M. (2012): *Program Design and Analysis*. In: *Computers as Components* (3rd edition)