



17th „Building Services, Mechanical and Building Industry days”
International Conference, 13-14 October 2011, Debrecen, Hungary



SZEZONÁLIS HŐTÁROLÓ FELTÖLTÉSE ÉS KIMERÍTÉSE DINAMIKUS FOLYAMATÁNAK MATEMATIKAI MODELLEZÉSE

BÖSZÖRMÉNYI László, dr
Debreceni Egyetem, Műszaki Kar;
ladislav.boszormenyi@tuke.sk, boszla@eng.unideb.hu

ŠIVÁKOVÁ Emese
Kassai Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar;
emese.sivakova@tuke.sk

Kulcsszavak: szezonális hőtároló, hőmérsékleti rétegződés

Abstract:

A megújuló energiaforrások között a napenergia potenciálja messze a legnagyobb, de a legkisebb mértékben van kihasználva. Ezen a téren nagy előrelépést jelentene a szezonális hőtárolást alkalmazó rendszerek elterjedése. A szezonális hőtárolók tervezési problémáinak megoldásánál a matematikai modellezés eredményeit előnyösen fel lehet használni. Különös figyelmet érdemel a tároló hőmérsékleti rétegződése, amely lehetővé teszi a hűtési igények kielégítését is. A cikk ebből a célból összpontosít a tároló feltöltése és kimerítése dinamikus folyamatának matematikai leírására.

1. Bevezetés

Energetikai szakembereket már hosszú ideje foglalkoztatja az a probléma, hogy milyen alternatív energiaforrásokkal lehet kiváltani a fosszilis energiahordozókat, amelyek készletei a nem túl távoli jövőben teljesen kimerülnek. Bár végleges megoldásnak nem tekinthető, jelenleg a megújuló energiaforrások intenzívebb kihasználása került az érdeklődés középpontjába. Ismert tény, hogy a napsugárzástól a Föld egy óra alatt több energiát nyer, mint a teljes évi energiaszükséglete és ez a folyamat a tudósok szerint még több mint 4 milliárd évig fog tartani. Ezért érthető, hogy mint a legfontosabb elsődleges megújuló, sőt ellentétben a geotermikus energiával, lényegében kimeríthetetlen energiaforrás jön számításba. A fizikai lényegének megfelelően a Nap sugárzási energiáját leginkább a hőellátásnál lehet hasznosítani. Ennek legnagyobb buktatója, hogy a napsugárzásból termelhető hasznos hő mennyisége és minősége is erősen függ a napszakok és évszakok, valamint az időjárási és éghajlati viszonyok váltakozásától, a szoláris hőtermelés általában olyankor a legintenzívebb, amikor arra kevésbé van szükség és fordítva. Ezért a szoláris hőellátás szempontjából kulcsfontosságú a hőtárolási problémák megoldása.

A Nap sugárzó energiájának hosszú idejű tárolását a természet megoldotta a fotoszintézis által, amely a biomassa keletkezésében nyilvánul meg. A biomassa, mint könnyen tárolható, szállítható és sokoldalúan felhasználható vegyileg kötött napenergia-forma a jelenleg legfontosabbnak tartott megújuló energiaforrásunk. Ennek ellenére az energiatermelésre való felhasználása erősen korlátozott, mert elsősorban az élelmezési igényeket hivatott kielégíteni. Ezen felül nem



elhanyagolható az a tény sem, hogy egyenlő nagyságú területen napkollektorokkal kb. 40-szer annyi hőt lehet termelni, mint amennyi a megtermelt biomasszából nyerhető. Nem véletlen, hogy a hőigények kielégítésénél egyre nagyobb szerep jut szoláris hőtermelésnek, amely a környezetet jóval kevésbé terheli mint a biomassza ilyen célú felhasználása. Viszont a szoláris hő tárolása és szállítása sokkal igényesebb.

A napszakok és az időjárás változásai által okozott problémák kezelésére szolgáló rövid idejű hőtárolás már jelenleg is hatékonyan megoldható, de a kutatás és fejlesztés ezen a téren is tovább folyik. A szoláris hőellátásban az igazi áttörést szezonális hőtárolással lehet elérni. Ennek célja a nyáron termelt szoláris hőfölösleg tárolása a fűtési szezonra, amikor nem csak a használati víz melegítésére, hanem fűtési igények kielégítésére is fel lehet használni. Így a rendszer a méretezésétől függően akár a 100 %-os szoláris részarányt is el lehet érni, de a szakemberek többnyire a 40-70 %-ra való méretezést tartják ésszerűnek. Ezzel szemben a rövid idejű hőtárolás esetében ez a fontos mutató általában nem éri el a 30 %-ot.

A szezonális hőtárolással elsőként Svédországban és Dánában kezdtek el foglalkozni, de ma már a legtöbb információ a Németországban megvalósított projektekről áll rendelkezésre, pl. a www.solites.de honlapon. Ezekből nyilvánvaló, hogy a szezonális hőtároló a szoláris távhőellátó rendszer legtökeigényesebb része, ezért kiemelt figyelmet kell szentelni a tervezési, kivitelezési és üzemeltetési problémáinak. A tervezésnél a matematikai modellezés eredményesen alkalmazható főleg a feltöltés és kimerítés dinamikus folyamatainak analitikus vizsgálatánál. Első lépésként a ezen folyamatok dinamikájának matematikai leírását kell elvégezni. Mivel a tervezés támogatásánál a matematikai modell egyszerűsége és könnyű kezelhetősége fontos követelmény, kezdeti szakaszban a folyamatok és állapotok lényegesen egyszerűsített leírását találtuk előnyösnek.

2. Homogén hőtároló matematikai leírása

A hőtároló feltöltése és kimerítése dinamikus vizsgálatához szükséges matematikai leírás érdekében az egyik legfontosabb egyszerűsítés a homogén hőtároló fogalma. Ennél feltételezzük, hogy hőtárolóban található munkaközeg hőmérséklete a térfogat minden pontjában egyenlő, csak időben változik. A homogén hőtároló feltöltésének és kimerítésének folyamatát a termodinamika I. főtételeének alkalmazása által az alábbi mérlegegyenlettel lehet leírni:

$$m.c \frac{dT_s}{dt} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_h - \dot{Q}_l - \dot{Q}_t \quad (1)$$

ahol: m - a munkaközeg tömege [kg], c - fajlagos hőkapacitás [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], T_s - a betárolt munkaközeg hőmérséklete [K], \dot{Q}_c - a napkollektorokból nyert hőáram [W], \dot{Q}_h - a kiegészítő hőforrásból nyert hőteljesítmény [W], \dot{Q}_l - a hőfogyasztók ellátására felhasznált hőteljesítmény [W], \dot{Q}_t - a hőtároló hővesztesége [W]

Az (1) mérlegegyenletet (Eicker, 2003) az alábbi formában ajánlja alkalmazni:

$$(m.c)_s \frac{dT_s}{dt} = \delta_c (\dot{m}.c)_c (T_{f,out} - T_s) + \dot{Q}_h - \delta_l (\dot{m}.c)_l (T_s - T_{l,vrat}) - U_{eff} . A (T_s - T_o) \quad (2)$$



ahol: $T_{l,vrat}$ - a fogyasztóktól visszatérő víz hőmérséklete [K], $T_{f, out}$ - a napkollektorokból bevezetett munkaközeg hőmérséklete [K], T_0 - a környezeti hőmérséklet [K], T_s - a tároló hőmérséklete [K], U_{eff} - effektív hőátbocsátási tényező [$W/m^2.K$], δ_c - a napkollektorok kapcsolási paramétere, δ_l - a fogyasztók kapcsolási paramétere

A δ_c és δ_l paraméterek értékei attól függenek, hogy a kollektorokból a betáplálás, ill. a fogyasztás működésben vannak-e, vagy sem. Ha üzemelnek, akkor az 1-es számot választjuk, ha nincsenek üzemben, akkor a 0-át.

A (2) egyszerű differenciálegyenlet megoldása lehetővé teszi a betárolt munkaközeg hőmérséklete időbeli változásának vizsgálatát. Ha az n lépésben a hőmérséklet $T_{S,n}$ akkor Δt idő elteltével az $n+1$ lépésben az $T_{S,n+1}$ értékre változik az alábbi egyenlet szerint:

$$T_{S,n+1} = T_{S,n} + \frac{\Delta t}{(m.c)_s} \left[\delta_c (m.c)_c (T_{f,out,n} - T_{S,n}) + \dot{Q}_{h,n} - \delta_l (m.c)_l (T_{S,n} - T_{l,vrat,n}) \right] - U_{eff} \cdot A (T_{S,n} - T_{0,n}) \quad (3)$$

3. Rétegződő tároló matematikai leírása

A gyakorlatban a hőtárolásra használt a munkaközeg általában nem keveredik és ezért nem alakulhat ki a homogén hőmérséklet a tároló térfogatában. A hőtároló felhasználása szempontjából többnyire előnyös a munkaközeg hőmérsékleti rétegződése. Ezért a munkaközeg úgy van betáplálva, illetve elvezetve hogy a függőleges irányban a keveredés ne jöjjön létre. Így kialakulhat a munkaközeg hőmérsékleti rétegződése, amelynél függőleges irányban felülről lefelé csökken az egyes rétegek hőmérséklete.

A hőmérsékleti rétegződés kialakulásának matematikai leírásánál felhasználhatjuk a homogén tároló elvét úgy, hogy minden réteget önálló homogén tárolóként kezelünk. Ezek mérlegegyenletében figyelembe kell venni az egyes rétegek között a hőmérséklet különbség által fejlesztett konduktív hőáramot a Fourier-törvény értelmében:

$$q = -\lambda \nabla T \quad (4)$$

ahol: q - fajlagos konduktív hőáram [W/m^2], λ - hővezetési tényező [$W.m^{-1}.K^{-1}$], ∇T - hőmérsékleti gradiens [K / m].

Az i réteg érintkezik az $i+1$ és $i-1$ rétegekkel és köztük a hőmérsékletkülönbség konduktív hőáramot fejleszt a (4) egyenlet szerint. A bemenő és kimenő konduktív hőáramok $\dot{Q}_{free,i}$ különbsége ebben a rétegben tárolódik az alábbi egyenlet szerint:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{free,i} &= \dot{Q}_{free,i-1 \rightarrow i} - \dot{Q}_{free,i \rightarrow i+1} = -A_q \frac{\lambda_{eff}}{z} (T_{S,i} - T_{S,i-1}) - \left[-A_q \frac{\lambda_{eff}}{z} (T_{S,i+1} - T_{S,i}) \right] = \\ &= A_q \frac{\lambda_{eff}}{z} (T_{S,i+1} - 2T_{S,i} + T_{S,i-1}) \end{aligned} \quad (5)$$

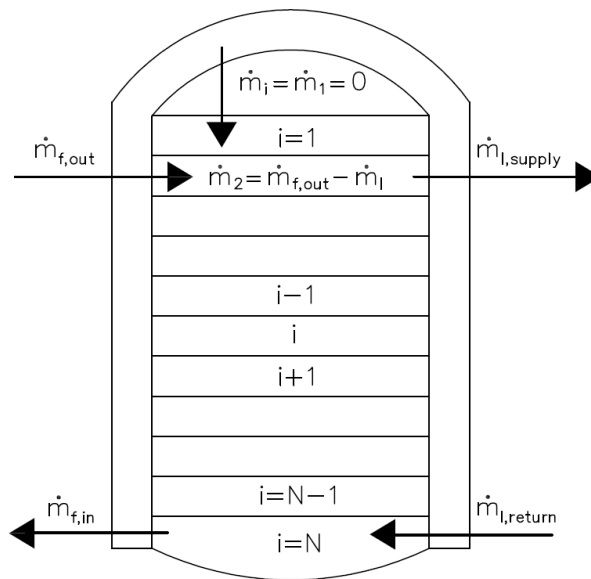
ahol: A_q - a réteg hővezető keresztmetszete [m^2], $T_{S,i}$ - hőmérséklet a víztárolóban [K], λ_{eff} - effektív hővezetési tényező [$W.m^{-1}.K^{-1}$], z - a rétegek magassága [m].



A függőleges hőmérsékleti rétegződést a tartályban gátolja az aránylag magas effektív hővezető képesség.

Ideális esetben anyagáramlás az egyes rétegek között nem keletkezik, ezért belső konvektív hőátvitel sem valósul meg közöttük. Mivel a gyakorlatban egyidejűleg, vagy váltakozva a feltöltés és kimerítés a munkaközeg tömegáramai által történik, bizonyos mértékű konvektív hőátvitellel számolni kell. A legegyszerűbb esetben a belső rétegek közötti konvektív hőáramlásra érvényes: $(\dot{m}c)_{i-1} = (\dot{m}c)_i$ és az i rétegbe betáplált illetve abból elvezetett hőáram az alábbi egyenlettel fejezhető ki:

$$\dot{Q}_{for} = (\dot{m}c)_{i-1}(T_{i-1} - T_i) + (\dot{m}c)_i(T_i - T_{i+1}) = (\dot{m}c)_i(T_{i-1} - T_{i+1}) \quad (6)$$



1. ábra: Rétegződő hőtároló feltöltésének és kimerítésének elve

Ha egy tetszőleges i réteget, mint homogén tárolót vizsgálunk, az energiamérlegét a következő egyenlettel tudjuk kifejezni:

$$m.c \frac{dT_{S,i}}{dt} = \dot{Q}_{c,i} + \dot{Q}_{h,i} - \dot{Q}_{l,i} - \dot{Q}_{t,i} + \dot{Q}_{free,i-1,i+1} \quad (7)$$

ahol: $T_{S,i}$ - az i réteg hőmérséklete [K], $\dot{Q}_{c,i}$ - a napkollektorokból nyert hőáram [W], $\dot{Q}_{h,i}$ - a kiegészítő hőforrásból nyert hőáram [W], $\dot{Q}_{l,i}$ - a hőfogyasztók betáplálására felhasznált hőtéljesítmény [W], $\dot{Q}_{t,i}$ - a réteg hővesztése [W], $\dot{Q}_{free,i-1,i+1}$ - a rétegbe betáplált, illetve abból elvezetett konduktív hőáram [W].



A (7) egyenletet minden rétegre alkalmazni lehet. Az i réteg egyenletének egyszerűsített megoldásnál az $i-1$ réteg jellemzőit használjuk fel. Ily módon meg lehet vizsgálni a rétegek hőmérsékletének időbeli változását függőleges irányban.

A legfelső és legalsó rétegek közötti energia-csere kiszámításához meg kell határozni az egyes rétegeken átfolyó tömegáramot. A feltöltéshez \dot{m}_c tömegáram szállítja a szoláris hőt a tárolóba. A kimerítés ellenkező irányú \dot{m}_l tömegárammal történik. A rétegek közötti effektív tömegáram a két tömegáram különbségéből adódik. Az első és utolsó réteg tömegárama pedig nulla.

$$\dot{m}_i = \dot{m}_c - \dot{m}_l \quad i = 2, N \quad (8)$$

$$\dot{m}_i = 0 \quad i = 1 \quad i = N + 1 \quad (9)$$

Az i réteg energiamérlege az alábbi egyenlettel lehet kifejezni:

$$\begin{aligned} (\dot{m}_i \cdot c)_s \frac{dT_{S,i}}{dt} = & \delta_i^c (\dot{m}_c \cdot c) (T_{f,out} - T_{S,i}) + \dot{Q}_{h,i} - \delta_i^l (\dot{m}_l \cdot c) (T_{S,i} - T_{l,return}) - U_{eff} \cdot A_i (T_{S,i} - T_0) + \\ & + \delta_i^+ \dot{m}_i c (T_{S,i-1} - T_{S,i}) + \delta_i^- \dot{m}_{i+1} c (T_{S,i} - T_{S,i+1}) - A_q \frac{\lambda_{eff}}{z} (T_{S,i} - T_{S,i-1}) \end{aligned} \quad (10)$$

ahol: A_i – a réteg külső felületének hőátlépési területe [m^2], A_q – a rétegek közötti hőátlépési felület [m^2], $T_{l,return}$ – a fogyasztóktól visszatérő víz hőmérséklete [K], $T_{f,out}$ – a kollektorokból belépő tömegáram hőmérséklete [K], T_0 – a környezet hőmérséklete [K], T_S – a réteg átlaghőmérséklete [K], \dot{Q}_c – a napkollektorokból betáplált hőáram [W], \dot{Q}_h – a kiegészítő hőforrásból betáplált hőáram [W], \dot{Q}_l – a fogyasztói rendszerbe betáplált hőáram [W], \dot{Q}_t – a hőveszteség [W].

A napkollektorok és fogyasztók kapcsolási paramétereire érvényes:

$$\begin{aligned} \delta_i^c = 1 & \quad i = 1 \\ \delta_i^c = 0 & \quad i \neq 1 \end{aligned} \quad \text{a hőt a napkollektorból az utolsó rétegbe juttatjuk}$$

$$\begin{aligned} \delta_i^l = 1 & \quad i = N \\ \delta_i^l = 0 & \quad i \neq N \end{aligned} \quad \text{a hő a fogyasztótól visszatér az első rétegbe}$$

$$\begin{aligned} \delta_i^+ = 1 & \quad \dot{m}_i > 0 \\ \delta_i^+ = 0 & \quad \dot{m}_i \leq 0 \end{aligned} \quad \text{energetikai bemenetek } i-1 \text{ rétegből } i \text{ rétegbe}$$

$$\begin{aligned} \delta_i^- = 1 & \quad \dot{m}_{i+1} < 0 \\ \delta_i^- = 0 & \quad \dot{m}_{i+1} \geq 0 \end{aligned} \quad \text{energetikai bemenetek } i+1 \text{ rétegből } i \text{ rétegbe}$$



4. Összefoglalás

A németországi tapasztalatok szerint a szezonális hőtároló a szoláris távhőellátó rendszerek legtöbbszörösebb része. Egyidejűleg az is tény, hogy a beruházási költségeik jelentős részét a bérköltségek képezik, mivel a munkaerő ára nálunk jóval alacsonyabb, a szoláris távhőellátást költséghatékonyabban lehetne megoldani. Ennek ellenére keresni kell a versenyképesség növelésének további lehetőségeit innovatív megoldásokkal. Egy ilyen elképzelést vázol fel (Böszörményi, 2010). Az általa leírt koncepció a szoláris hő fajlagos költségeinek csökkentésére összpontosít a szezonális hőtároló hatékonyabb kihasználása által. Ennek lényege a hőtároló nagyobb mértékű kimerítése hőszivattyú segítségével. Ennek fontos következménye az, hogy a hőtároló a fűtési szezon vége felé lényegében hidegenergia tárolójává válik. A koncepció gyakorlati megvalósítása érdekében a hőtároló feltöltésével és kiürítésével összefüggő folyamatokat, főleg a hőmérsékleti rétegződést, alaposan meg kell vizsgálni. Ehhez első lépésben hatékony segítséget nyújthat az egy egyszerűsített matematikai modell alapján elvégzett számjegyesszámítások szimuláció.

Acknowledgment

„This publication is the result of the Project implementation: Research centre for efficient integration of the renewable energy sources, ITMS: 26220220064 supported by the Research & Development Operational Programme funded by the ERDF.”

Felhasznált szakirodalom:

Böszörményi, L., sen., Šiváková, E., Böszörményi, L., jun. (2010), A szezonális hőtároláson alapuló szoláris távhőellátó rendszerek fejlesztésének távlatai. Magyar épületgépészet, 12/2010, Budapest,

Šiváková, E. (2011), Obalové kostrukcie podzemných zásobníkov. Poruchy a obnova obalových kostrukcií budov, Vysoké Tatry, Podbanské,

Eicker, U. (2003), Solar technologies for buildings. John Wiley and Sons, West Sussex, England

Benner, M., Bodmann, M., Mangold, D., Nussbicker, J., - Raab, S., Schmidt, T., Seiwald, H. (2003), Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher. Stuttgart

Kapalo, P., Lukáč, P. (2010), Temperature Changes of Hot Water Distribution System. In: Journal of Applied Science in the Thermodynamics and Fluid Mechanics. Vol. 4, no. 1 p. 1-5. - ISSN 1802-9388