

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

Sziffer Bence

Vanádium-redox áramlásos akkumulátor és hőmérséklet-  
szabályzásának koncentrált paraméteres modellezése

Konzulens:

*Dr. Józsa Viktor*  
egyetemi docens

Budapest, 2023

# Tartalomjegyzék

Célkitűzés .....	3
Jelölésjegyzék.....	4
1. Bevezetés.....	5
2. Vanádium-redox áramlásos akkumulátorok felépítése és működése.....	6
3. Koncentrált paraméteres modellezés Simulinkben .....	8
4. A vizsgált akkumulátor paraméterei .....	9
5. Számítások és a modell leírása.....	11
5.1 Hidraulika, szivattyúteljesítmény.....	11
5.2 Kémiai reakciók, ionkoncentrációk.....	12
5.2.1 Töltöttség.....	17
5.2.2 Teljes reakciók és a protonkoncentráció .....	18
5.3 Elektromos számítások.....	20
5.3.1 Inverter .....	22
5.4 Hőmérsékletek számítása .....	23
5.4.1 Konténer.....	26
5.5 A modell folyamatábrája.....	28
5.5.1 PLC vezérlő.....	28
5.5.2 Ventilátor.....	30
6. Eredmények.....	31
6.1 Téli és nyári üzem vizsgálata hőmérséklet-szabályzás nélkül .....	32
6.1.1 Kiegészítő berendezések nélkül .....	33
6.1.2 Az akkumulátor konténerbe helyezésének hatásai.....	35
6.1.3 Globálsugárzás és tájolás hatásai .....	36
6.2 Téli és nyári üzem vizsgálata hőmérséklet-szabályzással.....	39
6.2.1 Szigetelés.....	39
6.2.2 Ventilátor és zsaluzat .....	40
6.2.3 Önfogyasztás .....	42
7. Összefoglalás.....	46
Hivatkozások.....	48

## Köszönetnyilvánítás

Dolgozatom megvalósulásáért köszönettel tartozom Dr. Józsa Viktornak, aki konzulensként támogatta, segítette munkámat és tanácsaival, javaslataival nagy mértékben hozzájárult a dolgozat értékének, színvonalának növeléséhez. Továbbá Dr. Mayer Martinnak a környezeti adatok biztosításában és feldolgozásában nyújtott segítségéért.

Jelen dolgozat a 2021-2.1.1-EK-00001 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2021-2.1.1-EK pályázati program finanszírozásában valósult meg.

*Budapest, 2023.11.05.*

*Sziffer Bence*

## **Célkitűzés**

Szakértői előrejelzések alapján az akkumulátoros tárolókapacitás nagymértékű növekedése várható az elkövetkező évtizedekben. A vanádium-redox áramlásos akkumulátorok is a megújuló energiaforrások által termelt többletenergia tárolásának egyik lehetséges alternatívája. Számos előnyös tulajdonsága mellett, ez az akkumulátortípus fokozottan érzékeny az üzemi hőmérsékletre, emiatt részegységeinek hőmérsékletét 5-40°C közötti tartományban szükséges tartani. Dolgozatom célja egy komplex, az akkumulátor összes lényeges folyamatát magába foglaló, koncentrált paraméteres modell megalkotása, különös tekintettel az egyes komponensek hőmérsékletére. Továbbá valós környezeti viszonyok mellett a szükséges hőmérséklet-szabályzó rendszerek megtervezése és ezek hatásainak értékelése a hőmérsékletre, teljesítményre és rendszerhatásfokra.

## Jelölésjegyzék

$A$	Felület	$k$	Köteg
$B$	Előtag	$ki$	Kifolyó ág
$c$	Koncentráció	$konc$	Koncentrációs
$c_p$	Állandó nyomáson vett fajhő	$kont$	Konténer
$d$	Átmérő	$kö$	Könyök
$D$	Diffúziós együttható	$lev$	Levegő
$E$	Feszültség	$m$	Membrán
$f$	Áramlási veszteségtényező	$ohm$	Ohmikus
$F$	Faraday-állandó	$rad$	Hősugárzás
$G$	Globálsugárzás	$sug$	Globálsugárzás
$h$	Magasság	$sz$	Szivattyú
$\Delta H$	Reakcióentalpia	$szál$	Szál
$I$	Áramerősség	$szig$	Szigetelés
$j$	Áramsűrűség	$t$	Tartály
$k$	Hővezetési tényező	$v$	Vízszintes
$l$	Hosszúság	$V$	Vanádium
$N$	Cellaszám	$V^i$	Vanádium ion
$\Delta p$	Nyomásveszteség	<b>Felsőindex</b>	
$P$	Teljesítmény	$0$	Standard potenciál
$q$	Áramlási együttható	$OCV$	Nyitott áramköri
$Q$	Hőáram	$p$	pozitív
$R$	Ellenállás	$n$	negatív
$Re$	Reynolds-szám	<b>Görög betűk</b>	
$SOC$	Töltöttség	$\alpha$	Abszorpciós tényező
$t$	Idő	$\beta$	Térfogati hőtágulási együttható
$T$	Hőmérséklet	$\gamma$	Veszteség
$U$	Hőátviteli tényező	$\delta$	Vastagság
$V$	Térfogat	$\varepsilon$	Emissziós tényező
$\dot{V}$	Térfogatáram	$E$	Energia
$w$	Áramlási sebesség	$\eta$	Hatásfok
$w_i$	Szélesség	$\kappa$	Permeabilitás
$z$	Elektronok száma	$K$	Carman-Kozeny állandó
<b>Alsóindex</b>		$\mu$	Dinamikai viszkozitás
$akt$	Aktivációs	$\nu$	Kinematikai viszkozitás
$be$	Befolyó ág	$\rho$	Sűrűség
$c$	Cella	$\sigma$	Stefan-Boltzmann-állandó
$cs$	Csőrendszer	$\varphi$	Sugárzási tényező
$e$	Elektrolit	$\Phi$	Porozitás
$el$	Elektród	<b>Egyéb</b>	
$inv$	Inverter	$\Re$	Egyetemes gázállandó

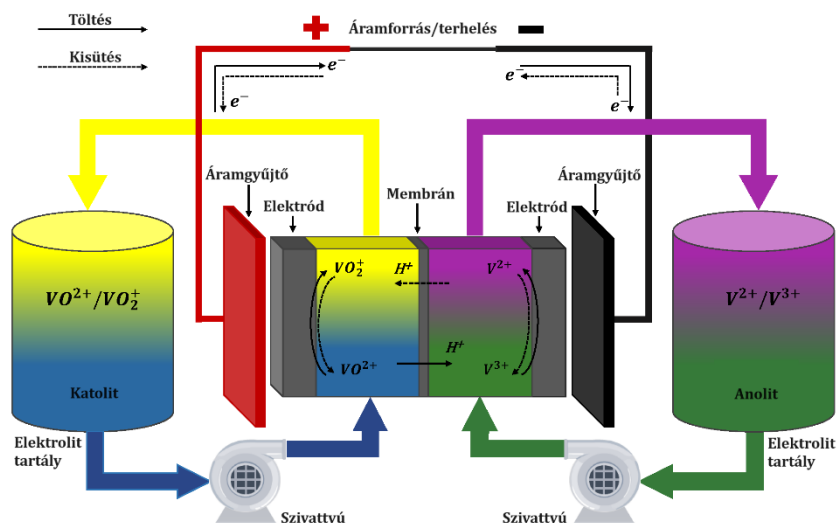
## 1. Bevezetés

A megújuló energiaforrások felhasználásának intenzív terjedése magával vonzza az általuk termelt többletenergia tárolásának és az időjárásfüggő termelés problémáinak kérdését is. Ezen kérdésekre nyújtanak lehetséges megoldásokat az erőművi méretű akkumulátorok, elősegítve a hálózat stabilitásának megőrzését. Több elven működő akkumulátor is alkalmas ezen feladatok ellátására, ezért a problémák megoldása nem egy típus alkalmazása, hanem minden felhasználási módhoz a leginkább illő technológia kiválasztása [1]. Szakértői előrejelzések alapján a telepített akkumulátoros tárolókapacitás jelentős bővülése várható az elkövetkezendő két évtizedben [2], amely folyamatot kutatás-fejlesztéssel szükséges támogatni. A redox áramlásos akkumulátorokra általánosan jellemző, hogy az eltárolt energia mértéke és teljesítménye egymástól függetlenül skálázható, amely az egyik legelőnyösebb tulajdonsága más technológiát alkalmazó elektrokémiai energiatárolókkal szemben [3]. Előbbi az elektrolitot tartalmazó tartályok mértékének változtatásával, míg utóbbi a cellaköteg elektroaktív felületének vagy a cellák számának módosításával állítható be. Számos fajtája közül, a teljes vanádium-redox akkumulátorok rendelkeznek az erőművi alkalmazás szempontjából a legkedvezőbb tulajdonságokkal [4]. Kiemelkedik közülük az akár 20000-et is elérő ciklusszám, mely egy nagyságrenddel nagyobb a Li-ion vagy a savas akkumulátorok tipikus ciklusszámánál. Ugyanakkor a 60-85%-os hatásfokuk alacsonyabb a Li-ion technológiához képest. A vanádium-redox akkumulátorok általában vizes kénsavban oldott vanádiumot alkalmaznak elektrolitként. Ezen oldatok maximális potenciálját a víz elektrokémiai potenciálja korlátozza, ami alacsonyabb energiasűrűséghez vezet (25 Wh/l) a nem vizes elektrolittal rendelkező variánsokkal szemben. Azonban utóbbiakban az aktív anyagok oldhatósága és ciklusszámuk lényegesen alacsonyabb [3], [4]. További előnyös tulajdonságuk az alacsony keresztzennyeződési hajlamuk. Viszont ezen probléma sem szüntethető meg teljes mértékben, így kiemelt figyelmet kell fordítani az ellentétes oldalra diffundáló ionok monitorozására, mivel ez kapacitásvesztést okoz. Kisebb mértékű keresztzennyeződés esetén az elektrolitok összekeverésével orvosolható a probléma, ezen felül regenerálócellák beépítésével nagyobb szennyeződés esetén is tisztíthatóvá válik az elektrolit [5], [6].

A vanádium-redox áramlásos akkumulátorok hátrányos tulajdonságai közül kiemelendő az üzemi hőmérsékletre való érzékenységük [7]. Továbbá az ionkoncentrációk mérése is körülményes, melyek meghatározzák a töltöttséget [4]. Ezen tulajdonságok különösen indokolják az ilyen akkumulátortípusok termikus és kémiai modellezését. A vanádium-redox áramlásos akkumulátorok elemi működési folyamatait a 2. fejezetben olvashatók.

## 2. Vanádium-redox áramlósos akkumulátorok felépítése és működése

Az energiatároló két, az anolitot és katolítot tartalmazó tartályban tárolja az elektrolitot, amelyet egy csőrendszeren keresztül szivattyúk juttatnak a cellakötegbe, amelyre a szöveg későbbi részeiben köteggként hivatkozok, igazodva az irodalomhoz. Egy cella jellemzően két-két áramgyűjtőből, kétpólusú lemezből, elektródból és egy membránból áll [3]. A cellában és az általában grafit-szálból készülő elektródon lejátszódó redoxireakciók biztosítják a felhasználható teljesítményt, mivel a felszabaduló elektronok a cellaköteg végein található áramgyűjtők segítségével külső áramkörön keresztül kivezethetők a rendszerből. A reakciók lejátszódása után az elektrolit a kifolyó ágon keresztül visszajut a tartályokba. Az alkalmazott, jellemzően polimerből készülő membránok a töltéskiegyenlítéshez szükséges protonokat átengedik, míg az elektrolit többi összetevőjének átdiffundálását megakadályozzák [8]. Előbbi folyamat az elektrolitok semlegességének megőrzéséhez is szükséges. A vanádium kedvező tulajdonsága, hogy számos oxidációsállapotmal rendelkezik, közülük 2-től 5 értékűig használják fel vanádium-redox akkumulátorokban. A két oldal közötti oxidációsállapotszámkülönbség töltés hatására megnő, kisütés esetén pedig lecsökken, így elméleti síkon ezen különbségben tárolódik az energia. Egy cella nagyon alacsony teljesítményt ad le, ez több cella sorba kapcsolásával növelhető. Ebben az esetben a kétpólusú lemez választja el egymástól a cellákat, ugyanakkor biztosítja közöttük az elektromos kapcsolatot és strukturális merevséget is biztosít a cellakötegnek [4]. Az akkumulátor működése megfordítható, ebben az esetben a reakciók ellentétes irányban játszódnak le. A részletes reakciók az 5.2 alfejezetben olvashatók.

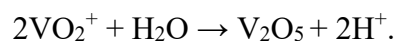


1. ábra. Vanádium-redox áramlósos akkumulátor vázlatos felépítése [4].

Az akkumulátor működése során számos nemkívánt mellékfolyamat is lejátszódik, melyek káros hatással vannak mind a működésre, teljesítményre és az élettartamra is [9]. Közéjük tartozik az említett vanádium ionok által okozott keresztzennyeződés, melyet a membrán tökéletlen működése okoz. Az átdiffundált ionok az ellentétes oldalon önkisülési reakciókat indítanak el, amelyek kapacitáscsökkenéshez vezetnek és jelentős hőfejlődéssel járnak. Részletes leírásuk az 5.2 alfejezetben olvasható.

Ozmózis vagy nyomáskülönbség hatására víz is átjuthat a membránon, amely térfogatcsökkenést okoz az egyik oldali elektrolitban [4]. Gázképző reakciók is lejátszódhatnak az elektródok felszínén, mikor az elektrolitban lévő alapvetően semleges elemek is részt vesznek az elektrontranszfer-reakciókban. Töltés során a negatív elektródon előfordulhat, hogy az elektronok a jelenlévő protonokkal reagálnak a vanádiumionok helyett és gázhalmazállapotú hidrogént hoznak létre:  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ . Így kevesebb elektron jut a negatív oldalon lévő ionok koncentrációváltozásaira, ami töltéskiegyensúlyozatlansághoz vezet a pozitív és negatív oldali elektrolit között [4], [10].

Működés szempontjából a legtöbb veszéllyel járó mellékfolyamat a vanádiumionok hőmérséklet okozta kicsapódása, mivel kapacitáscsökkenés mellett a szilárd halmazállapotú csapadék eltömítheti a cellakötegben található elektrolitsatornákat, károsíthatják a membránt és üzemhibát is okozhatnak.  $40^\circ\text{C}$  felett a  $\text{VO}_2^+$  ionokból szilárd halmazállapotú vanádium-pentoxid ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) jöhet létre [4], [11]:

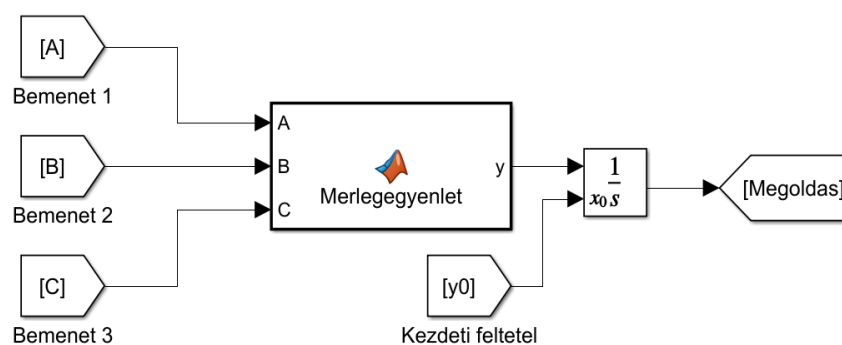


Egyirányú reakcióról lévén szó a szennyeződés tartósan az elektrolitban marad. A kicsapódáshoz szükséges idő a hőmérséklet és  $\text{VO}_2^+$  koncentrációjának növekedésével csökken, míg magasabb elektrolit szulfátkoncentrációval növelhető [12]. Ezen felül ismert, hogy a  $\text{V}^{2+}$  ion  $5^\circ\text{C}$  alatt szulfátok formájában kicsapódhat [4], [13]. A leírt indokok miatt az akkumulátor részegységeinek üzemi hőmérsékletét folyamatosan az  $5\text{-}40^\circ\text{C}$  közötti tartományban szükséges tartani [3].



### 3. Koncentrált paraméteres modellezés Simulinkben

A Matlab szoftvercsomaghoz tartozó Simulink általánosan alkalmazható különböző koncentrált paraméterű számítási feladatok megoldásához, mivel kevés, egyszerű lépésből felépíthető a szükséges blokkhálózat, mely végig áttekinthető marad. A Simulink elsősorban különböző műveleteket végző, előre definiált operációkat végrehajtó blokkokat és Matlab programnyelven programozható, egyedi függvényelemeket biztosít a problémák megoldásához. A koncentrált paraméterek időbeli változását leíró mérlegegyenletek Simulinkben való megoldására mutat általános példát az 2. ábra.



2. ábra. Mérlegegyenlet megoldása Simulinkben.

A 2. ábrán A, B és C az egyenlet különböző bemenetei, amelyek más számítások eredményei is lehetnek. A függvényblokkba írható a megfelelő, tetszőleges egyenlet, amelyet az utána található '1/s' jelölésű 'integrator' blokk integrál a megadott kezdeti feltételből kiindulva, megadva a paraméter időbeli változását. Mivel a modellben használt környezeti hőmérséklet, töltést, fogyasztást, napsugárzást leíró adatsorok más-más időléptékűek, ezért érdemes a szimulációt fix időlépéssel futtatni. Az adatsorok időléptékei között a szoftver interpolál a folyamatos számítás érdekében. Kisebb időlépés hosszabb futtatási időt, ugyanakkor pontosabb számítást eredményez. Ezek alapján a modellben az időlépés fix 5 másodperc. Az 5.5.1, 5.5.2, 6.2.2 alfejezetben olvasható hőmérséklet-szabályzás esetén a vezérlőkbe beépített 60 másodperces késleltetések miatt az időlépést 1 másodpercre szükséges állítani a pontos késleltetési idő érdekében. A beállított késleltetés az időlépések számára vonatkozik, így 5 másodperc esetén a perces késleltetés 300 másodpercként jelenne meg. A szoftver a fix időlépéshez és az adott problémához automatikusan választja meg a megfelelő megoldó módszert, amely jelen esetben az 'ode3' megoldó [14]. Ez a Bogacki-Shmapine formulát alkalmazza a differenciálegyenletek megoldására, ami egy explicit, harmadrendű Runge-Kutta

módszer. Egy lépés negyedik, utolsó szakaszában a számított érték megegyezik a következő lépés kezdőértékével, ezért lépésenként csupán három érték kiszámítása szükséges [15]. A szoftverben a fix időlépéses megoldóknak nincs külön tolerancia beállításuk, így a számítás pontossága és a futásidő, adott megoldó esetén az időlépés megválasztásával befolyásolható [16].

#### 4. A vizsgált akkumulátor paraméterei

1. Táblázat. Modellben felhasznált anyagjellemzők.

Jelölés	Megnevezés	Érték	Mértékegység	Hivatkozás
<u>Elektrolit: 2 mol/l vanádium 4,4 mol/l kénsavban + víz [17]</u>				
$\rho_e$	Sűrűség	$-0,7401 \cdot T + 1344$	[kg/m <sup>3</sup> ]	[18]
$c_{p,e}$	Fajhő	3200	[J/kgK]	[19]
$k_e$	Hővezetési tényező	0,33	[W/mK]	[20]
$\mu_e$	Dinamikai viszkozitás	$4,928 \cdot 10^{-3}$	[kg/ms]	[19]
$\nu_e$	Kinematikai viszkozitás	$\mu/\rho$	[m <sup>2</sup> /s]	
$\beta_e$	Térfogati hőtágulási együttható	$4,488 \cdot 10^{-4}$	[1/K]	[18]
<u>Membrán: Nafion 115 [17]</u>				
<u>Elektród: grafit [19]</u>				
$\Phi_{el}$	Porozitás	0,68	[-]	[19]
<u>Részegységek: polipropilén [17]</u>				
$k_t = k_{cs} = k_k$	Hővezetési tényező	0,22	[W/mK]	[21]
$\varepsilon_t = \varepsilon_{cs} = \varepsilon_k$	Emissziós tényező	0,97	[-]	[22]
<u>Szigetelés: fémborítású expandált polisztirol</u>				
$k_{szig}$	Hővezetési tényező	0,035	[W/mK]	[23]
$\varepsilon_{szig}$	Emissziós tényező	0,5	[-]	[23]
<u>Konténer: COR-TEN acél</u>				
$\rho_{kont}$	Sűrűség	7800	[kg/m <sup>3</sup> ]	[23]
$c_{p,kont}$	Fajhő	473	[J/kgK]	[23]
$k_{kont}$	Hővezetési tényező	46	[W/mK]	[23]
$\varepsilon_{kont}$	Emissziós tényező	0,85	[-]	[23]

[20] forrás alapján az elektrolit anyagjellemzői közelíthetők a kénsav anyagjellemzőivel, amennyiben kevés elérhető adat áll rendelkezésre a több összetevős elektrolitot illetően. A 4,4 mol/l kénsav 43,12%-os kénsavnak felel meg, aminek az adatait [18]-ből vettem át.

2. táblázat. Mérettáblázat.

Jelölés	Megnevezés	Érték	Mértékegység	Hivatkozás
<u>Membrán:</u>				
$d_m$	Átmérő	125	[ $\mu\text{m}$ ]	[24]
<u>Elektród:</u>				
$A_{el}$	Felület	1500	[ $\text{cm}^2$ ]	[20]
$d_{szál}$	Átmérő	17,6	[ $\mu\text{m}$ ]	[25]
<u>Tartály:</u>				
$d_t$	Átmérő	45,4	[cm]	[20]
$h_t$	Magasság	1	[m]	[20]
$V_t$	Térfogat	200	[l]	[20]
$\delta_t$	Vastagság	1	[cm]	[20]
<u>Köteg: soros cellakapcsolás</u>				
$N$	Cellaszám	19	[-]	[20]
$l_k \times w_k \times h_k$	Hossz $\times$ Szél $\times$ Mag	$50 \times 30 \times 11,4$	[cm]	[20]
$V_k$	Térfogat	17,1	[l]	[20]
<u>Csőrendszer:</u>				
$d_{cs}$	Átmérő	4	[cm]	[17]
$l_{cs}$	Hosszúság	2	[m]	[17]
$\delta_{cs}$	Vastagság	4	[mm]	[17]
<u>Konténer: 15 láb</u>				
$l_{kont,belső} \times w_{kont,belső} \times h_{kont,belső}$	Hossz $\times$ Szél $\times$ Mag	$4,387 \times 2,106 \times 2,050$	[m]	[26]
$l_{kont,külső} \times w_{kont,külső} \times h_{kont,külső}$	Hossz $\times$ Szél $\times$ Mag	$4,550 \times 2,200 \times 2,260$	[m]	[26]
$\delta_{kont,fal} = \delta_{kont,tető}$	Vastagság	1,2	[mm]	[26]
$\delta_{kont,padló}$	Vastagság	4	[mm]	[26]

A konténer méretének kiválasztásánál a szempontok között szerepelt, hogy egyszerűen elérhető, szabványos méretű legyen és az akkumulátor esetleges meghibásodása esetén legalább egy fő elférjen az akkumulátor mellett. Így a választás egy szabványos, 15 lábás konténerre esett, melynek méretei a 2. táblázatban találhatóak.

## 5. Számítások és a modell leírása

### 5.1 Hidraulika, szivattyúteljesítmény

Az elektrolit térfogatáramának pontos ismerete kritikus a hőmérsékletek, koncentrációváltozások és az önfogyasztás meghatározásához is. Belső önfogyasztás alatt az akkumulátor működéséhez feltétlenül szükséges, az akkumulátorba épített berendezések, esetünkben a szivattyúk fogyasztása értendő. A külső önfogyasztást a biztonságos működést fenntartó egyéb berendezések energiaigénye jelenti. A két változatra együttesen az önfogyasztás kifejezés használatos. A modellezés során feltételezzük, hogy a pozitív és negatív oldali térfogatáramok egyenlők. A térfogatáram ( $\dot{V}$ ) nagysága az áramerősségtől ( $I$ ), a tartály töltöttségétől ( $SOC_t$ ) és a  $q = 2$  áramlási együtthatótól függ, amely értéket tapasztalati úton határozták meg és az irodalomban általánosan alkalmazzák [24]. Ez a tényleges és a reakciókban résztvevő ionok ellátásához minimálisan szükséges térfogatáram hányadosát fejezi ki. Növelésével némileg csökkenthető a koncentrációs többletfeszültség, ezáltal az akkumulátor hatásfoka növekszik, ugyanakkor megnöveli a térfogatáramot, amely nagyobb teljesítményű szivattyúkat igényel, növelve a rendszer önfogyasztását és csökkentve a rendszerhatásfokot [27]. Ezért nem célszerű  $q$  értékét tetszőlegesen nagyra felvenni a pozitív hatása ellenére. Általánosan, a minimálisnál magasabb térfogatárammal csökkenthetők az akkumulátor veszteségei és a nemkívánt mellékreakciók lejátszódásának esélyei [4]. Töltés során, a töltöttség növekedésével a térfogatáram is növekszik, míg kisütés alatt annak csökkenésével növekszik a térfogatáram. Ennek oka, hogy az ionkoncentrációk csökkenésével egyre több elektrolitot szükséges a cellákba juttatni a reakciók fenntartásához. A köteg teljes térfogatárama a pozitív és a negatív oldal összege.

$$\dot{V}_{\text{töltés}}^p = \dot{V}_{\text{töltés}}^n = \frac{q \cdot I}{z \cdot F \cdot c_V \cdot (1 - SOC_t)}, \quad (1)$$

$$\dot{V}_{\text{kisütés}}^p = \dot{V}_{\text{kisütés}}^n = \frac{q \cdot |I|}{z \cdot F \cdot c_V \cdot SOC_t}, \quad (2)$$

$$\dot{V}_k = \dot{V}^p + \dot{V}^n = 2\dot{V}^p = 2\dot{V}^n. \quad (3)$$

Továbbá  $F = 96485 \text{ C/mol}$  a Faraday-állandó,  $z = 1$  a reakciók során átadott elektronok száma,  $c_V$  az összes vanádiumion koncentráció az elektrolitban. A térfogatáramok ismeretében meghatározható az anolitot és katolitot keringtető szivattyúk teljesítményfelvétele, amely a rendszer önfogyasztásának egyik lényeges összetevője. A szivattyúknak fedeznie kell a köteg és a csőrendszer nyomásvesztéseit ( $\Delta p$ ). Előbbi a membránon, mint porózus anyagon való

keresztáramlásból és a grafit elektród hidraulikai ellenállásából adódik, melyet a Darcy-törvény szerint írhatunk le [19],[4].

$$\Delta p_k^p = \frac{\mu_e l_{el} \dot{V}^p}{\kappa_e \cdot A_{el}} \cdot N = \frac{\mu_e l_{el} \dot{V}^p}{\frac{d_{szál}^2}{K} \frac{\Phi_{el}^3}{(1-\Phi_{el})^2} \cdot A_{el}} \cdot N, \quad (4)$$

ahol szál alsóindex az elektród anyagát jelentő grafit szálat jelenti. Továbbá,  $\mu$  az elektrolit dinamikai viszkozitása,  $l$  a hosszúság,  $\kappa$  a permeabilitás,  $A$  a felület,  $d$  az átmérő,  $K$  Carman-Kozeny-állandó,  $\Phi$  a porozitás, illetve  $N$  a cellaszám.

A csőrendszerben mindkét oldali be- és kifolyó ágban 2 db 90°-os könyököt feltételeztem a hidraulikai veszteségek közelítésére. Mivel maximális térfogatáramok esetén is lamináris áramlás jön létre a csőrendszerben, így a veszteségtényezőket is ehhez az esethez kell meghatározni. (5) egyenlet egy oldal be- és kifolyó ágának összesített csőveszteségét adja meg [28]:

$$\Delta p_{cs}^p = 2 \cdot \left( f_{egyenes} \frac{\rho_e}{2} w_e^2 \frac{l_{cs}}{d_{cs}} + 2 \cdot \left( f_{kö} \frac{\rho_e}{2} w_e^2 \right) \right) = 2 \cdot \left( \frac{64}{Re} \cdot \frac{\rho_e}{2} w_e^2 \frac{l_{cs}}{d_{cs}} + 2 \cdot \left( 0,4 \cdot \frac{\rho_e}{2} w_e^2 \right) \right), \quad (5)$$

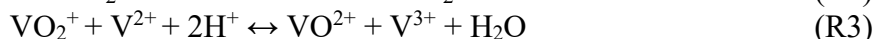
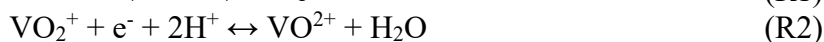
ahol  $f$  az áramlási veszteségtényező, egyenes alsóindex az egyenes csőszakaszra utal, kö alsóindex pedig a könyökökre. Továbbá,  $w$  az áramlási sebességet,  $Re$  a Reynolds-számot jelöli. Ebből adódóan az akkumulátor teljes hidraulikai csővesztesége:  $\Delta p_{cs} = \Delta p_{cs}^p + \Delta p_{cs}^n = 2\Delta p_{cs}^p = 2\Delta p_{cs}^n$ . A szivattyúk teljesítményfelvételéhez figyelembe kell venni azok hatásfokát is, mely az adott terheléstől függ [29]. A rendszer teljes szivattyút teljesítmény-igénye ( $P_{sz}$ ) a pozitív és negatív oldali szivattyú teljesítményeinek összege, továbbá  $\eta$  a hatásfokra utal.

$$P_{sz} = \frac{(\Delta p_k^p + \Delta p_{cs}^p) \cdot \dot{V}^p}{\eta_{sz}} + \frac{(\Delta p_k^n + \Delta p_{cs}^n) \cdot \dot{V}^n}{\eta_{sz}}, \quad (6)$$

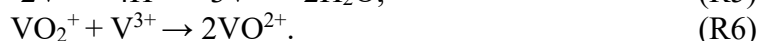
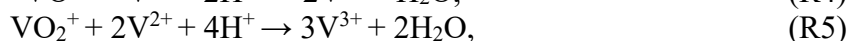
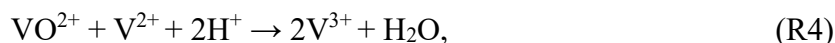
## 5.2 Kémiai reakciók, ionkoncentrációk

A vanádium kedvező tulajdonsága, hogy ionjai több lehetséges oxidációsszámmal rendelkezhetnek. Vanádium-redox áramlásos akkumulátorokban felhasznált ionok oxidációszáma II-től V-ig változik. Kiinduló állapotban  $V^{3+}$  (V(III)) ion oldata az anolitban, míg  $VO^{2+}$  (V(IV)) ion oldata a katolitban található, ekkor a negatív és pozitív oldal

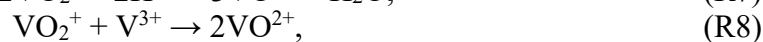
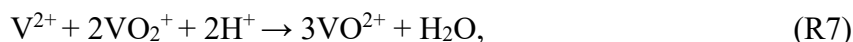
oxidációsszámainak különbsége 1. Feltöltés során a negatív oldalon található  $V^{3+}$  ion  $V^{2+}$  (V(II)) ionná redukálódik míg a pozitív oldalon lévő  $VO_2^+$  ion oxidációjából  $VO_2^+$  V(V)) ion keletkezik, ezáltal a két oldal közötti oxidációsszám-különbség egyről háromra növekszik. Kisütés esetén a reakciók megfordulnak és a folyamat végére az oxidációsszám-különbség ismét 1 lesz. Rendre a negatív oldal, pozitív oldal és az akkumulátor bruttó reakciói:



(R1), (R2) fő reakciók mellett ún. önkisülési reakciók (R4)-(R9) is lejátszódnak, utóbbiak jelentősége felerősödik készenléti állapotban, mikor az áramerősség zérus. Mivel a kétoldali elektrolitot elválasztó membrán nem képes teljes mértékben megakadályozni az önkisülési reakciókat és számos káros hatással rendelkeznek, ezért modellezésük kritikus a folyamatok pontos leírásához. A membránon keresztül az ellentétes oldalra átdiffundált ionok keresztszennyeződéshez vezetnek kapacitásvesztést okozva. Hatásukra továbbá felborul a két oldal közötti töltésségi egyensúly [30]. Ezenfelül jelentős hőfejlődéssel járnak, mely hatására a köteg hőmérséklete túllépheti a 40 °C-os felső határértéket, ami az ionok kicsapódásához vezet. Az önkisülési a reakciók a következők. Negatív oldal: a pozitív oldalról átdiffundáló  $VO^{2+}$ ,  $VO_2^+$  reakcióba lép az itt jelenlévő  $V^{2+}$  és  $V^{3+}$  ionokkal:



Pozitív oldal: a negatív oldalról átdiffundáló  $V^{2+}$ ,  $V^{3+}$  reakcióba lép az itt jelenlévő  $VO^{2+}$  és  $VO_2^+$  ionokkal



Az (R4)–(R9) és (R6)–(R8) reakciópárok szimmetrikusak egymással. Az ionkoncentrációk iononként eltérő gyorsasággal változnak, amit az 3. táblázatban látható hőmérsékletfüggő diffúziós együtthatójuk határoz meg. Emiatt előfordulhat olyan állapot, amikor egy ion koncentrációja megközelítőleg nullára esik, emiatt reakciói nem képesek lejátszódnak. Ennek

függvényében az önkisülési folyamat 3 fázisra bontható, melyek közül a 2. fázisban két eset fordulhat elő [24]:

- 1. fázis: Minden ion az eredeti oldalán található, így az (R4)–(R9) reakciók játszódhatnak le. Mivel a szivattyúk nem keringtetik az elektrolitot, így a tartályokban lévő ionkoncentráció nem változik.
- 2a. fázis:  $V^{2+}$  ion koncentrációja megközelítőleg nullára csökken, (R6) és (R8) reakciók játszódhatnak le. Mivel a többi reakció a reagensek hiányában nem játszódik le, így  $VO^{2+}$  ion koncentrációja a negatív oldalon növekedni kezd és keresztszennyeződést okoz.
- 2b. fázis:  $VO_2^+$  ion koncentrációja megközelítőleg nullára csökken, (R4) és (R9) reakciók játszódhatnak le. Mivel a többi reakció a reagensek hiányában nem játszódik le, így  $V^{3+}$  ion koncentrációja a pozitív oldalon növekedni kezd és keresztszennyeződést okoz.
- 3. fázis:  $V^{2+}$  és  $VO_2^+$  ion koncentrációja is megközelítőleg nullára csökken, a reakciók nem játszódhatnak le,  $VO^{2+}$  és  $V^{3+}$  ionok tiszta diffúziója megy végbe és keresztszennyeződést okoznak.

A koncentrációváltozást leíró egyenleteket külön-külön szükséges meghatározni a kötegre és a tartályra, minden ionra a fázisok függvényében. Normál üzemi állapotban a leíró egyenletek megegyeznek az 1. fázis egyenleteivel a térfogatáramot és áramerősséget tartalmazó tagokat leszámítva, mivel értékük az 1. fázisban zérus. Normál üzemi állapot (1. fázis):

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,V^{2+}}^n}{\partial t} = \dot{V}_k \cdot (c_{t,V^{2+}}^n - c_{k,V^{2+}}^n) \pm \frac{NI}{zF} + N \left( -D_{V^{2+}}(T_k) c_{k,V^{2+}}^n - 2D_{VO_2^+}(T_k) c_{k,VO_2^+}^p - D_{VO^{2+}}(T_k) c_{k,VO^{2+}}^p \right) \cdot \frac{A_e}{d_m}, \quad (7)$$

$$V_t^n \frac{\partial c_{t,V^{2+}}^n}{\partial t} = \dot{V}_k \cdot (c_{k,V^{2+}}^n - c_{t,V^{2+}}^n), \quad (8)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,V^{3+}}^n}{\partial t} = \dot{V}_k \cdot (c_{t,V^{3+}}^n - c_{k,V^{3+}}^n) \pm \frac{NI}{zF} + N \left( -D_{V^{3+}}(T_k) c_{k,V^{3+}}^n + 3D_{VO_2^+}(T_k) c_{k,VO_2^+}^p + 2D_{VO^{2+}}(T_k) c_{k,VO^{2+}}^p \right) \cdot \frac{A_e}{d_m}, \quad (9)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,V^{3+}}^p}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

$$V_t^n \frac{\partial c_{t,V^{3+}}^n}{\partial t} = \dot{V}_k \cdot (c_{k,V^{3+}}^n - c_{t,V^{3+}}^n), \quad (11)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,VO^{2+}}^p}{\partial t} = \dot{V}_k \cdot (c_{t,VO^{2+}}^n - c_{k,VO^{2+}}^n) \pm \frac{NI}{zF} + N \left( -D_{VO^{2+}}(T_k) c_{k,VO^{2+}}^p + 3D_{V^{2+}}(T_k) c_{k,V^{2+}}^n + 2D_{V^{3+}}(T_k) c_{k,V^{3+}}^n \right) \cdot \frac{A_e}{d_m}, \quad (12)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,VO^{2+}}^n}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

$$V_t^p \frac{\partial c_{t,VO^{2+}}^p}{\partial t} = \dot{V}_k \cdot (c_{k,VO^{2+}}^p - c_{t,VO^{2+}}^p), \quad (14)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,VO_2^+}^p}{\partial t} = \dot{V}_k \cdot (c_{t,VO_2^+}^p - c_{k,VO_2^+}^p) \pm \frac{NI}{zF} + N \left( -D_{VO_2^+}(T_k) c_{k,VO_2^+}^p - 2D_{V^{2+}}(T_k) c_{k,V^{2+}}^n - D_{V^{3+}}(T_k) c_{k,V^{3+}}^n \right) \cdot \frac{A_e}{d_m}, \quad (15)$$

$$V_t^p \frac{\partial c_{t,VO_2^+}^p}{\partial t} = \dot{V}_k \cdot (c_{k,VO_2^+}^p - c_{t,VO_2^+}^p), \quad (16)$$

Önkiülés, 2a. fázis:

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,V^{2+}}^p}{\partial t} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,V^{3+}}^n}{\partial t} = N \left( -D_{V^{3+}}(T_k) c_{k,V^{3+}}^n - D_{VO_2^+}(T_k) c_{k,VO_2^+}^p \right) \cdot \frac{A_e}{d_m}, \quad (18)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,V^{3+}}^p}{\partial t} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,VO^{2+}}^p}{\partial t} = N \left( D_{VO^{2+}}(T_k) (c_{k,VO^{2+}}^n - c_{k,VO^{2+}}^p) + 2D_{V^{3+}}(T_k) c_{k,V^{3+}}^n \right) \cdot \frac{A_e}{d_m}, \quad (20)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,VO_2^+}^n}{\partial t} = N \left( D_{VO_2^+}(T_k) (c_{k,VO_2^+}^p - c_{k,VO_2^+}^n) + 2D_{VO_2^+}(T_k) c_{k,VO_2^+}^p \right) \cdot \frac{A_e}{d_m}, \quad (21)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,VO_2^+}^p}{\partial t} = N \left( -D_{VO_2^+}(T_k) c_{k,VO_2^+}^p - D_{V^{3+}}(T_k) c_{k,V^{3+}}^n \right) \cdot \frac{A_e}{d_m}, \quad (22)$$



Önkisülés, 3. fázis:

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,V^{2+}}^p}{\partial t} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,V^{3+}}^n}{\partial t} = N \left( D_{V^{3+}} (T_k) \left( c_{k,V^{3+}}^p - c_{k,V^{3+}}^n \right) \right) \cdot \frac{A_e}{d_m}, \quad (24)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,V^{3+}}^p}{\partial t} = N \left( D_{V^{3+}} (T_k) \left( c_{k,V^{3+}}^n - c_{k,V^{3+}}^p \right) \right) \cdot \frac{A_e}{d_m}, \quad (25)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,VO^{2+}}^p}{\partial t} = N \left( D_{VO^{2+}} (T_k) \left( c_{k,VO^{2+}}^n - c_{k,VO^{2+}}^p \right) \right) \cdot \frac{A_e}{d_m}, \quad (26)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,VO^{2+}}^n}{\partial t} = N \left( D_{VO^{2+}} (T_k) \left( c_{k,VO^{2+}}^p - c_{k,VO^{2+}}^n \right) \right) \cdot \frac{A_e}{d_m}, \quad (27)$$

$$\frac{V_k}{2} \frac{\partial c_{k,VO_2^+}^p}{\partial t} = 0, \quad (28)$$

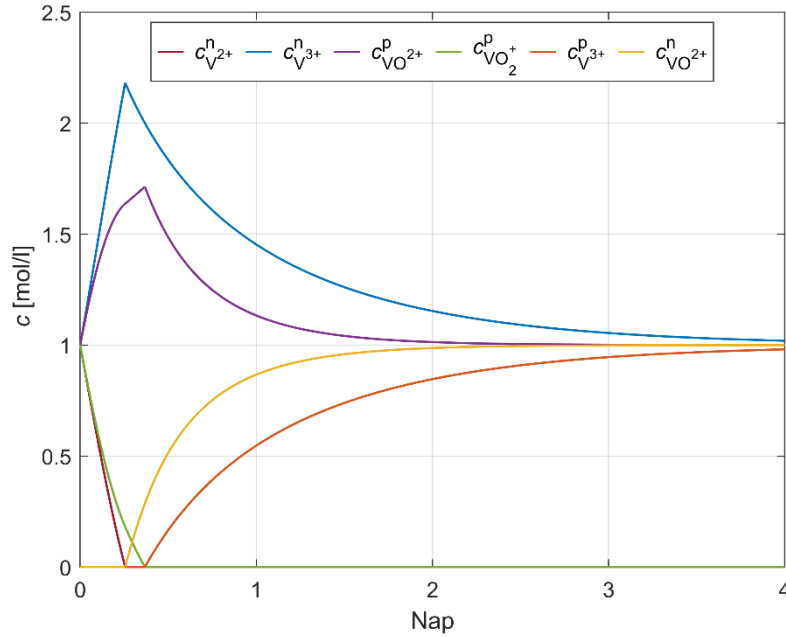
ahol  $V$  a térfogat,  $t$  az idő,  $T$  a hőmérséklet és  $D$  a diffúziós együttható. Utóbbiak erős hőmérsékletfüggést mutatnak, amely az Arrhenius-egyenlet segítségével írható le [24]:

$$D_{V^i} = B_{V^i} e^{-\frac{E_{akt}}{\mathfrak{R}T_k}}, \quad (29)$$

ahol  $B_{V^i}$  az adott vanádiumionra jellemző előtag,  $E_{akt} = 17340$  J/mol aktivációs energia, melyre feltételezhető, hogy mindegyik ion esetében egyforma [24],  $\mathfrak{R} = 8,314$  J/molK az egyetemes gázállandó. [17] forrásban megadott értékekből visszszámolva az előtagok értékeit a 3. táblázat tartalmazza:

3. táblázat. Diffúziós együtthatók előtagjai.

$B_{V^i}$	$V^{2+}$	$V^{3+}$	$VO^{2+}$	$VO_2^+$
[cm <sup>2</sup> /perc]	$5,74 \cdot 10^{-3}$	$2,11 \cdot 10^{-3}$	$4,47 \cdot 10^{-3}$	$3,86 \cdot 10^{-3}$



3. ábra. Ionkoncentrációk változása önkisülés során.  $T_{lev} = 20^\circ C$  konstans.

A 3. ábrán látható önkisülés során, a vanádiumionkoncentrációk változása. A kezdeti állapot 50%-os töltöttségnek felel meg.  $V^{2+}$  koncentrációja magasabb diffúziós együtthatójából adódóan hamarabb csökken megközelítőleg nullára  $VO_2^+$ -hoz viszonyítva. Előbbi bekövetkeztekor megkezdődik  $VO_2^+$  felgyülemzése az anoditban, ami egyben a katoditban való növekedésének lassulását is jelenti, továbbá  $V^{3+}$  koncentrációja csökkenésnek indul. A folyamat 6 óra 7 perccel az önkisülés kezdetét követően zárul le és egyben ez jelenti az önkisülés 2a fázisának kezdetét is.  $VO_2^+$  koncentrációjának teljes lecsökkenéséhez 8 óra 49 perc szükséges, mely a 3. fázis és  $V^{3+}$  katoditban való felgyülemlésének kezdetét jelenti. A koncentrációk két oldal közötti teljes kiegyenlítéséhez 4 napra van szükség. A kapott eredmények megegyeznek [17] 4. ábráján láthatóakkal, az eltérő kezdeti töltöttséget figyelembe véve.

### 5.2.1 Töltöttség

Az akkumulátor töltöttsége az egy oldalon lévő ionkoncentrációk arányából számítható ki [11]; meghatározható mind a köteg mind a tartályok esetén. A kötegre felírva:

$$SOC_k = \frac{c_{k,V^{2+}}}{c_{k,V^{2+}} + c_{k,V^{3+}}} = \frac{c_{k,VO_2^+}}{c_{k,VO_2^+} + c_{k,VO_2^+}}. \quad (30)$$

### 5.2.2 Teljes reakciók és a protonkoncentráció

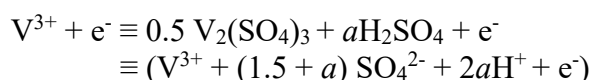
A cellafeszültség 5.3 alfejezetben ismertetett meghatározásához szükséges a protonkoncentráció ismerete, ez azonban a cellákban lejátszódó teljes reakció leírását kívánja meg. A teljes reakciók leírásához figyelembe kell venni az elektrolitokban található protonokat:  $H^+$ , és szulfátionokat:  $SO_4^{2-}$ . Ugyan nem vesznek részt aktívan a reakciókban, de elengedhetetlen szerepük van a töltés- és tömegmaradásban. A teljes reakciók leírásához szükség van a vanádiumionok sóira és kénsavra, amelynek mennyisége az adott elektrolit összetételétől függ.

4. táblázat. vanádiumionok és sóik jelenléte SOC függvényében.

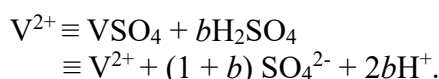
Ion	Sók	Töltöttségi állapot	Elektrolit
$V^{2+}$	$VSO_4$	Feltöltött	Anolit
$V^{3+}$	$0.5V_2(SO_4)_3$	Kisütött	Anolit
$VO^{2+}$	$VOSO_4$	Kisütött	Katolit
$VO_2^+$	$0.5(VO_2)_2SO_4$	Feltöltött	Katolit

A teljes reakciók külön-külön felírhatók az anódra és a katódra, a disszociált sók és kénsav összetevői csoportosíthatók. A leírt egyenletek egy kisütött cella teljes feltöltése során mennek végbe [31].

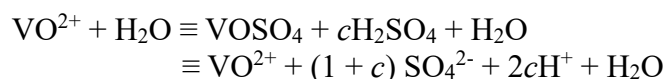
Anód:



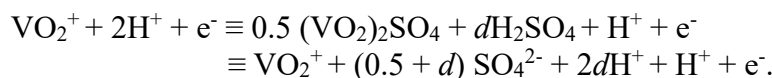
↓TÖLTÉS



A tömegmegmaradás érvényessége miatt a szulfátionok mennyisége nem változhat, ebből adódóan:  $1.5 + a = 1 + b \rightarrow b = 0.5 + a$ . Ennek jelentése, hogy a protonkoncentráció a feltöltés során  $2a$ -ról  $2b = 2(0.5 + a) = 2a + 1$ -re változott, azaz  $1 \text{ mol/l } H^+$  keletkezett, mialatt  $1 \text{ mol/l } V^{3+}$ ,  $V^{2+}$  ionná redukálódott. Kisütött állapotban protont a kénsav és a víz tartalmaz, emiatt mennyisége a reakciók alapján nem változna, tehát az  $1 \text{ mol/l}$  növekménynek az ellentétes oldalról, a membránon kell átdiffundálnia. Katód:



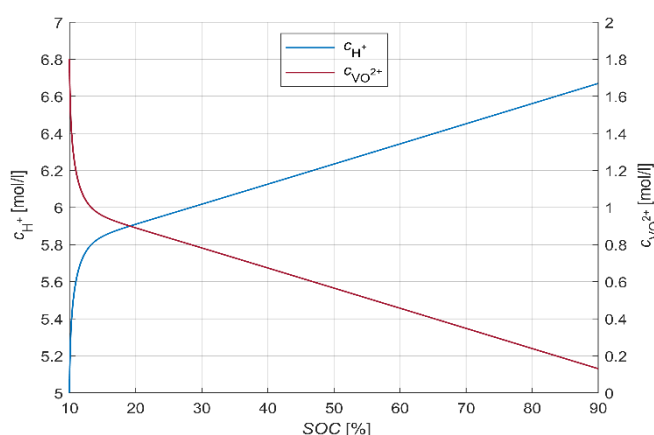
↓TÖLTÉS



A tömegmegmaradás érvényessége miatt, a szulfátionok mennyisége nem változhat, ebből adódóan:  $1 + c = 0.5 + d \rightarrow d = 0.5 + c$ . Kisütött állapotban mind a víz, mind a kénsav tartalmaz protonokat. A víz disszociációja összesen 2 mol/l  $\text{H}^+$ -t eredményez, továbbá a kénsav protonjai is felszabadulnak, mialatt 1 mol/l  $\text{VO}^{2+}$ ,  $\text{VO}_2^+$  ionná oxidálódott. Tehát a protonkoncentráció  $2c$ -ről  $2d = 2(0.5 + c) = 2c + 1$ -re változott. A reakciók alapján önmagában a kénsav protonjai nem okoznának koncentrációnövekedést, viszont a víz disszociációja biztosítja mindkét oldalon a protonkoncentráció növekedését. Ahhoz, hogy a töltésmegmaradás érvényes maradjon 1 mol/l protonnak át kell vándorolnia a katód oldalról az anód oldalra a membránon keresztül. A teljes reakcióegyenletekből levonható konklúzió, hogy feltöltés során, mialatt 1 mol/l  $\text{VO}^{2+}$  oxidálódott, mindkét oldali elektrolit protonkoncentrációja 1 mol/l-el növekedett [31].

A katód oldali protonkoncentráció szerepel az 5.3 alfejezetben szereplő Nernst-egyenletben, mely a cellafeszültség számításához szükséges. A konklúziókból direkt összefüggés állítható fel a  $\text{VO}^{2+}$  ion és a protonkoncentráció között:

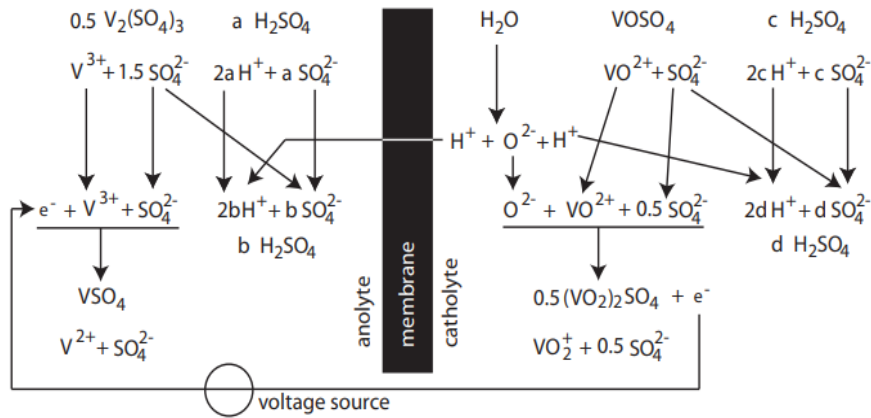
$$c_{\text{H}^+, \text{katód}} = c_{\text{H}^+, \text{katód, kisütött}} + (c_{\text{VO}^{2+}, \text{max}} - c_{\text{VO}^{2+}}), \quad (31)$$



4. ábra.  $\text{H}^+$  és  $\text{VO}^{2+}$  koncentrációja a töltöttség függvényében,  $I=60 \text{ A}$ .

Az 5.2.2 alfejezetben eddig leírtak és az elektrolit összetétele alapján a protonkoncentráció minimális és maximális értékei  $c_{\text{H}^+, \text{min}} = 4,8 \text{ mol/l}$ ,  $c_{\text{H}^+, \text{max}} = 6,8 \text{ mol/l}$ , azonban a működési

tartományt  $SOC_t = 10-90\%$  között határoztuk meg, emiatt a protonkoncentráció nem éri el az elméleti szélesőrtékeket. A teljes reakciókat az. 5. ábra szemlélteti.



5. ábra. Teljes reakciók ábrázolása [31].

### 5.3 Elektromos számítások

Az akkumulátorok legfontosabb jellemzői elektromos szempontból a pillanatnyi teljesítményük és az energiatárolási kapacitásuk. Előbbi a cellák feszültségétől és számától továbbá az áramerősség nagyságától függ. A cellafeszültség meghatározásához szükséges az pillanatnyi ion- és protonkoncentrációk pontos ismerete. Értékeikből a Nernst-egyenlet segítségével meghatározható egy cella nyitottáramkörü feszültsége [4].

$$E_c^{OCV} = E^0 + \frac{\mathcal{R}T}{zF} \ln \left( \frac{c_{V^{2+}} \cdot c_{VO_2^+} \cdot c_{H^+}^2}{c_{V^{3+}} \cdot c_{VO^{2+}}} \right), \quad (32)$$

ahol OCV felsőindex a nyitottáramkörü feszültségre utal,  $E^0 = 1,26$  V a cella standardpotenciálja [31]. Ez a feszültség egyensúlyi állapot esetén áll fenn, amint töltő vagy kisütő áram folyik keresztül a rendszeren, az egyensúlyi állapot nem érvényesül, és a cella feszültsége az aktivációs ( $\gamma_{akt}$ ), koncentrációs ( $\gamma_{kon}$ ), ohmikus ( $\gamma_{ohm}$ ) és ionos ( $\gamma_{ion}$ ) veszteségek hatására megváltozik [31].

$$E_c = E_c^{OCV} \pm \gamma_{akt} \pm \gamma_{kon} \pm \gamma_{ohm} \pm \gamma_{ion}, \quad (33)$$

A veszteségeket rendre a reakciók aktivációs energiáját fedező ( $\gamma_{akt}$ ), a távolféri és az elektród felszínén mérhető koncentrációkülönbségből adódó ( $\gamma_{kon}$ ) többletfeszültség okozza. Az ohmikus veszteségeket a cellát alkotó elemek ohmikus ellenállásának összege adja meg:

$$\gamma_{\text{ohm}} = (R_{\text{el}} + R_{\text{kétpólusú lemez}} + R_{\text{áramgyűjtő}}) \cdot I = R_{\text{ohm}} \cdot I. \quad (34)$$

Ionos veszteségek az elektrolit és a membrán ionárammal szembeni ellenállásából adódnak.

$$\gamma_{\text{ion}} = (R_{\text{e}} + R_{\text{m}}) \cdot I = R_{\text{ion}} \cdot I, \quad (35)$$

Az ismertett veszteségek töltés során növelik, kisütés során pedig csökkentik a cellafeszültséget az egyensúlyi állapothoz viszonyítva. Számításuk időigényes és sok, a szakirodalomban nehezen vagy nem pontosan fellelhető anyagi jellemzőt igényelnek. Értékük helyettesíthető az adott cellára mérésel meghatározható egyenértékű cellaellenállással ( $R_{\text{egyen}}$ ), amely az akkumulátor töltése és kisütése során felvett áramerősség-feszültség diagramból számítható [31]. A cella ellenállása töltés esetén:

$$R_{\text{c,egyen,töltés}} = \frac{R_{\text{A,töltés}}}{A_{\text{el}}}, \quad (36)$$

ahol  $R_{\text{A,töltés}} = 2,9 \Omega\text{cm}^2$ ,  $R_{\text{A,kisütés}} = 3,13 \Omega\text{cm}^2$  a felület ellenállása [20], értékük töltés és kisütés során állandónak tekinthető.  $R_{\text{k}}$  a teljes köteg ellenállása a (36) egyenlet és a cellaszám szorzata. Ezt felhasználva, a cellafeszültség nagysága:

$$E_{\text{c,töltés}} = E_{\text{c}}^{\text{OCV}} + R_{\text{c,egyen,töltés}} I, \quad (37)$$

$$E_{\text{c,töltés}} = E_{\text{c}}^{\text{OCV}} - R_{\text{c,egyen,kisütés}} I. \quad (38)$$

Mivel modellünkben sorba kapcsolt cellákat tartalmazó köteget alkalmazunk, ezért a köteg feszültsége a cellafeszültségek és a cellaszám szorzata.

$$E_{\text{k}} = N \cdot E_{\text{c}}, \quad (39)$$

A kötegfeszültség és a töltő vagy kisütő áramerősség ismeretében meghatározható a köteg teljesítménye, amely soros kapcsolás esetén:

$$P_{\text{k}} = E_{\text{k}} \cdot I = N \cdot E_{\text{c}} \cdot A_{\text{el}} \cdot j, \quad (40)$$

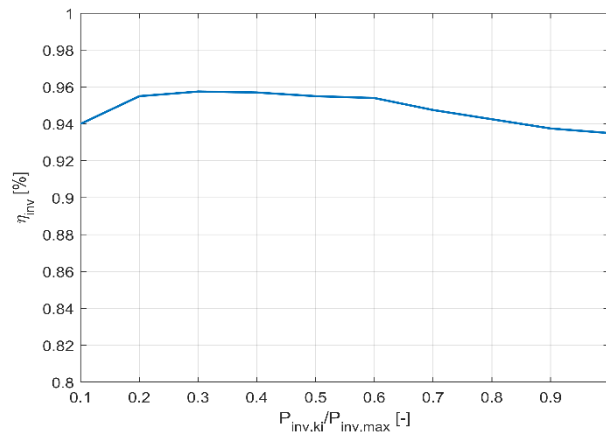
ahol  $j$  az áramsűrűséget jelöli. Az eltárolható energiát (41) egyenlet adja meg [4]:

$$E = \frac{E_c \cdot V_t \cdot F \cdot c_V}{3600}. \quad (41)$$

A vanádium koncentrációja oldhatósága miatt nem haladhatja meg a 2 mol/l-t, továbbá a cellafeszültség az ionkoncentrációk és a hőmérséklet függvénye, ezért értéke nem növelhető tetszőlegesen, illetve a Faraday-állandó értéke konstans; így megállapítható, hogy az eltárolható energia nagysága kizárólag a tartályok térfogatától függ. (40) egyenletből látható, hogy a köteg teljesítménye független a tartályok méretétől. Utóbbi két megállapítás szemlélteti az akkumulátortípus egyik legkedvezőbb tulajdonságát, miszerint energiája és teljesítménye egymástól függetlenül skálázható.

### 5.3.1 Inverter

Az akkumulátor töltéséhez egyenáram szükséges, ugyanakkor kisütésekor a hálózatba váltakozó feszültség táplálendő. A feszültségek közötti váltást az inverter végzi, amelynek hatásfokából adódó veszteségei hőt termelnek és a rendszer önfogyasztását növelik. Hatásfoka a kimenő teljesítmény és a maximális teljesítmény arányától függ, melyre egy széles körben jellemző eset látható a 6. ábrán.



6. ábra. Inverter hatásfok a kimenő teljesítmény és a maximális teljesítmény arányában [32].

Az inverter vesztesége, ami hő formájában jelenik meg, töltés és kisütés esetén a (42) és (43) egyenletből számítható:

$$Q_{\text{inv,töltés}} = P_{\text{inv,be}} - P_{\text{inv,ki}} = \frac{P_k}{\eta_{\text{inv}}} - P_k, \quad (42)$$

$$Q_{\text{inv,kisütés}} = P_{\text{inv,be}} - P_{\text{inv,ki}} = (1 - \eta_{\text{inv}}) \cdot P_k, \quad (43)$$

ahol töltés esetén  $P_k = P_{\text{inv,ki}}$ , míg kisütés esetén  $P_k = P_{\text{inv,be}}$ .

#### 5.4 Hőmérsékletek számítása

A modellezéshez a koncentrált paraméteres leírást alkalmazzuk, ezáltal a hőmérsékleteket számító mérlegegyenleteket a legfontosabb részegységekre, mint csomópontokra szükséges felírni. Feltételezhető, hogy a pozitív és negatív oldal hőtechnikailag azonosan viselkedik, így a rendszer csomópontjai hőtani modellezés során a következők: tartály, csőrendszer befolyóág, csőrendszer kifolyóág, köteg. Konténerbe helyezett rendszer esetén ez kiegészül a konténerben lévő belső levegő és a konténer csomópontokkal. Az ismertetett mérlegegyenletek a részegységekben lévő elektrolit, a belső levegő és a konténer belső falának hőmérsékletét adják eredményül. Az egyenletek felírásához feltételezzük [17], [24] alapján, hogy:

- a részegységeket teljesen megtölti az elektrolit és mint folyamatos, tökéletesen kevert tartályreaktorként viselkednek,
- a részegységekben a koncentráció és a hőmérséklet egyenletes,
- a részegységekben az elektrolit térfogata állandó,
- az önkisülési reakciók azonnalik és ezek az egyetlen mellékreakciók a rendszerben,
- a cellaellenállás értékei állandók,
- töltés és kisütés során R6 és R9 reakciók elhanyagolhatók, mivel végtermékeik  $\text{VO}^{2+}$  és  $\text{V}^{3+}$  az R4 és R8 reakciókon keresztül az R5 és R7 reakcióval megegyező végterméket eredményez.

Ezen feltételezések alapján az elektrolitot tároló tartályra felírt energiamérlegegyenlet:

$$\rho_e(T_t)c_{p,e}V_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = \dot{V}_k \rho_e(T_t)c_{p,e}(T_{\text{cs,ki}} - T_t) + U_t A_t (T_{\text{lev}} - T_t) - Q_{\text{rad,t}}, \quad (44)$$

ahol ki alsóindex a kifolyó ági csőrendszerre,  $U$  a hőátviteli tényezőre,  $Q$  a hőáramra, rad alsóindex a hőszugárzásra utal. A tartályokban a hőmérséklet időbeli változását a kötegből



kivezető csőrendszeren érkező magasabb hőmérsékletű elektrolit, illetve a tartály falán keresztül hőátadás útján távozó hőmennyiség okozza. A hőátadást leíró egyenletek forrása: [23]. Továbbá jelentős szerepe van a tartály és a konténer belső fala közötti sugárzásos hőcserének is [33]. Utóbbi tagot a szakirodalmak nagy része elhanyagolja. Konténer nélküli esetben:

$$Q_{\text{rad,t}} = \varepsilon_t A_t \sigma \cdot (T_t^4 - T_{\text{lev}}^4), \quad (45)$$

ahol  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  a Stefan-Boltzmann-állandó. Konténerbe helyezve:

$$Q_{\text{rad,t}} = \frac{\sigma \cdot (T_t^4 - T_{\text{kont}}^4)}{\left( \frac{1 - \varepsilon_t}{A_t \varepsilon_t} + \frac{1}{A_t \varphi_{t,\text{kon}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{kont}}}{A_{\text{kont}} \varepsilon_{\text{kont}}} \right)}, \quad (46)$$

(46) egyenletben  $\varphi_{t,\text{kont}} = 0,9$  a tartály és konténer közötti sugárzási tényező. A többi részegység esetében, a kis felület miatt a sugárzásos hőcsere elhanyagolható, érdemben nem befolyásolja a hőmérsékletváltozást. A sugárzási tényezők meghatározása az Ansys végeelem szoftver Mechanical moduljában futtatott végeelemes szimulációk alapján történt.

A kötegbe be- és kifolyó csőrendszer energiamérlegegyenlete a következő:

$$\rho_e(T_{\text{cs,be}}) c_{p,e} V_{\text{cs}} \frac{\partial T_{\text{cs,be}}}{\partial t} = \dot{V}^p \rho_e(T_{\text{cs,be}}) c_{p,e} (T_t - T_{\text{cs,be}}) + U_{\text{cs,be}} A_{\text{cs}} (T_{\text{lev}} - T_{\text{cs,be}}) + P'_{\text{sz}}, \quad (47)$$

$$\rho_e(T_{\text{cs,ki}}) c_{p,e} V_{\text{cs}} \frac{\partial T_{\text{cs,ki}}}{\partial t} = \dot{V}^p \rho_e(T_{\text{cs,ki}}) c_{p,e} (T_k - T_{\text{cs,ki}}) + U_{\text{cs,ki}} A_{\text{cs}} (T_{\text{lev}} - T_{\text{cs,ki}}). \quad (48)$$

A szivattyúk a befolyó ágba vannak beépítve, melyek a lapátkerekek és az elektrolit közötti súrlódás útján hőt vihetnek a rendszerbe ( $P'_{\text{sz}}$ ). A kötegben a többi részegységhez viszonyítva összetettebb folyamatok játszódnak le, melyek hatással vannak a hőmérsékletváltozására. Így a legintenzívebb hőingadozás és a hőmérsékletek szélsőértékei is itt figyelhetők meg, ezért a kritikus hőmérséklettartományból való kilépés is elsősorban a kötegen belül érhető tetten. A hőmérsékletváltozást egyrészt a pozitív és negatív oldalról beáramló más hőmérsékletű elektrolit, másrészt a hőátadás útján távozó hőmennyiség okozza. Jelentős befolyása van a Joule-hőnek is, mely töltés esetén  $Q_{\text{Joule}} = I^2 R_{\text{egyen,töltés}}$ , míg kisütéskor  $Q_{\text{Joule}} = I^2 R_{\text{egyen,kisütés}}$  [34]. A kötegben lejátszódó reakciók entalpiaváltozása tovább növelik a hőmérsékletét, mivel mindegyik reakció exoterm. A reakcióentalpiák,  $\Delta H$  értékeit, az 5. táblázat tartalmazza, alsóindexben jelölve a reakció számát.

5. táblázat. Reakcióentalpiák [24].

$\Delta H_{(R7)}$	-220	[kJ/mol]
$\Delta H_{(R8)} = \Delta H_{(R6)}$	-64	[kJ/mol]
$\Delta H_{(R4)} = \Delta H_{(R9)}$	-91,2	[kJ/mol]
$\Delta H_{(R5)}$	-246,8	[kJ/mol]

A részletezett, hőmérsékletváltozást okozó hatásokat összegezve, az energiamérlegegyenlet a köteg esetén normál üzemállapotban:

$$\rho_e(T_k)c_{p,e}V_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \dot{V}^p \rho_e(T_k)c_{p,e}(T_{cs,be} - T_k) + \dot{V}^n \rho_e(T_k)c_{p,e}(T_{cs,be} - T_k) + U_k A_k (T_{lev} - T_k) + I^2 R_k + N \left( D_{V2^+} c_{V2^+} (-\Delta H_{(R7)}) + D_{V3^+} c_{V3^+} (-\Delta H_{(R8)}) + D_{VO2^+} c_{VO2^+} (-\Delta H_{(R4)}) + D_{VO2^+} c_{VO2^+} (-\Delta H_{(R5)}) \right) \frac{A_e}{d_m}. \quad (49)$$

Önkisülés 1. fázis:

$$\rho_e(T_k)c_{p,e}V_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = U_k A_k (T_{lev} - T_k) + N \left( D_{V2^+} c_{V2^+} (-\Delta H_{(R7)}) + D_{V3^+} c_{V3^+} (-\Delta H_{(R8)}) + D_{VO2^+} c_{VO2^+} (-\Delta H_{(R4)}) + D_{VO2^+} c_{VO2^+} (-\Delta H_{(R5)}) \right) \frac{A_e}{d_m}. \quad (50)$$

Önkisülés 2a fázis:

$$\rho_e(T_k)c_{p,e}V_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = U_k A_k (T_{lev} - T_k) + N \left( D_{V3^+} c_{V3^+} (-\Delta H_{(R8)}) + D_{VO2^+} c_{VO2^+} (-\Delta H_{(R6)}) \right) \frac{A_e}{d_m}. \quad (51)$$

Önkisülés 2b fázis:

$$\rho_e(T_k)c_{p,e}V_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = U_k A_k (T_{lev} - T_k) + N \left( D_{V2^+} c_{V2^+} (-\Delta H_{(R9)}) + c_{VO2^+} (-\Delta H_{(R4)}) \right) \frac{A_e}{d_m}. \quad (52)$$

Önkisülés 3. fázis:

Mivel ebben a fázisban nem játszódnak le reakciók és a zérus áramerősség mellett a szivattyúk is kikapcsoltak, a köteg hőmérsékletváltozását tisztán a hőátadás befolyásolja.

$$\rho_e(T_k)c_{p,e}V_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = U_k A_k (T_{lev} - T_k). \quad (53)$$

### 5.4.1 Konténer

Konténerbe helyezve csökkenthetők a részegységek különböző hőtehetetlenségeiből adódó hőmérsékletszabályozási nehézségek és hűtésük is egyszerűbben, koncentráltabban oldható meg. Ebben az esetben a belső levegő energiamérlege:

$$\rho_{\text{lev,belső}}(T_{\text{lev,belső}})c_{p_{\text{lev,belső}}}(T_{\text{lev,belső}})V_{\text{lev,belső}}\frac{\partial T_{\text{lev,belső}}}{\partial t} = U_{\text{kont,belső}}A_{\text{kont,belső}}(T_{\text{kont}} - T_{\text{lev,belső}}) + 2 \cdot U_t A_t (T_t - T_{\text{lev,belső}}) + 2 \cdot U_{\text{cs,be}} A_{\text{cs}} (T_{\text{cs,be}} - T_{\text{lev,belső}}) + U_k A_k (T_k - T_{\text{lev,belső}}) + 2 \cdot U_{\text{cs,ki}} A_{\text{cs}} (T_{\text{cs,ki}} - T_{\text{lev,belső}}) + Q_{\text{inv}}, \quad (54)$$

ahol  $V_{\text{lev,belső}} = V_{\text{kont,belső}} - (V_k + 2V_t + 4V_{\text{cs}}) = 18,51 \text{ m}^3$ . Amennyiben az inverter a konténer belső oldalára van felszerelve a működéséből származó hőmennyiség melegíti a belső levegőt. Ez télen, alacsony hőmérsékletek mellett előnyös, mivel további berendezés nélkül lehet a részegységek hőmérsékletét az ajánlott hőmérséklettartományhoz közelíteni. Nyáron ugyanakkor növeli a hűtésigényt, így szigetelt invertert feltételezve a belső levegőre gyakorolt hatását elhanyagolom.

A globálsugárzás és a tájolás elhanyagolásával a konténer falára felírt mérlegegyenlet:

$$\rho_{\text{kont}}c_{p_{\text{kont}}}V_{\text{kont}}\frac{\partial T_{\text{kont}}}{\partial t} = U_{\text{kont,belső}}A_{\text{kont,belső}} \cdot (T_{\text{lev,belső}} - T_{\text{kont}}) + U_{\text{kont,külső}}A_{\text{kont,külső}} \cdot (T_{\text{lev}} - T_{\text{kont}}) + 2 \cdot Q_{\text{rad,t}} - Q_{\text{rad,kont,ki}}, \quad (55)$$

ahol az első és második tag a konténer fala és a belső levegő, illetve a fal és környezeti levegő közötti hőátadás útján átadódó hőmennyiség. Ezen felül a konténer belső oldalára hőt sugároz a két elektrolit tartály. Amennyiben a konténer fala melegebb a tartályoknál és a konténer fala ad le hőt a tartályoknak sugárzás által, (46) egyenlet továbbra is érvényes, mivel a reciprocitás értelmében  $A_t \varphi_{t,\text{kont}} = A_{\text{kont}} \varphi_{\text{kont,t}}$  [33]. A falról a környezet felé kisugárzott hő [33]:

$$Q_{\text{rad,kont,ki}} = \varepsilon_{\text{kont}} A_{\text{kont,sug}} \sigma \cdot (T_{\text{kont}}^4 - T_{\text{lev}}^4), \quad (56)$$

ahol  $A_{\text{kont,sug}} = A_{\text{kont,külső}} - A_{\text{kont,padló,külső}}$ .

További környezeti hatásként figyelembe veendő a konténert érő globálsugárzás is. Hatására a konténer falait további hőmérsékletnövelő hatás éri, ezáltal a belső levegő hőmérséklete is magasabb értékeket ér el, ugyanakkor a magasabb falhőmérsékletek következtében a környezet felé hőszugárzás útján leadott hőmennyiség is megnő, amely

csökkenti a globálsugárzás melegítő hatását. További hatásként jelentkezik a tartályok és a fal közötti kisebb hőmérsékletkülönbség okozta alacsonyabb hősugárzási veszteség, aminek szintén hőmérsékletnövelő hatása van a tartályok esetében. Vagy a konténer falhőmérséklete megnő, ezáltal sugárzás útján melegíti a tartályokat. Mivel az égtájak szerint különböző mértékű sugárzás éri a konténert így azt további, észak, dél, kelet, nyugat, tető, padló csomópontokra szükséges bontani, ahol a tetőt a vízszintes felületeket érő sugárzás melegíti, míg a padlót nem éri sugárzás. A felhasznált globálsugárzás adatok a Marczell György Főobszervatóriumból származnak [35], amelyből a R. Perez által javasolt transzpozíciós modellel kerültek átszámításra vízszintes és függőleges irányba, utóbbiakat tovább bontva égtájak szerint [36]. Az adott szimulációhoz felhasznált értékek a 13. ábrán láthatók. A bevezetett csomópontokkal a belső levegő mérlegegyenlete a következő:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{lev,belső}}(T_{\text{lev,belső}})c_{p_{\text{lev,belső}}}(T_{\text{lev,belső}})V_{\text{lev,belső}}\frac{\partial T_{\text{lev,belső}}}{\partial t} = & U_{\text{kont,h1,belső}}A_{\text{kont,h1,belső}} \cdot \\ & (T_{\text{kont,h1}} - T_{\text{lev,belső}}) + U_{\text{kont,h2,belső}}A_{\text{kont,h2,belső}}(T_{\text{kont,h2}} - T_{\text{lev,belső}}) + U_{\text{kont,r1,belső}} \cdot \\ & A_{\text{kont,r1,belső}}(T_{\text{kont,r1}} - T_{\text{lev,belső}}) + U_{\text{kont,r2,belső}}A_{\text{kont,r2,belső}} \cdot (T_{\text{kont,r2}} - T_{\text{lev,belső}}) + \\ & U_{\text{kont,tető,belső}}A_{\text{kont,tető,belső}}(T_{\text{kont,tető}} - T_{\text{lev,belső}}) + U_{\text{kont,padló,belső}}A_{\text{kont,padló,belső}} \cdot \\ & (T_{\text{kont,padló}} - T_{\text{lev,belső}}) + 2 \cdot U_t A_t (T_t - T_{\text{lev,belső}}) + 2 \cdot U_{\text{cs,be}} A_{\text{cs}} (T_{\text{cs,be}} - T_{\text{lev,belső}}) + \\ & U_k A_k (T_k - T_{\text{lev,belső}}) + 2 \cdot U_{\text{cs,ki}} A_{\text{cs}} (T_{\text{cs,ki}} - T_{\text{lev,belső}}) + Q_{\text{inv}}, \end{aligned} \quad (57)$$

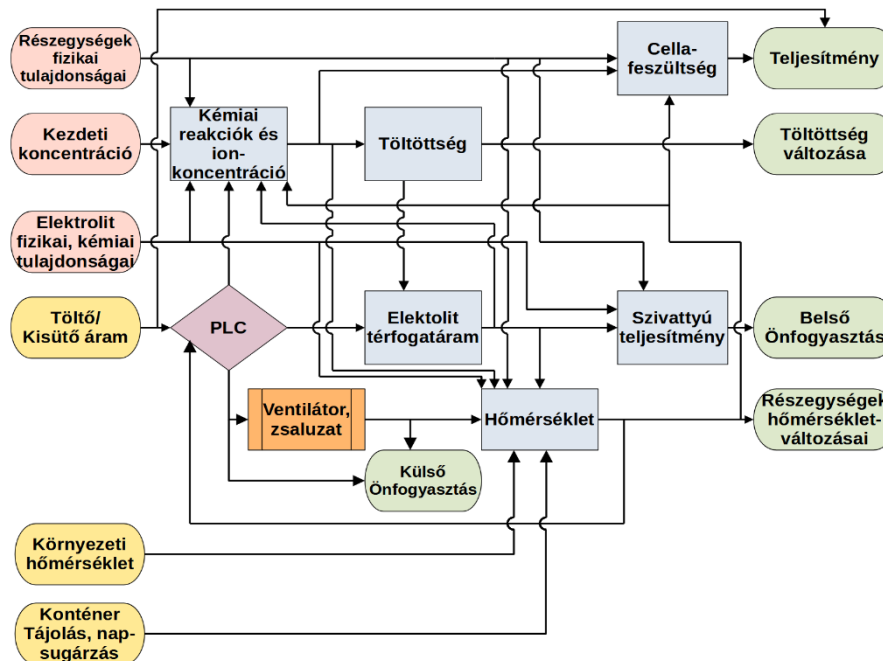
ahol a rövidebb leírás érdekében az alsóindexekben h1, h2 a hosszú függőleges oldalakat, r1, r2 a rövid függőleges oldalakat jelenti. A globálsugárzás hatására a belső levegőt érő hatások nem változtak, mindössze a csomópontok száma növekedett. A falakat érő hatások mindegyik falnál megegyeznek, kivéve a padlót nem érő sugárzást. A tetőre felírt mérlegegyenlet:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{kont}}c_{p_{\text{kont}}}V_{\text{kont,tető}}\frac{\partial T_{\text{kont,te}}}{\partial t} = & U_{\text{kont,tető,belső}}A_{\text{kont,tető,belső}} \cdot (T_{\text{lev,belső}} - T_{\text{kont,tető}}) + \\ & U_{\text{kont,tető,külső}}A_{\text{kont,külső}}(T_{\text{lev}} - T_{\text{kont,tető}}) + 2 \cdot Q_{\text{rad,t}} \cdot \frac{A_{\text{kont,tető,belső}}}{A_{\text{kont,belső}}} - \varepsilon_{\text{kont}}A_{\text{kont,tető,külső}}\sigma \cdot \\ & (T_{\text{kont,tető}}^4 - T_{\text{lev}}^4) + G_v A_{\text{kont,tető}}\alpha_{\text{kont}}, \end{aligned} \quad (58)$$

ahol  $G_v$  a vízszintes globálsugárzás  $W/m^2$ -ben,  $\alpha_{\text{kont}} = 0.85$  a konténer falának abszorpciós tényezője, amely a Kirchhoff-törvény értelmében megegyezik az emissziós tényezőjével [37]. A tartályokról érkező sugárzás a tető belső felületének a konténer teljes belső felületéhez viszonyított arányában nyelődik el.

## 5.5 A modell folyamatábrája

Az előző pontokban leírt számítások kölcsönösen hatással vannak egymásra, így az egyes fizikai hatások önállóan csak nehezen értékelhetők. A részfolyamatok közötti kapcsolatokat és a modell teljes folyamatábráját összefoglalóan a 7. ábra szemlélteti.

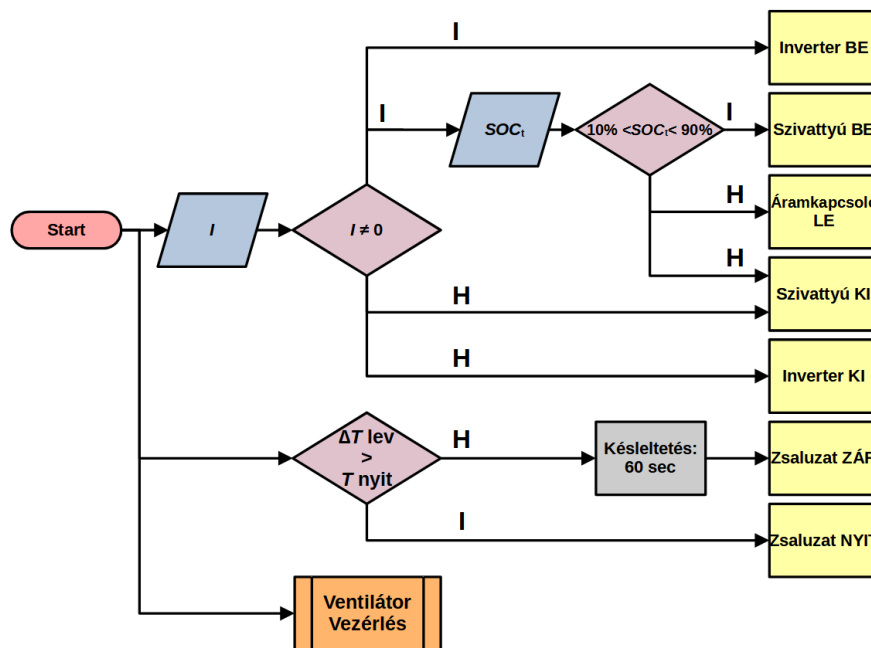


7. ábra. A modell teljes folyamatábrája. Vörös: konstans bemenetek, Arany: változó bemenetek, Kék: számítások, Zöld: Kimenetek, Lila: PLC vezérlő, Narancssárga: hőmérsékletszabályzás.

A PLC (programozható logikai vezérlő) vezérlő részletes folyamatait a 8. ábra szemlélteti. A vörössel jelzett konstans bemenetek az akkumulátor tervezésénél meghatározott paraméterek, mint például cellaszám, tartály térfogat, elektrolit összetétel. Míg az arany jelölésű bemenetek időben változnak, folyamatosan változtatva a számítás kimenteit. Kékkel jelölve a hidraulikai, elektromos, kémiai és hőtani számítások láthatóak, a közöttük lévő kapcsolatot nyilak szemléltetik. Központi eleme a modellnek a PLC vezérlő, mely kontrollálja a folyamatokat és biztosítja a rendszer biztonságos működését.

### 5.5.1 PLC vezérlő

A kapcsolási feladatok végrehajthatók egy PLC vezérlővel, így egy darab vezérlőegység elegendő a kiegészítőberendezések vezérlésére. Azonban a vezérlőnek is van egy állandó elektromos teljesítményfelvétele, melyet a vezérelt szerelemek teljesítményigényével együttesen 10 W-nak feltételezünk, és a külső önfogyasztást növeli.



8. ábra. PLC vezérlő folyamatábrája. I=IGAZ, H=HAMIS.

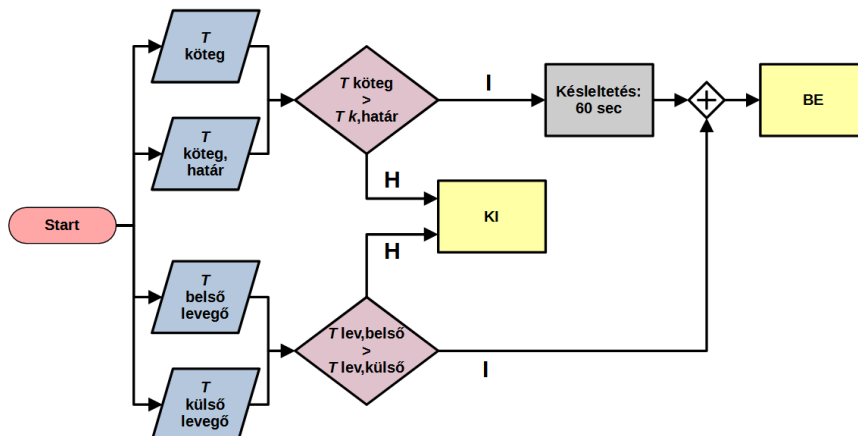
A PLC feladatai a 8. ábrán láthatók, ahol sárgával a kapcsolási feladatok, lilával az ellenőrizendő feltételek, sötétkékekkel pedig az adott felirattal jelölt adatok vannak jelölve. Feladatai közé tartozik többek között az inverter bekapcsolása, amennyiben van töltő vagy kisütő áram, illetve annak megszűntekor lekapcsolja az invertert. Töltés vagy kisütés során beindítja a szivattyúkat, amennyiben a tartályok töltöttsége az előre meghatározott 10-90% százalék közötti tartományban van, így az akkumulátor megvédhető a túltöltéstől és a teljes kisütéstől. A töltöttségi tartományból kilépve a PLC lekapcsolja az áramot és leállítja a szivattyúkat.

Ezen felül ebben az egységben történik a hőmérséklet szabályzás is, mely a zsaluzatból és a ventilátorból áll. A 40°C-os felső hőmérsékleti határ közelében, alacsony terhelés esetén a zsaluzat nyitásával, egyidejűleg a hűvösebb külső levegő beáramlásával is kellő hőmérsékletcsökkenés érhető el a részegységek esetében.  $\Delta T_{lev, szabályzás, nélkül} = T_{lev, belső} - T_{lev, külső}$  a konténerben lévő és a külső levegő közötti hőmérsékletkülönbséget jelenti, míg  $T_{nyit}$  egy előre meghatározott hőmérsékletkülönbség, amely felett a zsaluzat kinyílik. Előfordulhat, hogy a hőmérséklet-különbség a nyitási hőmérséklet körül ingadozik. Ebben az esetben egy késleltetés közbeiktatásával elkerülhető a zsaluzat nyitogatása, mivel egy nyitást követően legalább 60 másodpercig nem érkezik más értékű vezérlőjel a zsaluzatot mozgató elektromotorokhoz. Nagyobb hűtésigény esetén a külső levegő természetes úton való bejutása nem elegendő. Ekkor

szükséges a hűtőventilátorok bekapcsolása, melynek részletes vezérlése a következő alfejezetben olvasható.

### 5.5.2 Ventilátor

Nagyobb hűtésigény esetén a ventilátorokkal megvalósított léghűtés az egyik legegyszerűbb és leggazdaságosabb megoldás az akkumulátor részegységeinek melegedési problémáira. A konténer falára egyszerűen felerősíthető és már viszonylag kis fogyasztású ventilátorok is kellően nagy légáramlást biztosítanak, amely növeli a hőátadási tényezőt a részegységek felületein, ezáltal a hőátadás útján távozó hőmennyiséget. Azonban az elektromos teljesítményfelvételük növeli a rendszer önfogyasztását. A ventilátor vezérlésének folyamatábrája a 9. ábrán látható. A bekapcsolás két feltétele, hogy a külső levegő hőmérséklete meghaladja a belső levegőét és a köteg hőmérséklete magasabb legyen egy általunk megválasztott határértéknél. Mivel legelőször a köteg hőmérséklete lépi túl a felső határértéket, továbbá egy kisebb hőtehetetlenséggel rendelkező részegység a tartályokhoz viszonyítva, ezért érdemes a ventilátor vezérlését köteg hőmérsékletéhez igazítani. A késleltetést, vagy zero order hold blokk beépítését az indokolja, hogy előfordulhat, hogy a köteg hőmérséklete a megválasztott határérték körül ingadozik. A kis hőtehetetlenség miatt az ingadozás gyors lehet, ebben az esetben a ventilátor folyamatos ki-be kapcsolgatása történne. A ventilátor térfogatáramához viszonyítva a konténerben lévő levegő térfogata elegendően kicsi, hogy feltételezzük, a ventilátorok bekapcsolása utáni időpillanatban a belső levegő hőmérséklete megegyezik a külső levegő hőmérsékletével, részletes indoklása a 6.2.2 alfejezetben olvasható. Ehhez szükséges egy elméleti belső levegő hőmérséklet számítása is a ventilátorok bekapcsolt állapotában, amely (54) és (57) alapján kiszámított hőmérséklet a külső levegő beáramoltatása nélkül. Ezáltal a második feltétel is folyamatosan ellenőrizhető.



9. ábra. Ventilátor vezérlés folyamatábrája. I=IGAZ, H=HAMIS.

A különböző paraméterekkel végzett szimulációk közötti összehasonlításhoz érdemes megvizsgálni a ventilátor működési idejét a futtatás alatt:

$$t_{\text{ventilátor}} = \int_0^{t_{\text{vég}}} y_{\text{ventilátor}}(t) dt, \quad (59)$$

ahol  $t_{\text{ventilátor}}$  a ventilátor üzemideje,  $t_{\text{vég}}$  a szimuláció végét jelentő időpillanat,  $y_{\text{ventilátor}}$  a ventilátor kapcsolási függvénye, mely bekapcsolt állapotban 1, kikapcsolt állapotban 0 értéket vesz fel. A ventilátor üzemideje a vizsgált intervallumon belül százalékban kifejezve is kiváló összehasonlítási alapot biztosít különböző beállítások kiértékeléséhez:

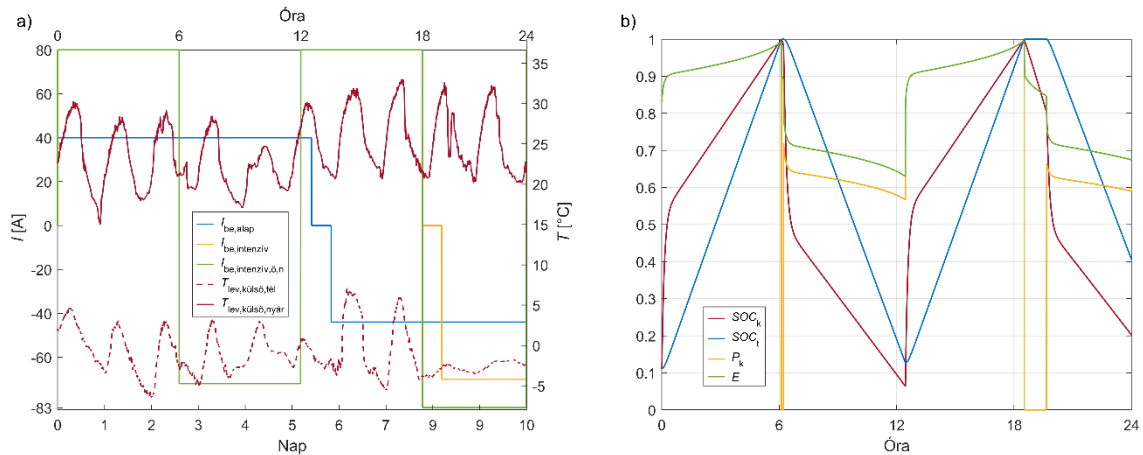
$$y_{\text{ventilátor},\%} = \frac{t_{\text{ventilátor}}}{t_{\text{vég}}}. \quad (60)$$

## 6. Eredmények

Az eredmények ismertetésekor az elsődleges cél a hőmérsékletértékek bemutatása kiegészítve a 7. ábrán látható további kimeneti paraméterekkel. Eredményeim két fő alfejezetre bontva láthatók a hőmérséklet-szabályzás függvényében. A bemeneti paraméterek mindvégig azonosak, hogy a különböző kiegészítő berendezések, környezeti változások hatásai egyszerűbben kiértékelhetők legyenek. Kiinduló állapotban az akkumulátor kiegészítő berendezések és hőmérséklet-szabályzás nélkül szerepel, melyre referencia esetként hivatkozok a szöveg további részében. A referencia esetben végzett futtatások eredményei alapján különböző kiegészítő berendezések beépítése, hőmérséklet-szabályzás és további külső környezeti hatások figyelembevétele szükséges. Hatásait egyesével mutatom be, lépésenként közeledve a szükséges 5-40°C-os hőmérséklettartomány betartásához.



## 6.1 Téli és nyári üzem vizsgálata hőmérséklet-szabályzás nélkül



10. ábra. a) Téli és nyári külső hőmérsékletek és töltési/kisütési görbék. Kék: alacsony intenzitású felhasználás. Sárga: intenzív felhasználás önkisüléssel. Zöld: intenzív felhasználás önkisülés nélkül. b) Nyári intenzív felhasználás önkisüléssel eset kimenetei a maximális értékükkel dimenzióatlanított formában.

A 10a ábrán láthatók a 10b, 11, 12, 14, 15, 16. ábrán bemutatott eredményekhez felhasznált bemeneti paraméterek. Vörös szín jelöli a 2020. januárjából és augusztusából vett 10 napos időszakok környezeti hőmérséklet értékeit. Az 1 perces felbontású adatok a Marzell György Főobszervatóriumból származnak [35]. A töltés-kisütés görbék 24 óránként ciklikusan ismétlődnek és rendre egy alacsony intenzitású, 1 órás készenléti állapottal rendelkező (kék), egy intenzív szintén 1 órás készenléti állapottal rendelkező (sárga) és egy intenzív készenléti állapot nélküli felhasználást (zöld) mutatnak be. Utóbbi az optimalizált töltés-kisütés görbét hivatott bemutatni, mikor az önkisülési időszak minimalizálásával csökkentjük a részegységek hőmérsékletét. A készenléti állapotok szerepe az önkisülési folyamatok hőtermelésének bemutatása. Alacsony felhasználás esetén 40 A-el 13 órán töltjük az akkumulátort majd a készenlét után 10 óras 44 A-es kisütés következik. Intenzív felhasználás esetén 6-6 órás töltés-kisütés időszakok követik egymást rendre 80-72-80-83 A-rel, kiegészülve a 18. óra után következő készenléti időszakokkal.

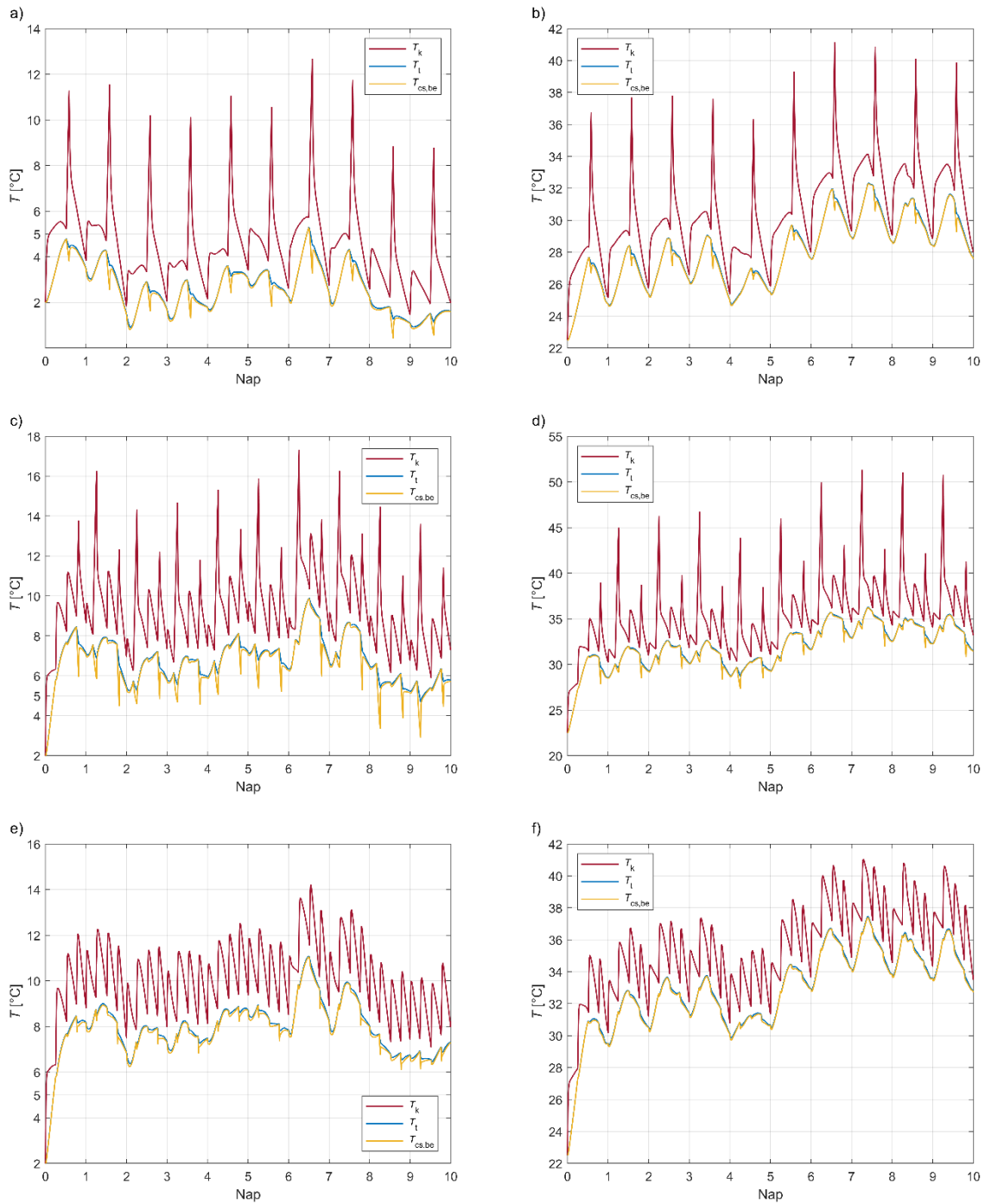
A 10b ábrán látható kimenetek a maximális értékükhöz viszonyított dimenzióatlan formában szerepelnek. 6 órás 80 A-es töltést követően mind a köteg, mind a tartályok elérik a maximálisként megengedett 90%-os töltöttséget. Ekkor mérhető a köteg maximális teljesítménye és a tárolt energia maximuma is, melyek rendre 2,59 kW és 18,23 kWh. Ezen maximális értékek a második töltési ciklus végén megismétlődnek 18 óra 30 perccel a kezdést követően. Ezzel szemben a kisütés alatt mérhető maximális teljesítmény 2,07 kW, mely jelentős teljesítménycsökkenés a töltésgényhez képest. Az eltérés az 5.3 alfejezetben ismertett veszteségekből adódik. Az 1 órás önkisülési fázis alatt a köteg 18,8%-ot veszített töltöttségéből.

### 6.1.1 Kiegészítő berendezések nélkül

A 11. ábrán a részegységek hőmérsékletei láthatóak a 10a ábrán bemutatott bementek esetén. Télen önkisüléssel rendelkező esetekben a hőmérséklet növelése, nyáron pedig mindegyik esetben az akkumulátor hűtése szükséges az 5-40°C-os tartományban tartás érdekében. Megállapítható, hogy az önkisülési időszak elkerülése, megfelelően megválasztott töltés-kisütés görbével több szempontból is előnyös lehet. Egyrészt, téli környezetben jelentősen emeli minden részegység minimum hőmérsékletét, így akár vastag szigetelés alkalmazása is elkerülhető, másrészt nyáron, a magas hőtermeléssel járó reakciók lejátszódásának hiánya egyszerűsíti a szükséges hűtés megvalósítását. Alacsony intenzitású felhasználás esetén, télen a köteg hőmérséklete – ahol az elektródokon a kicsapódás lejátszódhat – az önkisülési időszakokat leszámítva csak néhány alkalommal emelkedik 5°C fölé. Intenzív felhasználás esetén, ugyan a köteg hőmérséklete a betartandó alsó határ fölé emelkedik, azonban a tartályok hőmérséklete egy alkalommal ez alá hűl. Az önkisülési időszakok alatt a csövek hőmérséklete látványosan lecsökken kis hőtehetetlenségüknek köszönhetően, míg a tartályok esetén nagy térfogatuknak köszönhetően kevésbé jelentős ez a folyamat. Nyári környezetben, az önkisülési reakciók jelentős hőtermelésének köszönhetően, már alacsony felhasználás esetén is három alkalommal emelkedik a köteg hőmérséklete a megengedett határérték fölé. Az intenzív felhasználások esetén a magasabb minimum hőmérséklet annak is köszönhető, hogy az éjszakai lehűlés alatt ismét a nagyobb hőtermeléssel járó töltés zajlik és az önkisülés is az éjszakai órákra esik. A nyitottáramkörü feszültség hőmérsékletfüggése miatt a kisütési maximális teljesítmény télen alacsonyabb az alacsonyabb hőmérsékletek miatt, ugyanakkor a töltéshez szükséges teljesítmény is csökken. Mivel a cellafeszültség hatással van az eltárolható energiára is, így a téli hidegebb környezet kapacitásvesztéssel jár. Az energia és teljesítmények értékei összefoglalva a 6. táblázatban olvashatók.

6. táblázat. Referencia esetek maximális töltési, kisütési teljesítményeik és a maximális eltárolható energia.

	$P_{k,töltés,max}$ [kW]	$P_{k,kisütés,max}$ [kW]	$E_{max}$ [kWh]
Tél, alacsony	1,19	1,10	16,73
Nyár, alacsony	1,21	1,10	16,98
Tél, intenzív ök.	2,50	1,69	17,59
Nyár, intenzív ök.	2,54	1,69	17,84
Tél, intenzív ök. nélkül	2,53	2,03	17,08
Nyár, intenzív ök. nélkül	2,59	2,07	18,23



11. ábra. Részegységek hőmérsékletei referencia esetben. a) téli üzem alacsony felhasználás. b) nyári üzem alacsony felhasználás. c) téli üzem intenzív felhasználás önkiszüléssel. d) nyári üzem intenzív felhasználás önkiszüléssel. e) téli üzem intenzív felhasználás önkiszülés nélkül. f) nyári üzem intenzív felhasználás önkiszülés nélkül.

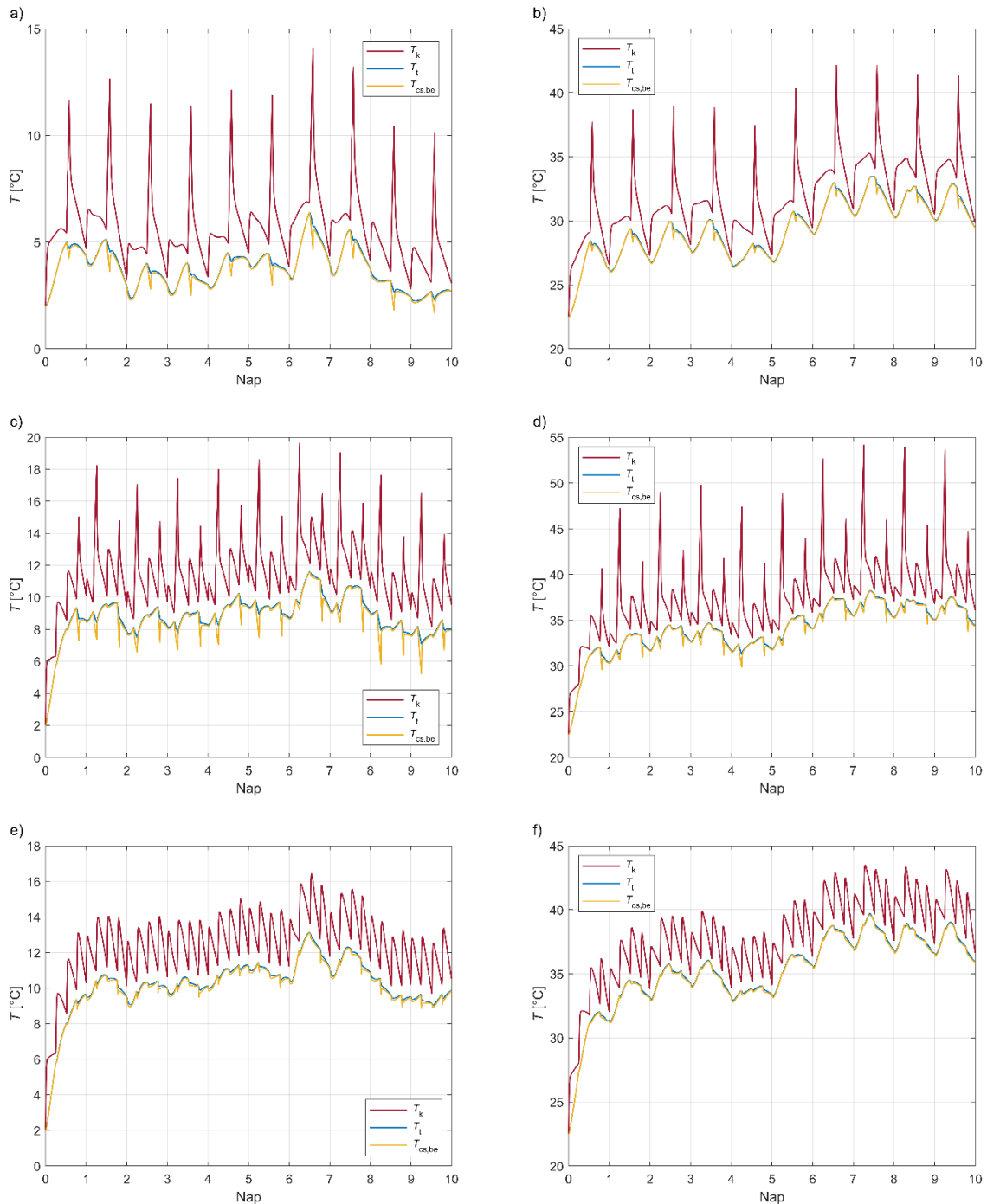
### 6.1.2 Az akkumulátor konténerbe helyezésének hatásai

A 6.1.1 alfejezetben megállapított szükséges hűtés egyszerűbb megvalósítása és télen az akkumulátor körül lévő léghőmérséklet növelésének érdekében érdemes lehet az akkumulátort konténerbe helyezni, melynek további előnye az időjárási jelenségektől való védettség biztosítása. A megfelelő konténer paraméterei a 4. alfejezetben, míg a hőmérsékletre gyakorolt hatásuknak a részletes leírása az 5.4.1 alfejezetben olvashatók.

7. táblázat. Maximális töltési, kisütési teljesítmény és a maximális eltárolható energia konténerbe helyezve.

	$P_{k,töltés,max}$ [kW]	$P_{k,kisütés,max}$ [kW]	$E_{max}$ [kWh]
Tél, alacsony	1,19	1,10	16,74
Nyár, alacsony	1,21	1,10	17,00
Tél, intenzív ök.	2,50	1,69	17,62
Nyár, intenzív ök.	2,51	1,69	17,85
Tél, intenzív ök. nélkül	2,52	2,03	17,78
Nyár, intenzív ök. nélkül	2,59	2,09	18,19

A 6. és 7. táblázat összehasonlításából megállapítható, hogy a konténerbe helyezés nem okoz érdemi változást az akkumulátor maximális teljesítményében és az eltárolható energia nagyságában. Továbbá a 12a ábrán szereplő téli, alacsony felhasználású eset eredményei megmutatják, hogy a konténerbe helyezés önmagában nem elegendő a részegységek minimum hőmérsékletének az alsó határ felett tartásához, mivel az átlagos hőmérséklet-növekedés 2°C körül alakul. Ekkora növekedés azonban intenzív felhasználás esetén már télen biztosítja az akkumulátor biztonságos hőmérséklettartományban tartását. A konténerben lévő magasabb léghőmérséklet nyári felhasználás esetén tovább növeli a felső határon való túllépések számát. Különösen az önkisüléssel rendelkező intenzív felhasználás esetén látványos az eltérés a referenciaesethez képest, mivel már a napi második töltési ciklusok végén is a felső határ fölé emelkedik a köteg hőmérséklete. Önkisülés nélküli esetben is, az 5. naptól kezdődően, a rövid éjszakai időszakokat leszámítva folyamatosan 40°C felett van a köteg hőmérséklete. Ez az első négy napban az alacsonyabb éjszakai és nappali maximum környezeti hőmérsékletek miatt nem következik be.

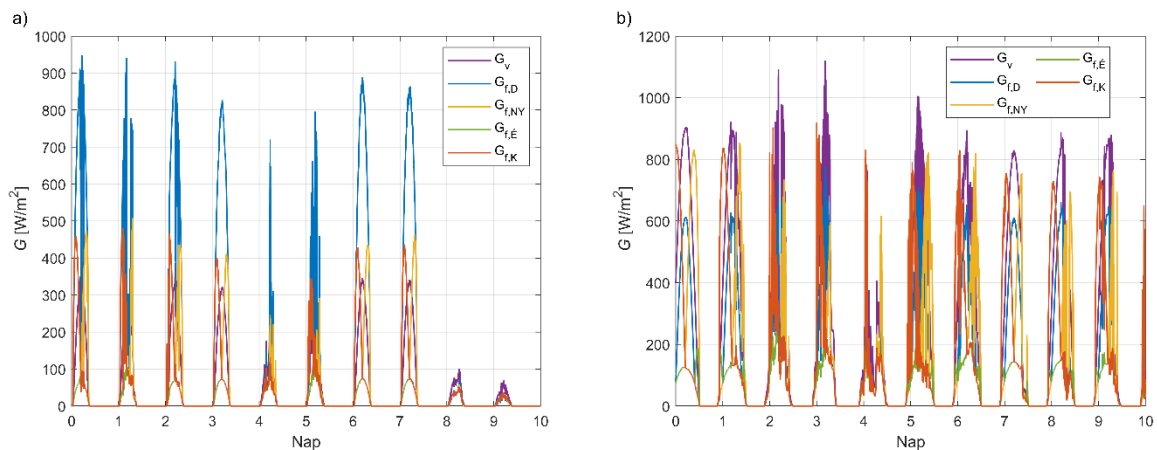


12. ábra. Részegységek hőmérsékletei az akkumulátort konténerbe helyezve, globálsugárzást, tájolást figyelmen kívül hagyva. a) téli üzem alacsony felhasználás. b) nyári üzem alacsony felhasználás. c) téli üzem intenzív felhasználás önkiszüléssel. d) nyári üzem intenzív felhasználás önkiszüléssel. e) téli üzem intenzív felhasználás önkiszülés nélkül. f) nyári üzem intenzív felhasználás önkiszülés nélkül.

### 6.1.3 Globálsugárzás és tájolás hatásai

A választott konténer magas abszorpciós tényezője miatt a beérkező globálsugárzás jelentős hányadát elnyeli, emiatt szükséges a hőmérsékletekre gyakorolt hatását megvizsgálni. A 13. ábrán láthatóak a globálsugárzás értékei a vizsgált időszakokban vízszintes és égtájak szerint lebontott függőleges felületekre. Téli környezetben a déli tájolású függőleges felületekre

eső sugárzás körülbelül kétszerese a második legjelentősebb nyugat felől érkező sugárzáshoz képest. 8. naptól kezdődően a felhős időjárás hatására a globálsugárzás nagysága egy nagyságrenddel lecsökken. Nyári környezetben a legjelentősebb sugárzás a vízszintes felületeket éri, melynek maximális értéke jelentősen meghaladja a téli, déli sugárzásét. Továbbá a konténert érő összes sugárzás értéke nagy mértékben meghaladja a téli időszakét így a hőmérsékletekre gyakorolt hatása nyáron jelentősebb.

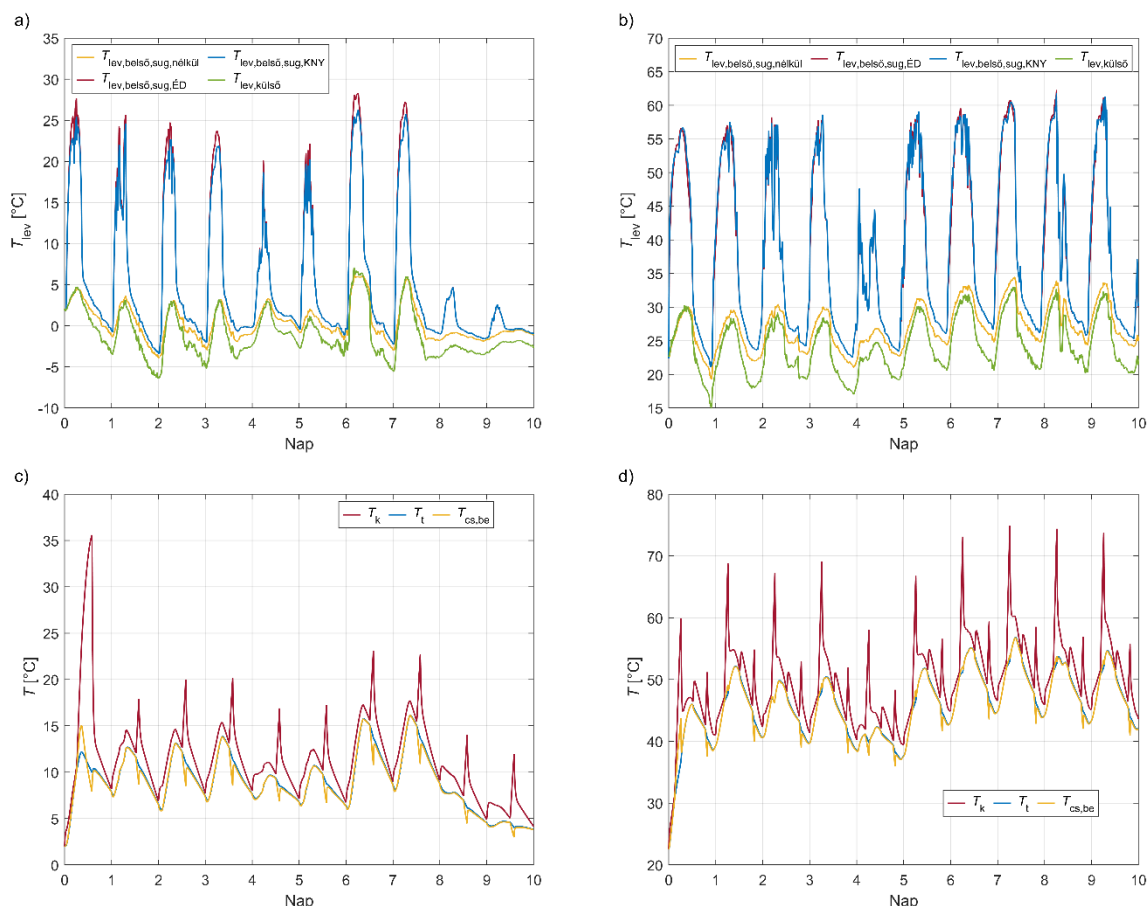


13. ábra. Globálsugárzás értékek, alsóindexben  $v$  a vízszinteset,  $f$  a függőlegeset jelöli tovább bontva égtájak szerint. a) téli környezet. b) nyári környezet [35].

A 8. táblázatból látható, hogy a globálsugárzás figyelembevétele sem a téli, alacsony felhasználásnál, sem a nyári, intenzív felhasználásnál sincs számottevő hatása a teljesítmény és eltárolt energia maximális értékeire. Ezen felül az eredmények megmutatják, hogy a tájolásnak nincs érdemi hatása ezen kimenetekre. Ennek vizsgálata azért szükséges, mert a konténer hosszabb és rövidebb függőleges falainak felülete között jelentős eltérés van:  $A_{\text{kont,fal,hosszú}} = 10,283 \text{ m}^2$ ,  $A_{\text{kont,fal,rövid}} = 4,972 \text{ m}^2$ , és elsősorban télen, jelentős különbség figyelhető meg a különböző irányú sugárzások között. A hosszabb oldal szerint Észak-Dél és Kelet-Nyugat tájolást vizsgáltam.

8. táblázat. Maximális töltési, kisütési teljesítmény és a maximális eltárolható energia konténerbe helyezve globálsugárzást figyelembe véve.

	$P_{k,töltés,max}$ [kW]	$P_{k,kisütés,max}$ [kW]	$E_{max}$ [kWh]
Tél, alacsony, K-NY	1,20	1,10	16,83
Tél, alacsony, É-D	1,20	1,10	16,83
Nyár, intenzív ök. K-NY	2,57	1,68	18,07
Nyár, intenzív ök. É-D	2,57	1,68	18,07



14. ábra. a) Belső levegő hőmérsékletek télen sugárzás nélkül; sugárzással hosszabb oldalak É-D irányban; sugárzással hosszabb oldalak K-NY irányban. b) Belső levegő hőmérsékletek nyáron sugárzás nélkül, sugárzással hosszabb oldalak É-D irányban, sugárzással hosszabb oldalak K-NY irányban. c) Részegységek hőmérsékletei télen sugárzással hosszabb oldalak K-NY irányban, alacsony felhasználás. d) Részegységek hőmérsékletei nyáron sugárzással hosszabb oldalak K-NY irányban, intenzív felhasználás önkiszűléssel.

A 14a ábrán láthatóak a konténer belső léghőmérsékletei globálsugárzás nélkül és a két ismertetett tájolás esetében. Látható, hogy a nappali órákban nagymértékű különbség van a sugárzás és a sugárzás nélküli eset között, mely akár 20 °C-os léghőmérséklet-növekedést is jelenthet. Továbbá a 8. napon kezdődő felhős időszak esetén is körülbelül 5 °C-kal magasabb léghőmérsékletek tapasztalhatók. A téli, erőteljes déli sugárzás hatására É-D tájolás esetén a belső léghőmérséklet maximumok átlagosan 2°C-kal a K-NY tájolás értékei felett vannak. Ezzel szemben a nyári időszakban nincs lényeges eltérés a tájolások között, azonban a magasabb globálsugárzás miatt a hőmérséklet-növekedés is jelentősebb, akár a 30°C-ot is elérheti, amely extrém, 60°C feletti hőmérsékletekhez is vezethet a konténerben. Vizsgálataink elsődleges célja a biztonságos hőmérséklettartomány folyamatos betartása, így a globálsugárzás hatásaiból a legalacsonyabb és legmagasabb értékekkel rendelkező futtatások láthatók a 14c-d ábrákon. A téli futtatás első napján látható kiugrás a köteg hőmérsékletében, az 50%-os kezdeti töltöttségből adódik, mivel az akkumulátor tartályai a töltési ciklus vége előtt elérik a maximális

töltöttséget, ezért az áramkapcsoló lekapcsol és egy hosszabb önkisülési folyamat kezdődik a kisütés megkezdéséig.

A további napokban a töltöttség és a töltési ciklus szinkronba kerül, így az első nap eredményei egy kirívó esetet mutatnak, melyek kevésbé relevánsak vizsgálataink szempontjából. A sugárzással érintett napokon a részegységek hőmérséklete végig az alsó határ felett marad az alacsony felhasználás ellenére is, azonban felhős időben 5°C alá esik a 10. nap végére, ami miatt hőmérséklet növelése indokolt. Nyári környezetben a köteg hőmérséklete a vizsgált tartomány egésze alatt a kritikus felső határ felett van és szélsőséges, 70°C feletti hőmérsékletek is tapasztalhatók, így nyáron a hőmérséklet csökkentése és a terhelés optimalizálása szükséges a hőmérsékletcsúcsok letörésére.

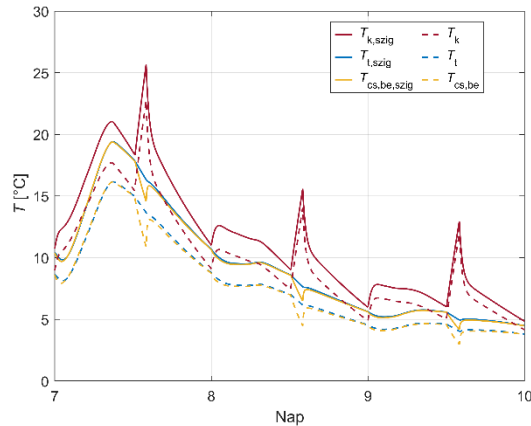
## **6.2 Téli és nyári üzem vizsgálata hőmérséklet-szabályzással**

A 6.1 alfejezetében ismertetett indoklások miatt jelen fejezet két alpontjában a téli hőmérsékletnövelés és a nyáron szükséges hűtés legegyszerűbb és leggazdaságosabb hatásait mutatom be.

### **6.2.1 Szigetelés**

Szigetelés alkalmazása megfelelő hőmérsékletnövekedést eredményezhet, azonban egyúttal a nyári értékekre is hatással van. A részegységek szigetelése, ugyanolyan vastagságot vizsgálva, jelentősebb hatással van a hőmérsékletre, mint a konténer külső leszigetelése és az anyagköltsége is kedvezőbb. Azonban nyáron csökkenti a hűtés hatékonyságát, míg a konténer szigetelésének hatása nyáron elkerülhető a zsuluzat nyitásával és a külső levegő beáramlásával. További hatása, hogy az alacsonyabb  $\alpha_{\text{szig}} = 0,5$  abszorpciós tényező miatt a globálsugárzás kisebb hányadát nyeli el a konténer. A részegységek közül érdemes a legkisebb hőtehetlenséggel rendelkező csöveket szigetelni így az önkisülés alatt csökkenthető a hirtelen bekövetkező nagy hőmérsékletcsökkenés. 1 cm konténer- és 2 cm fémborítású expandált polisztirol csőszigetelést alkalmazva a köteg és a tartályok hőmérséklete a téli időszak utolsó leghidegebb napjaiban is 5°C felett tartható, míg a befolyó ági csőrendszer hőmérséklete csupán az utolsó önkisülési ciklus alatt esik 4 és 5°C közé. Az itt található elektrolit mennyisége azonban nem számottevő a többi részegység térfogatához képest és a következő kisütési ciklus alatt rövid időn belül ismét az alsó határ fölé emelkedik.





15. ábra. Részegységek hőmérsékletei téli környezet leghidegebb időszakában globálsugárzással. Folytonos vonallal 1 cm konténer plusz 2 cm csőszigetelés eredményei, szaggatottal a szigetelés nélküli eset eredményei.

### 6.2.2 Ventilátor és zsaluzat

A túlmelegedés elkerülésének egyik leghatékonyabb módja a terhelés optimalizálása és az önkisülési időszakok megszüntetése. A módszer hatása megfigyelhető többek között a 12d és 12f ábrákon. Azonban megállapítható, hogy terhelésoptimalizált esetben is szükséges az akkumulátor hűtése. Jelen alfejezetben két különböző teljesítményű és térfogatáramú ventilátor hőmérsékletekre, teljesítményre, tárolt energiára és önfogyasztásra gyakorolt hatásait mutatom be a 6. fejezetben eddig vizsgált összes hatás és a kiválasztott szigetelésméretek figyelembevételével, önkisülés nélküli, intenzív nyári felhasználás és K-NY tájolás esetén.

A megvizsgált két ventilátor az airvent.hu adatbázis [38] legkisebb teljesítményű ventilátora, amely képes az akkumulátort a szükséges hőmérséklettartományban tartani (ventilátor 1), illetve a legnagyobb légsebességet biztosító, de nagyobb fogyasztású változat (ventilátor 2). A ventilátorok kiválasztásánál az adatbázisban szereplő termékek közül a légsebességek függvényében futtatásokat végeztem, ugyanazon körülmények között. Ebből meghatározható a szükséges legkisebb légsebesség, amellyel a köteg hőmérséklete a tartomány felső határa alatt tartható, ennek értéke 7,75 m/s. Mivel több különböző méretű ventilátor is képes hasonló légsebességet biztosítani, így közülük a legkisebb teljesítményűt választottam, amely a TXBR-355 modell. Az adatbázisból elérhető legmagasabb légsebességet - ami 11,2 m/s-ot jelent - szintén több méretű ventilátor tudja biztosítani. Közülük is a legkisebb teljesítményűt vizsgáltam meg, amely a TXBR-400 modell. További kritérium, hogy a konténerbe lévő teljes légtömeg kicseréléséhez szükséges idő elhanyagolható legyen a vizsgált időszakhoz viszonyítva. Mivel 10 napos időszakokat vizsgáltam, a töltés-kisütés is egy napos ciklusidővel rendelkezik, illetve a részegységek számottevő melegedése is perces nagyságrendben megy végbe, így a számított 23 és 13 másodperces légcseréidő elhanyagolható. A vizsgált ventilátorok paramétereit a 9. táblázat tartalmazza. A nagyobb légsebességű

ventilátor rövidebb idő alatt hűti vissza a részegységeket a szükséges hőmérsékletre, így működési ideje is rövidebb. A vizsgálat során állandó légsebességet és teljesítményt feltételeztem. A két vizsgált ventilátor teljesítményét, működési idejét és fogyasztását mutatja a 10. táblázat. Látható, hogy a vizsgált 10 napos időszak alatt csupán 7 óra 15 perccel csökkent a működési idő a nagyobb légsebesség esetében, azonban teljesítménye több, mint háromszorosa a másik ventilátorhoz képest. Így 3,2-szer több energia szükséges a magasabb légsebességű ventilátor működtetéséhez.

9. táblázat. Ventilátorok paraméterei [38].

Megnevezés	Típus	Teljesítmény [W]	Térfogatáram [m <sup>3</sup> /h]	Légsebesség [m/s]	Légcsereidő [s]
Ventilátor 1	TXBR-355	95	2870	7,88	23
Ventilátor 2	TXBR-400	326	5170	11,26	13

10. táblázat. Ventilátorok fogyasztása.

Megnevezés	Működési idő [nap]	Működési idő [%]	Fogyasztás [kWh]
Ventilátor 1	5,145	51,45	11,73
Ventilátor 2	4,843	48,43	37,89

Az akkumulátor maximális teljesítményeit mutatja a 11. táblázat a két ventilátor esetében a referenciaesethez viszonyítva. Megállapítható, hogy a hőmérséklet-szabályzásnak sincs érdemi hatása a teljesítményre és az eltárolható energia maximális értékeire.

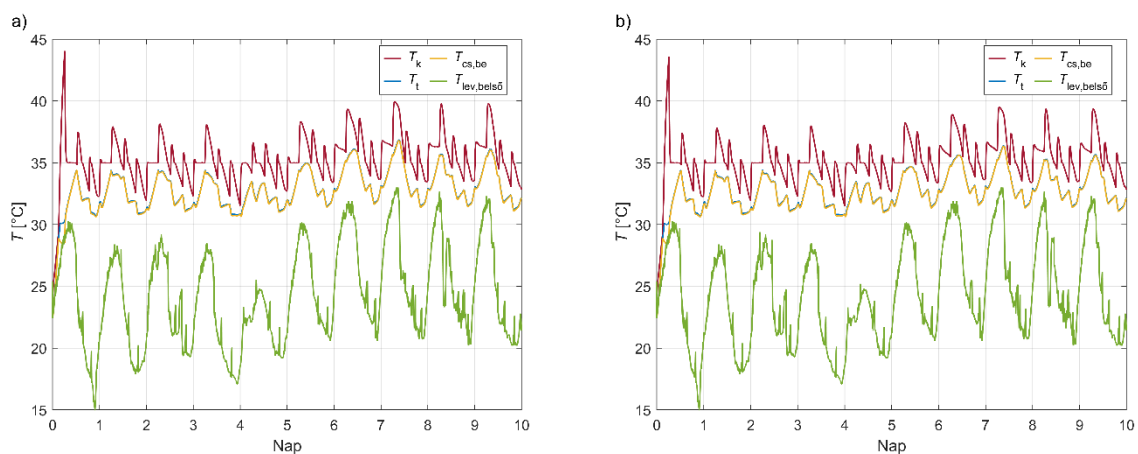
11. táblázat. Maximális töltési, kisütési teljesítmény és a maximális eltárolható energia konténerbe helyezve globálsugárzást figyelembe véve, hőmérséklet-szabályzással és referencia esetben.

	$P_{k,töltés,max}$ [kW]	$P_{k,kisütés,max}$ [kW]	$E_{max}$ [kWh]
Nyár, intenzív ök. nélkül Referencia esetben	2,59	2,07	18,23
Nyár, intenzív ök. nélkül Hőmérséklet-szabályzással Ventilátor 1 esetében	2,58	2,09	18,13
Nyár, intenzív ök. nélkül Hőmérséklet-szabályzással Ventilátor 2 esetében	2,58	2,09	18,13

A 16. ábrán látható a hőmérséklet-szabályzás és a két ventilátor a részegységek hőmérsékleteire gyakorolt hatása. Az 5.5.1, 5.5.2 alfejezetben bemutatott hőmérséklet-szabályzással látványos eredmény érhető el a hőmérsékletek csökkentését illetően. A 14d ábrán látható, hogy az önkisülési időszakokon kívül is, egy rövid időszakot leszámítva, a köteg

hőmérséklete végig 40 °C felett volt. Ezzel szemben mindkét ventilátor esetén alatta maradnak a maximális értékek. Továbbá elmondható, hogy a magasabb légsebesség csupán 0,5-1°C további hőmérsékletcsökkenést okoz. A ventilátor kapcsolási hőmérséklete  $T_k = 35^\circ\text{C}$ , az első 5 nap elején látható, hogy a ventilátornak sikerül ezen értéken tartania a köteg hőmérsékletét a töltés ellenére. Az ezt követő kiugrások a nagyon rövid önkisülési időszakoknak köszönhető.

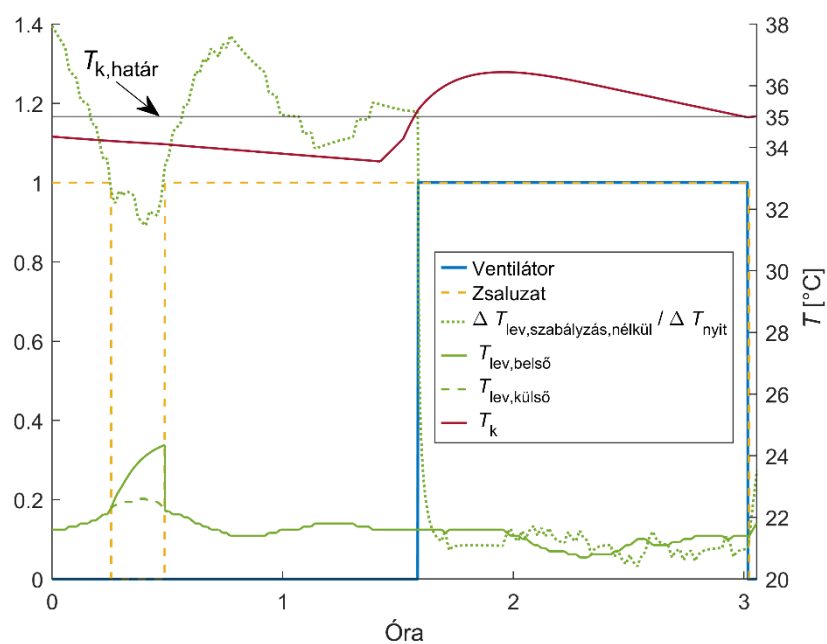
A folyamatosan és véletlenszerűen változó külső hőmérséklet és globálsugárzás befolyásolja a diffúziós együtthatókat, ezáltal a konstans árammal végzett teljes feltöltés és kisütés idejét is, ezért nem építhető fel olyan konstans áramú töltés-kisütési ciklus, amely teljes mértékben megakadályozza az önkisülést. Azonban az időszak rövideségének és a hőmérséklet-szabályzásnak köszönhetően a hőmérsékletek 40°C alatt maradnak. Az adott napon belüli második hőmérséklet-kiugrás a napi második töltési időszaknak köszönhető, ami nagyobb hőtermeléssel jár az azt megelőző kisütéshez képest. A harmadik kiugrás a második töltést követő rövid önkisülési időszaki következménye. Az első nap elején látható magas hőmérsékleteket a 6.1.3 alfejezethez hasonlóan az 50%-os kezdeti töltöttség okozza. Hatására az akkumulátor jóval a töltési ciklus vége előtt eléri a teljes töltöttséget így egy hosszabb, 3 óra 9 perces önkisülési időszak következik. Ezt követően a töltési-kisülési ciklusok és a töltöttség szinkronba kerül. Ez egyben megmutatja, hogy az alkalmazott hőmérséklet-szabályzási módszer a töltés-kisütés optimalizálása nélkül nem képes a köteg hőmérsékletét a szükséges tartományon belül tartani. A belső levegő hőmérsékleteiben látható kiugrások a zsálat zárásának és a ventilátorok kikapcsolásának egyidejű fennállását jelentik, mert ekkor a korábban beáramoltatott hűvösebb levegő hőmérséklete ismét intenzíven növekedni kezd a következő nyitásig.



16. ábra. Részegységek hőmérsékletei nyári környezetben intenzív önkisülés nélküli felhasználással, sugárzással és hőmérsékletszabályzással 1 cm konténer plusz 2 cm csőszigeteléssel. a) Ventilátor 1. b) Ventilátor 2.

Megállapításaim szerint ventilátor 1 alkalmazása elegendő a működési hőmérséklet-tartomány biztosításához, ezért a későbbi alfejezetekben már csak ennek az esetnek az eredményeit mutatom be. A 17. ábra mutatja a hőmérséklet-szabályzó működését a 16a ábra 7. napjának 17. és 20. órája között. A zsaluzatot és a ventilátort mutató függvény 1 érték esetén nyitva, illetve bekapcsolt állapotban vannak. Az első 1,5 órában a ventilátor kikapcsolt állapotban van, mert a köteg hőmérséklete a bekapcsolás egyik feltételeként meghatározott  $T_k = 35^\circ\text{C}$  alatt van. A bekapcsolás másik feltétele, hogy a hőmérséklet-szabályzás nélküli belső léghőmérséklet meghaladja a külső levegőjét (lásd: 5.5.2 alfejezet), végig fennáll. Amint a köteg hőmérséklete túllépi a határhőmérsékletet, 60 másodperc késleltetést követően a ventilátor bekapcsol. A 3. óra után hőmérséklete ismét a beállított határ alá esik így 60 másodpercet követően a ventilátor kikapcsol.

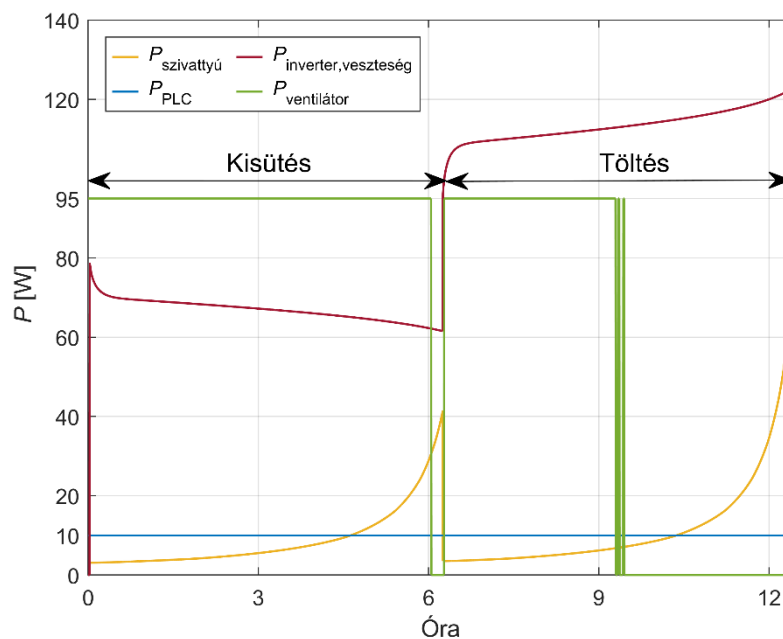
A zsaluzat nyitásának feltétele, hogy  $T_{\text{lev,belső, szabályzás, nélkül}} - T_{\text{lev,külső}} > T_{\text{nyit}} = 2,3^\circ\text{C}$ . A nyitási értéket több futtatás eredményeinek kiértékelése után vettem fel. A szemléletesebb bemutatás érdekében a zöld pontvonallal jelölt hőmérséklet-különbség dimenziótlán formában szerepel a 17. ábrán. A nyitás feltételekor  $(T_{\text{lev,belső, szabályzás, nélkül}} - T_{\text{lev,külső}}) / 2,3 = 1$ . A kezdetben nyitott zsaluzat egy rövid időszakban zárva marad. Ekkor a belső levegő hőmérséklete növekedésnek indul, mikor ismét eléri a nyitási hőmérséklet-különbséget a zsaluzat kinyit és a belső levegő hőmérséklete ismét megegyezik a külső hőmérséklettel. A ventilátor bekapcsolásakor a hőmérséklet-különbség a feltétel alá esik, azonban a vezérlés alapján bekapcsolt ventilátor esetén a zsaluzat is nyitva marad.



17. ábra. Hőmérséklet-szabályzás működése.

### 6.2.3 Önfogyasztás

Fontos megvizsgálni a kiegészítő berendezések teljesítményfelvételét is, mivel az általuk felhasznált energia csökkenti a rendszer összhatétfokát. A 18. ábra mutatja a kiegészítő berendezések fogyasztását egy kisütési és töltési ciklus során, az 5. nap 6. óráját követően. A vezérlésért felelős PLC fogyasztása állandó 10 W. A szivattyúk teljesítményfelvétele kisütés során a töltöttség csökkenésével nő, míg töltés során annak növekedésével emelkedik, az 5.1 alfejezetben leírtak végett. A ventilátor működés közben konstans 95 W teljesítményt igényel. Kisütés alatt az akkumulátor által leadott teljesítmény csökkenésével az inverter veszteségei is csökkennek. Töltés során a fellépő veszteségek növelik a betáplálendő teljesítményt, így az inverter veszteségei is magasabbak. Továbbá, ahhoz, hogy a kimeneti oldalán a megfelelő teljesítmény rendelkezésre álljon a betáplált teljesítménynek fedeznie kell az inverter veszteségeket is. Mivel a veszteségek nagysága arányos a bemeneti teljesítménnyel, ez tovább növeli őket. A berendezések maximális teljesítményfelvételét a 12. táblázat foglalja össze. Az inverter veszteség és a szivattyút teljesítmény maximuma a töltési ciklus végén mérhető.



18. ábra. A rendszer hatásfokát csökkentő berendezések fogyasztása.

12. táblázat A rendszer hatásfokát csökkentő berendezések maximális teljesítménye.

	Inverter veszteség	Szivattyú	Ventilátor	PLC
Max. teljesítmény [W]	123,5	64,5	95	10

A 13. táblázatban olvasható értékek esetén az energiaigény vagy elérhető energia külön-külön szerepel mindegyik töltési, illetve kisütési ciklust összegezve a vizsgált 10 napos időszak alatt. Összehasonlítva a téli és nyári önkisülés nélküli intenzív felhasználás esetét. Töltés során a veszteségek tovább növelik a betáplálendő teljesítményt, míg kisütés során csökkentik az elérhető. Ez jelentős eltérést okoz a töltéshez használt és a kisütés során visszanyert energiában a 10 napos időszak alatt. A nyitottáramkörü feszültség a hőmérséklet növekedésével növekszik, így nyáron a betáplált és kinyert energia nagysága is magasabb a téli környezethez viszonyítva. Az inverter veszteségei és a szivattyúk működtetése töltés során növelik a betáplálendő mennyiséget. Az összes betáplált energiához viszonyítva az inverter veszteségei töltés során télen és nyáron 4,51%, míg a szivattyúk működtetése 0,46%, így a töltés hatásfoka 95,03%. Kisütés során az akkumulátorból kinyerhető energia 95,15%-a hasznosítható a berendezések energiaigényének levonása után. Az akkumulátor hatásfoka a leadott és a felvett energia hányadosa. Értéke télen 2,52%-kal magasabb a nyári időszakhoz viszonyítva. A teljes rendszer hatásfokát a kiegészítő berendezések csökkentik télen 6,74%-kal, míg nyáron 6,51%-kal. A rendszerhatásfok esetében a két időszak közötti különbség 2,29%. Rendszerhatásfok alatt az akkumulátor kiegészítő berendezésekkel terhelt hatásfoka értendő. Az akkumulátor hatásfokára kapott eredmények, a [4] forrás 1. táblázatában redox áramlásos akkumulátorokra jellemző hatásfoktartományba esik.

13. táblázat. Energia és hatásfok.

Energia [kWh]	Tél		Nyár	
	Töltés	Kisütés	Töltés	Kisütés
Töltés/kisütés	271,90	191,60	282,40	191,90
Inverter veszteségek energiája	12,90	8,20	13,40	8,21
Szivattyú működtetés energiaigénye	1,33	1,05	1,37	1,10
Szükséges összes bemenő és felhasználható kimenő energia	286,13	182,35	297,17	182,59
Töltés és kisütés hatásfoka [%]	95,03	95,17	95,03	95,15
Akkumulátor hatásfoka [%]	70,47		67,95	
Rendszerhatásfok [%]	63,73		61,44	
Rendszerhatásfok hőmérséklet-szabályzással [%]	62,89		56,59	

A hőmérséklet-szabályzás energiaigényét a 14. táblázat tartalmazza. Az akkumulátor kimenő energiájából levonva az energiaigényüket, télen a rendszer hatásfokát 62,89%-ra csökkenti, míg nyáron ez az érték 56,59%. A hőmérséklet-szabályzó kiegészítő berendezéseket is összegezve, hatásukra, télen 7,58% míg nyáron 11,36% rendszerhatásfok csökkenés mérhető.

14. táblázat. Hőmérséklet-szabályzás energiaigénye.

Energia [kWh]	Tél	Nyár
Ventilátor működtetés energiaigénye	0,00	11,73
PLC működtetés energiaigénye	2,40	2,40

Eredményeimből megállítható, hogy a kiegészítő berendezések teljesítményének és vezérlésének pontos modellezése elengedhetetlen a hatásfokok meghatározásához. A hőmérséklet-szabályzás hatékony megtervezése fontos feladat a további hatásfok csökkenés elkerülésére, mivel a hűtés energiaigénye még a leggazdaságosabb megoldások esetén is számottevően csökkenti a rendszer hatásfokát.

## 7. Összefoglalás

A dolgozat céljaként vanádium-redox áramlásos akkumulátorok átfogó, komplex koncentrált paraméterű modelljének megalkotását tűztem ki, különös tekintettel az akkumulátor részegységeinek hőmérsékleteire. További célként határoztam meg az akkumulátort az 5-40°C hőmérséklettartományban tartáshoz szükséges kiegészítő minimális energiafogyasztású berendezések vizsgálatát, kiválasztását és a valós környezeti körülmények között fellépő hatásaiknak a bemutatását. Az elvégzett vizsgálatok során az alábbi megállapításokra jutottam:

- Az akkumulátorban lejátszódó kémiai, elektromos, hőtani és áramlási folyamatok kölcsönösen hatással vannak egymásra, így külön-külön nehezen vizsgálhatók, ami mindenképp szükségessé teszi a komplex, valamennyi fő fizikai-kémiai egyenletet tartalmazó modell megalkotását.
- A külső berendezések nélkül végzett számítások megmutatják, hogy téli környezetben az akkumulátor szigetelése, nyári időjárási körülmények között hűtése szükséges. A töltés-kisütés optimalizálása és az önkisülési időszakok minimalizálása jelentősen elősegíti a részegységek hőmérsékletének a szükséges tartományon belül tartását, de nem váltja ki a kiegészítő berendezések alkalmazását.
- Az akkumulátor konténerbe helyezése védelmet biztosít a káros környezeti hatások ellen és egyszerűsíti a hűtés megvalósítását, ugyanakkor hőmérséklet-növelő hatása miatt növeli annak energiaigényét.

- A globálsugárzás hőmérsékletekre gyakorolt hatásai nem elhanyagolhatóak. Nyári időszakban különösen magas hőmérsékletnövelő hatással bír, ugyanakkor télen, alacsony felhasználás esetén a felhős időszakok alatt a globálsugárzás figyelembevétele esetén sem zárható ki a szigetelés szükségessége.
- A vizsgált akkumulátor és konténer esetén expandált polisztirol szigetelést alkalmazva 1 cm konténer- és 2 cm csőszigetelés elegendő a leghidegebb téli időszakok alatt is az 5°C-os minimum részegység hőmérséklet biztosításához. Előbbi nagyobb anyagköltséggel jár, ugyanakkor csökkenti a hűtés energiaigényét.
- A megtervezett hőmérséklet-szabályzó rendszer kielégítően működik és a bemutatott ventilátorokkal alkalmas a részegységek hőmérsékletét, a szigetelés ellenére is, a megengedett felső határ alatt tartani. Ehhez azonban szükséges a töltés-kisütés optimalizálása és az önkisülési időszakok minimalizálása. Ennek hiányában a léghűtés nem alkalmas a kívánt hőmérséklettartomány biztosítására.
- A hatásfokok vizsgálata során megállapítottam, hogy a kiegészítő berendezések működtetése télen 6,74%-kal, míg nyáron 6,51%-kal csökkentik a rendszerhatásfokot, amely télen 63,73%, nyáron 61,44%. A hőmérsékletszabályzás télen csupán 0,84% rendszerhatásfok-csökkenést okoz, azonban nyáron a ventilátorok működése miatt a csökkentő hatás 4,85%. Így a kiegészítő berendezéseket összegezve télen 7,58%, nyáron 11,36% rendszerhatásfok csökkenés mérhető.



## Hivatkozások

- [1] Z. Zhu *et al.*, “Rechargeable Batteries for Grid Scale Energy Storage,” *Chemical Reviews*, vol. 122, no. 22. American Chemical Society, pp. 16610–16751, 2022. nov. 23. doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00289.
- [2] “Installed power generation capacity by source in the Stated Policies Scenario, 2000-2040 – Charts – Data & Statistics - IEA.” [Online]. Hozzáférhető: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-power-generation-capacity-by-source-in-the-stated-policies-scenario-2000-2040>. Utolsó elérés dátuma: 2023.10.27.
- [3] I. Iwakiri, T. Antunes, H. Almeida, J. P. Sousa, R. B. Figueira, and A. Mendes, “Redox flow batteries: Materials, design and prospects,” *Energies*, vol. 14, no. 18, 2021. szept. doi: 10.3390/en14185643.
- [4] T. Puleston, A. Clemente, R. Costa-Castelló, and M. Serra, “Modelling and Estimation of Vanadium Redox Flow Batteries: A Review,” *Batteries*, vol. 8, no. 9. MDPI, 2022. szept. 01. doi: 10.3390/batteries8090121.
- [5] N. Poli, M. Schäffer, A. Trovò, J. Noack, M. Guarnieri, and P. Fischer, “Novel electrolyte rebalancing method for vanadium redox flow batteries,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 405, 2021. febr. doi: 10.1016/j.cej.2020.126583.
- [6] N. Poli, A. Trovò, P. Fischer, J. Noack, and M. Guarnieri, “Electrochemical rebalancing process for vanadium flow batteries: Sizing and economic assessment,” *J Energy Storage*, vol. 58, pp. 2352–152, 2023, doi: 10.1016/j.est.2022.106404.
- [7] S. Yin, L. Zhou, X. Du, and Y. Yang, “Influence of temperature on performance of all vanadium redox flow battery: analysis of ionic mass transfer,” *Ionics (Kiel)*, vol. 25, no. 2, pp. 593–606, 2019. febr. doi: 10.1007/s11581-018-2626-z.
- [8] H. Prifti, A. Parasuraman, S. Winardi, T. M. Lim, and M. Skyllas-Kazacos, “Membranes for redox flow battery applications,” *Membranes*, vol. 2, no. 2. MDPI AG, pp. 275–306, 2012. doi: 10.3390/membranes2020275.
- [9] L. Liu, Z. Li, J. Xi, H. Zhou, Z. Wu, and X. Qiu, “Rapid detection of the positive side reactions in vanadium flow batteries,” *Appl Energy*, vol. 185, pp. 452–462, 2017. jan. doi: 10.1016/J.APENERGY.2016.10.141.
- [10] L. Wei, T. S. Zhao, Q. Xu, X. L. Zhou, and Z. H. Zhang, “In-situ investigation of hydrogen evolution behavior in vanadium redox flow batteries,” *Appl Energy*, vol. 190, pp. 1112–1118, 2017. már. doi: 10.1016/J.APENERGY.2017.01.039.
- [11] A. Trovò *et al.*, “Standby thermal model of a vanadium redox flow battery stack with crossover and shunt-current effects,” *Appl Energy*, vol. 240, pp. 893–906, 2019. ápr. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.02.067.
- [12] D. Oboroceanu *et al.*, “Effects of Temperature and Composition on Catholyte Stability in Vanadium Flow Batteries: Measurement and Modeling,” *J Electrochem Soc*, vol. 164, no. 9, pp. A2101–A2109, 2017, doi: 10.1149/2.1401709jes.
- [13] K. H. Rho, S. J. Yoon, J. Ryu, S. M. Cho, M. S. Kim, and D. K. Kim, “Study on thermal behavior of vanadium redox flow battery at low temperature to prevent precipitation,” *J Energy Storage*, vol. 49, p. 104110, 2022. máj. doi: 10.1016/J.EST.2022.104110.
- [14] “Solver that computes states and outputs for simulation - MATLAB.” [Online]. Hozzáférhető: <https://www.mathworks.com/help/simulink/gui/solver.html>. Utolsó elérés dátuma: 2023.10.27.
- [15] P. Bogacki and L. F. Shampine, “A 3(2) Pair of Runge-Kutta Formulas,” *Appl. Math. Leit*, vol. 2, no. 4, pp. 321–325, 1989.

- [16] “Fixed Step Solvers in Simulink - MATLAB & Simulink.” [Online]. Hozzáférhető: <https://www.mathworks.com/help/simulink/ug/fixed-step-solvers-in-simulink.html>. Utolsó elérés dátuma: 2023.10.27.
- [17] A. Tang, J. Bao, and M. Skyllas-Kazacos, “Thermal modelling of battery configuration and self-discharge reactions in vanadium redox flow battery,” *J Power Sources*, vol. 216, pp. 489–501, 2012. okt. doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.06.052.
- [18] D. W. Green and M. Z. Southard, Eds., *Perry’s Chemical Engineers’ Handbook*, 9th Edition. New York: McGraw-Hill Education, 2019. ISBN: 9780071834087
- [19] Z. Wei, J. Zhao, M. Skyllas-Kazacos, and B. Xiong, “Dynamic thermal-hydraulic modeling and stack flow pattern analysis for all-vanadium redox flow battery,” *J Power Sources*, vol. 260, pp. 89–99, 2014. aug. doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.02.108.
- [20] A. Tang, S. Ting, J. Bao, and M. Skyllas-Kazacos, “Thermal modelling and simulation of the all-vanadium redox flow battery,” *J Power Sources*, vol. 203, pp. 165–176, 2012 ápr. doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.11.079.
- [21] A. Patti and D. Acierno, “Thermal Conductivity of Polypropylene-Based Materials,” in *Polypropylene*, W. Wang and Y. Zeng. *IntechOpen (Rijeka)*, 2019. doi: 10.5772/intechopen.84477.
- [22] L. Goddijn-Murphy and B. Williamson, “On thermal infrared remote sensing of plastic pollution in natural waters,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 11, no. 18, 2019. szept. doi: 10.3390/RS11182159.
- [23] *VDI Heat Atlas*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-540-77877-6.
- [24] Y. Yan, Y. Li, M. Skyllas-Kazacos, and J. Bao, “Modelling and simulation of thermal behaviour of vanadium redox flow battery,” *J Power Sources*, vol. 322, pp. 116–128, 2016. aug. doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.05.011.
- [25] W. W. Yang, Y. L. He, and Y. S. Li, “Performance Modeling of a Vanadium Redox Flow Battery during Discharging,” *Electrochim Acta*, vol. 155, pp. 279–287, 2015. febr. doi: 10.1016/j.electacta.2014.12.138.
- [26] “Műszaki leírás raktárkonténerhez” [Online]. Hozzáférhető: <https://catalog.containex.com/catalog/CONTAINEX/hu/catalogs/Technische-Beschreibung-LC/pdf/Technische-Beschreibung-LC.pdf>. Utolsó elérés dátuma: 2023.10.20.
- [27] A. Tang, J. Bao, and M. Skyllas-Kazacos, “Studies on pressure losses and flow rate optimization in vanadium redox flow battery,” *J Power Sources*, vol. 248, pp. 154–162, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.09.071.
- [28] S. König, M. R. Suriyah, and T. Leibfried, “Model based examination on s of stack series connection and pipe diameters on efficiency of vanadium redox flow batteries under consideration of shunt currents,” *J Power Sources*, vol. 281, pp. 272–284, 2015. máj. doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2015.01.119.
- [29] “ALPHA1 L 15-60 130 - 99160574 | Grundfos.” [Online]. Hozzáférhető: <https://product-selection.grundfos.com/hu/products/alpha/alpha1-l/alpha1-l-15-60-130-99160574?tab=variant-curves&pumpssystemid=2181989277>. Utolsó elérés dátuma: 2023.10.18.
- [30] J. Sun, D. Shi, H. Zhong, X. Li, and H. Zhang, “Investigations on the self-discharge process in vanadium flow battery,” *J Power Sources*, vol. 294, pp. 562–568, 2015. júl. doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.06.123.

- [31] C. Blanc, “Modeling of a Vanadium Redox Flow Battery Electricity Storage System,” Lausanne, 2009. doi: 10.5075/epfl-thesis-4277.
- [32] K. Mertens, “*Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice.*” 1st edition. 2014.
- [33] J. H. Lienhard, “*A Heat Transfer Textbook.*” 5th edition. [Online]. Hozzáférhető: <http://ahtt.mit.edu>. 2020. aug. ISBN: 0486837351
- [34] P.-J. Alphonse and ah Elden, “THE INVESTIGATION OF THERMAL BEHAVIOR IN A VANADIUM REDOX FLOW BATTERY DURING CHARGE AND DISCHARGE PROCESSES,” *J Energy Storage*, vol. 40, p. 102770, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102770.
- [35] D. Fekete, “Basic and other measurements of radiation at station Budapest (2019-06 et seq).” PANGAEA, 2022. doi: 10.1594/PANGAEA.946379.
- [36] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, and R. Stewart, “MODELING DAYLIGHT AVAILABILITY AND IRRADIANCE COMPONENTS FROM DIRECT AND GLOBAL IRRADIANCE,” vol. 44, no. 5, pp. 271–289, 1990.
- [37] V. Józsa és R. Kovács, “*Power Systems Solving Problems in Thermal Engineering A Toolbox for Engineers.*” doi: 10.1007/978-3-030-33475-8
- [38] “TXBR ECOWATT Műszaki adatok”, [Online]. Hozzáférhető: [www.airvent.hu](http://www.airvent.hu). Utolsó elérés dátuma: 2023.11.03.