

Válasz Dr. Szilágyi István bírálataira

Mindenekelőtt megköszönöm Dr. Szilágyi István részletes, előremutató és támogató bírálatát. A megfogalmazott megjegyzésekre, kritikai észrevételekre, javaslatokra és kérdésekre az alábbiakban válaszolok.

Kérdés:

(i) A fázisváltó hőtároló anyagokkal foglalkozó rész irodalmi feldolgozása összességében megfelelő, ugyanakkor nem tér ki néhány, a terület kutatási irányát meghatározó, közleményre. Hiányzik például a trimodális hőtárolási koncepciót bemutató tanulmány (lásd Saher et al., Nature 636, 622-626, 2024), amely tovább erősíthette volna az értekezés nemzetközi kontextusba ágyazottságát, valamint lehetőséget adott volna a bemutatott PCM mikrokapszulázási eredmények stratégiai elhelyezésére a legújabb kutatási irányokhoz viszonyítva.

Válasz: Bíráló jogosan hiányolja, hogy a fázisváltó hőtároló anyagok mellett az irodalmi részből sajnos teljesen kimaradt a termokémiai hőtárolás, továbbá az érzékelhető hőről is csak egy rövid mondatban tettem említést.

Bíráló által idézett, a Nature-ben megjelent publikáció trimodális hőtárolási koncepciója különösen ígéretes és hatékony, hiszen a 3 ismert hőtárolási módszer mindegyikét kihasználja egy anyagi rendszeren belül. A hozzávetőleg 150 °C fázisváltási hőmérsékleten termokémiai hőtárolás is lejátszódik reverzibilis vízvesztés során, és 10 °C működési hőmérséklet-változásnál némi szenzibilis hő tárolása és felszabadítása is megvalósul. Az így elért $394 \pm 5\%$ J/g hőenergia nagyon jelentős, hiszen a fázisváltó anyagokkal jellemzően maximálisan 250 J/g hőenergia tárolható el. 300 J/g körüli látens hő tárolása sóhidrátok esetében elérhető, azonban azoknál általában a fázisszeperáció és a nagymértékű túlhűlés technológiailag nagyon nehezen kezelhető. Ebben a cikkben olyan eutektikumot használtak, ami mind a két említett problémát kiküszöbölte.

Megjegyzem, hogy ha az említett cikk bírálója lettem volna, akkor – a rendkívül meggyőző kísérleti eredményeket elismerve – egyetlen, a mű tudományos újdonságát és lényegét nem érintő kritikát fogalmaztam volna meg, méghozzá azt, hogy a bevezetésben megújuló energiával hajtott hőszivattyúval képzelik el az üzemi hőmérséklet elérését. Mivel a 150 °C-ra való felfűtés már 50 °C hőmérsékletről is jelentős érzékelhető hő tárolását teszi lehetővé (vízzel pl. ~ 420 J/g, $\Delta T = 100$ °C esetén), ezért én ezt a trimodális nagy energiasűrűségű hőtárolási módszert gazdaságosabbnak gondolom 150 °C-nál magasabb hőmérsékletű hulladék hő rendelkezésre állása esetében, ami számos ipari folyamatban egyébként maradványhőként a környezetet terheli.

Kérdés:

(ii) A zéta potenciál meghatározására elektroforetikus fényszórás módszerét használta, ami elsődlegesen elektroforetikus mobilitás mérésére szolgál. Ezekből az adatokból megfelelő modell választásával a zéta potenciál valóban számítható (lásd Delgado et al., Pure and Applied Chemistry, 77, 1753-1805, 2005), viszont nem derül ki, hogy melyik modell került alkalmazásra és milyen kísérleti paraméterek alapján?

Válasz: A részecske sebessége a következő tényezőktől függ: az elektromos tér erőssége vagy feszültséggradiens, a közeg dielektromos állandója, a közeg viszkozitása és a zéta-potenciál. Egy részecske sebességét elektromos térben általában elektroforetikus mobilitásának nevezik. Ennek ismeretében a részecske zéta-potenciálját a Henry-egyenlet alkalmazásával megkaphatjuk. A Henry-egyenlet:

$$U_E = \frac{2\varepsilon z f(\kappa a)}{3\eta}$$

ahol: z: zéta-potenciál (V), U_E : elektroforetikus mobilitás (m^2/Vs). ε : dielektromos állandó, (C/Vm), η : viszkozitás (Pas). $f(\kappa a)$: Henry-függvény. Az $f(\kappa a)$ meghatározásához általában két értéket használnak közelítésként 1,5-öt vagy 1,0-t. Vizes közegben, mérsékelt elektrolit koncentráció mellett, a legtöbb szemcsére a Smoluchowski modell alkalmazható, ahol $f(\kappa a)=1,5$. Nem vizes közegben vagy nagyon kis szemcsénél alacsony vezetési képességű közegben $f(\kappa a) = 1,0$ értéknél a Hückel közelítés alkalmazandó. A készülék esetünkben a Smoluchowski-moddal számolt.

Kérdés:

(iii) További technikai kérdéseim a DLS módszeréhez kapcsolódnak. Olvasható a 31. oldalon, hogy a hidrodinamikai átmérő a polimer nanorészecskék esetében az elektronmikroszkóppal mérhető száraz méretnek akár a kétszerese is lehet. Erre lehetne valamilyen fizikai-kémiai magyarázatot adni? Továbbá, milyen megközelítést használt a korrelációs függvények illesztésére és az átlagos hidrodinamikai méret és PDI meghatározására, illetve a méreteloszlás miként került számításra ezekből az adatokból?

Válasz: A hidrodinamikai átmérőt DLS módszerrel a Stokes-Einstein egyenlet alapján számolhatjuk:

$$d_H = \frac{kT}{3\pi\eta D},$$

ahol d_H = hidrodinamikai átmérő (m), D = translációs diffúziós együttható (m^2/s), k = Boltzmann állandó (J/K), T = hőmérséklet (K), η = viszkozitás (Ns/m^2).

A részecske translációs diffúziós együtthatója nemcsak a részecske "magjának" méretétől függ, hanem a diffúziós sebességet befolyásoló felületi struktúrától, valamint a közegben lévő ionok koncentrációjától és típusától is. A közegben lévő ionok és a teljes ionkoncentráció befolyásolhatja a részecskék diffúziós sebességét azáltal, hogy megváltoztatják az elektromos kettősréteg vastagságát, amelyet Debye-hossznak (κ^{-1}) neveznek. Így egy alacsony vezetőképességű közeg egy kiterjedt ion kettősréteget hoz létre a részecske körül, csökkentve a diffúziós sebességet, ezáltal nagyobb, látszólagos hidrodinamikai átmérőt eredményez. Ezzel szemben a nagyobb vezetőképességű közeg összenyomja az elektromos kettősréteget, csökkentve a mért hidrodinamikai átmérőt. Mivel a polimer nanorészecskéink jelentős részének a méretét azok elkészítése után az emulgeátor (polivinil-alkohol, PVA) desztillált vizes oldatában vizsgáltuk, az alacsony vezetőképességű közeg kedvezett a kiterjedt kettősréteg létrejöttének. A hidrodinamikai méretet még tovább növelhette a PVA adszorpciója. Ugyanez a tapasztalat felfedezhető pl. a következő publikációban: Meng Li, Haiyu Tang, Yu Xiong, Zhixiang Yuan, Lili He, Lu Han, Pluronic F127 coating performance on PLGA nanoparticles: Enhanced flocculation and instability, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 226, 2023, 113328, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2023.113328>. Ebben a munkában szintén PVA emulgeátorral állítottak elő PLGA nanorészecskéket, majd vizsgálták a Pluronic F127

emulgeátor hatását a nanorészecskékre. Míg a TEM felvételeken látható szemcsék mérete jellemzően <100 nm, a hozzájuk rendelhető DLS átlag méretek 160-250 nm tartományba estek. A dinamikus fényszórás módszerében nagyon gyakran intenzitásra vonatkoztatott méreteloszlást adnak meg. Ez azt jelenti, hogy a szemcseméretre a különböző méretű szemcsék által az összesített szórási intenzitáshoz való hozzájárulási mértékeket rendelik. Ez a nagy szemcsék túlzó figyelembe vételéhez vezet, mivel a fényszórás intenzitása $1/106$ szorzófaktorral együtt csökken a szemcsemérettel.

A polidiszperzitási indexet a szoftver a mért értékek $G1$ korrelációs függvényének logaritmusára polinom függvényt illesztve ($\ln[G1]=a+b \times t+c \times t^2+d \times t^3+e \times t^4+\dots$) a lineáris (b) és a négyzetes tag (c) együtthatójából számítja a következő összefüggés alapján: $PdI = 2c/b^2$

Kérdés:

Az eloszlásgörbéknél néhol térfogat- (például 12. ábra), máshol meg intenzitás (21. ábra) súlyozott adatok kerültek bemutatásra. Erre miért volt szükség, nem lehetett volna egységes az ábrázolás?

Válasz: A korábbi vizsgálatainknál a térfogattal súlyozott méretet vettük figyelembe, ami azoknál a nanorészecskéknél egyébként nagyon hasonlított az intenzitással súlyozott méreteloszlásukhoz. Akkor a szakirodalomban többnyire térfogat szerinti szemcseméret eloszlásokkal találkoztunk, így az azokkal való összehasonlíthatóság miatt használtuk ezeket az eredményeket. Mivel a térfogati az intenzitás szerinti méretből származtatott, ezért idővel áttértünk az utóbbi használatára. A dolgozatban valóban célszerűbb lett volna az egységes ábrázolás.

Kérdés:

(iv) A gyógyszerhordozó rendszerek esetében milyen szempontok alapján választotta ki a kapszulázó polimereket az egyes hatóanyagokhoz, és mely tényezőket tartja döntőnek a laboratóriumi eredmények későbbi alkalmazhatósága szempontjából?

Válasz: A kezdeti kísérleteinkben olyan kapszulázó polimereket kerestünk, ami az FDA által elfogadott biodegradábilis anyag, ugyanis ekkor elsősorban alkalmazásorientált projekteknél vettünk részt. Mivel leginkább interferonokkal és a modellanyagukként választott szérumfehérjével dolgoztunk, az is szempont volt, hogy ezek a polimerek jó hatékonysággal tudják mikrokapszulázni a fehérjéket. Ennek a szempontnak a szakirodalmi vizsgálataink alapján nagyon jól megfeleltek a poli(tejsav-glikolsav) (PLGA) és pegilált kopolimerei. Az utóbbi egy évtizedben a kemoterapeutikumok mikrokapszulázása lett a fő kutatási irányunk, és tudatosan kerestünk új partnereket, akik ígéretes új típusú biokompatibilis polimereket állítottak elő, amelyek felfedező kutatási kihívást jelentettek. A PLGA és kopolimereivel elért eredményeink közül a legjobban alkalmazhatónak azt tartom, hogy olyan körülményekre optimalizáltuk az egyes eljárásokat, melyekkel a szükséges méretnövelések után közel a leggazdaságosabban gyártható részecskerendszereket lehetséges előállítani. A munkánk eredményességét és hasznosságát részben igazolhatja, hogy az utóbbi néhány évben egy innovatív magyar vállalkozás újonnan fejlesztett minifehérjéiből nagyon rövid idő alatt állatkísérletekben is jól teljesítő PLGA mikro- és nanorészecskéket hoztunk létre.

Kérdés:

Szintetikus polimerkémia nézőpontjából milyen szerkezeti módosításokkal lehetne a kapszulák tulajdonságait tovább javítani?

Válasz: Szintetikus kémiai szempontból nyilvánvalóan a lehetőségek tárháza hatalmas. Ahogy a gyógyszerhatóanyagok kiválasztásánál, itt is sokat fog segíteni az MI. Kiseb módosításokkal, mint utólagos pegilálás mi is kísérleteztünk, és ennek pozitív hozadéka esetenként megjelent.

Két fő területen látom szükségét az anyagi rendszerek módosításának: egyfelől az immunrendszer elől elrejtő mechanizmusok javításában, hiszen bár a pegilálás sok esetben erre megoldást jelentett, azonban az általa létrehozott hidrofil réteg rendszerint gátolja a tumor sejtek membránjával a kölcsönhatást. Ezenkívül az utóbbi években kimutatták, hogy bár bizonyos PEG vegyületek kis immunogenitással jellemezhetők, pegilált nanoanyagok megismételt bejuttatása esetében felgyorsított vérbeli elimináció lép fel a szervezetben az anti-PEG antitestek keletkezése miatt (Zalba S, Ten Hagen TLM, Burgui C, Garrido MJ. Stealth nanoparticles in oncology: Facing the PEG dilemma. J Control Release. 2022, 351, 22-36.). A nanoterapeutikumok felezési idejének növelése érdekében a PEG-ek biztató alternatíváinak egyes ikerionos polimerek bizonyultak, melyek szintén jelentősen csökkentették az immunválaszt (Erfani A, Seaberg J, Aichele CP, Ramsey JD. Interactions between Biomolecules and Zwitterionic Moieties: A Review. Biomacromolecules. 2020, 13, 2557-2573). Ezek polimer láncba építése a nanorészecskék immunogenitását is mérsékelhetné, továbbá a hatóanyagok rögzítésében is lehet szerepe.

Másik jellemző probléma a túl nagy kezdeti hatóanyagfelszabadulás, amivel az általunk vizsgált új típusú biokompatibilis polimerek esetében rendszeresen szembesültünk. Ez ellen a hordozó polimer kétféle módosítását tartanám hatékonynak: egyrészt mivel a kemoterapeutikumaink általában hidrofóbok vagy jelentős hidrofobicitású részt tartalmaznak (mint pl. a doxorubicin HCl), ezért a polimerekbe is több olyan lánc beépítése lehet hatékony, ahol hidrofób-hidrofób kölcsönhatás jöhet létre. Másrészt a töltéssel rendelkező hatóanyagokhoz a polimer töltésének fokozásával (ionos kölcsönhatás) szintén lehetne erősíteni a kapcsolatot. Harmadrészt még némi hatása nyilvánvalóan van a polimer molekulatömegének is a kezdeti gyors hatóanyagfelszabadulásra, ugyanakkor ez is a hosszabb-rövidebb lipofil lánc beépülése miatt megváltozott hidrofil-lipofil viszonyok miatti bír befolyással.

Kérdés:

(v) A vér-agy gáton való átjutásra tervezett, különösen a vas-oxidot tartalmazó, nanokapszulák esetében miként képzelhető el a részecskék hosszabb távú sorsa és kiürülése a szervezetből, és milyen kísérleti megközelítésekkel lehetne ezt megbízhatóan vizsgálni? A jelenleg alkalmazott in vitro és in vivo módszerek közül melyek lennének alkalmasak a biodisztribúció, lebomlás és elimináció reprodukálható nyomon követésére, illetve milyen korlátai vannak ezeknek a módszereknek?

Válasz: Ez egy nagyon érdekes és fontos kérdés. A szakirodalomban rendkívül alapos tanulmányokban vizsgálják, hogy a vér-agy gáton (BBB) átjutott nanoanyagokkal mi történik, hogy jutnak a sejtekbe (pl. endocitózissal, Zhao X, Shang T, Zhang X et al. Passage of Magnetic Tat-Conjugated Fe₃O₄@SiO₂ Nanoparticles Across In Vitro Blood-Brain Barrier. Nanoscale Res Lett 2016, 11, 451) és azon belül mely részekben dúsulnak. No de mi lesz velük utána? Erről a tudományos publikációk túlnyomó részében még említés sincs, pedig véleményem szerint is ez hasonlóan fontos kérdés ahhoz, hogyan jut át a nanorészecske a BBB-n.

Az agydaganatokban található mikroglia és makrofágok által fagocitált vas-oxid nanorészecskék (ferumoxytol) sorsát a következő tanulmányban vizsgálták meg alaposan: Feng Q, Xu X, Wei C, Li Y, Wang M, Lv C, Wu J, Dai Y, Han Y, Lesniak MS, Fan H, Zhang L, Cheng Y. The Dynamic Interactions between Nanoparticles and Macrophages Impact Their Fate in Brain Tumors. *Small*. 2021, 17, e2103600.

Egyfelől U87 gliomával transzplantált egerekbe intratumorálisan injektált, berlini kék festékkel jelzett vas-oxid nanorészecskék eloszlását határozták meg a tumoron belül, továbbá az agydaganatból izolált sejtekben áramlási citometriával azt is vizsgálták, hogy mely sejtek internalizálják a ferumoxytol. A mikroglia és makrofág sejtek immunfluoreszcens jelöléssel történő fagocitózis-vizsgálatán kívül *in vitro* tanulmányozták azok vastartalmának változását ICP-MS-sel. Azt is megvizsgálták, hogy a ferumoxytol hogyan befolyásolta a vas-metabolizmusért felelős gének expresszióját.

Mivel azt találták, hogy a ferumoxytol mikroglia és makrofág sejtekben dúsul, ezért vizsgálták ezek endocitózis-mechanizmusát. Az endocitózis után konfokális lézer pásztázó mikroszkóppal detektálták a szubcelluláris lokalizációt. Megállapították, hogy a mikroglia sejtekből 12 órán belül, míg a makrofágokból 48 óra elteltével a nanorészecskék több mint 50 %-a kiválasztódott. TEM felvételek alapján azt is megállapították, hogy a ferumoxytol a kiválasztódás során extracelluláris vezikulumszerű fehérjékbe ágyazódott mind a két sejtípus esetében. Agyszöveti vizsgálatban azt találták, hogy 7 napon keresztül a vas-oxid internalizálása meghaladta az eliminációját az agyban, a 7. nap után azonban az utóbbi meghaladta az előbbit, ami a vas-koncentráció fokozatos csökkenéséhez vezetett. Extracelluláris vezikulumok kapszulázták a nanorészecskéket, melyek a vizsgálatok szerint az agy-gerincvelői folyadék cirkulálásával fokozatosan hagyták el az agyat 21 nap alatt a perifériás szervekbe jutva, a májban és a vesékben akkumulálódva 14, ill. 21 nap elteltével. A ferumoxytol használata során nem tapasztaltak hosszútávú neurológiai toxicitást. TEM felvételek alapján a nanorészecskék mérete és morfológiája nem változott az agyban és az ürülésük során sem. Hasonló eredményt kaptak a daganatba injektált nanorészecskékkel.

A biodisztribúció, lebomlás és elimináció reprodukálható nyomon követésére ebben az idézett cikkben alapos vizsgálati módszereket mutattak be, viszont ezek korlátairól a terület alaposabb ismerete hiányában nem tudok véleményt alkotni.

Megjegyzem még, hogy nyilvánvalóan minden nanohordozó anyagra hasonlóan alapos vizsgálatok elvégzésére van szükség, amennyiben azokat klinikai alkalmazásra tervezik.

Kérdés:

(vi) A fázisváltó hőtároló anyagok mikrokapszulázásánál mely paraméterek bizonyultak a legkritikusabbnak a magas PCM tartalom és a hosszú távú ciklikus stabilitás egyidejű biztosításához, és ezek mennyire tekinthetők általánosíthatónak más, eltérő körülmények között felhasznált, PCM rendszerekre?

Válasz: A kalcium-alginát héjú kapszulák esetében a legkritikusabb paraméter a nátrium-alginát oldat viszkozitása volt a PCM tartalom szempontjából, mivel ez bírta a legnagyobb mértékű befolyással az említett tulajdonságra. A hosszú távú ciklikus stabilitás megfelelően vastag héjat képezve mind a két vizsgált nátrium-algináttal elérhető volt, de a kisebb viszkozitású alginátból a gyengébb emulgeálási képessége miatt nagyobb mennyiséget kellett alkalmazni az emulzióképzés során. Ennek a rendszernek az eredményei más körülmények

közötti felhasználásra kalcium-alginátból képzett héjú kapszulákra általánosíthatók, legalábbis a megvizsgált paraffin, zsírsav és zsírsav-észter PCM-ek mikrokapszulázása esetében, bár arra tekintettel kell lenni, hogy minél több hidrofil csoportot tartalmazó szerves PCM-ek esetében a héj megfelelő zárásához vastagabb héj képzése lehet szükséges.

Az olaj-a-vízben emulzió - oldószer elpárologtatás módszere és a szuszpenziós polimerizációs eljárásokban az emulgeátor minősége és koncentrációja voltak a legfontosabb paraméterek. Bár a PCM-tartalmat a hordozó polimer – PCM arány határozza meg, azonban ha a felületaktív anyag nem emulgeál megfelelően, akkor mag-héj szerkezet sem alakul ki, ezért az adott rendszerekben mérhető felületi feszültségek vizsgálata eldöntheti, hogy milyen emulgeátorral érdemes egyáltalán ezekben a rendszerekben foglalkozni. Ebből a szempontból a módszertani eredményeink mindenképpen általánosíthatók az adott eljárásokra és hasonló anyagi rendszerekre. Viszont az előállítás során fellépő felületi feszültségek vizsgálatát mindig az adott rendszerben el kell végezni ahhoz, hogy előre lehessen becsülni az eljárás sikerét.

Kérdés:

(vii) Az értekezésben több esetben alkalmazott statisztikai kísérlettervezés milyen mértékben járult hozzá az optimális kapszulázási feltételek feltárásához, és lát-e lehetőséget ezen megközelítés további kiterjesztésére összetettebb, többváltozós rendszerek esetén? Mi a véleménye a mesterséges intelligencia alkalmazásának lehetőségéről ezen a területen?

Válasz: A gyógyszerhordozó rendszerek esetében a statisztikai kísérlettervezés amellel hogy valóban lényegesen lecsökkentette a szükséges kísérletek számát, az általa jelzett optimális kapszulázási eredményeket a javasolt paraméterekkel előállított nanorészecskékkel jól lehetett reprodukálni. Többváltozós rendszerekkel más fontos paraméterek hatása is jobban becsülhető lenne, viszont meg kell vizsgálni, hogy az új változók bevezetése nem teszi-e túl bonyolulttá az adott modellt. A mesterséges intelligencia mindenképpen jó eszközöket kínálhat egy bonyolultabb modell kezeléséhez. A hőtároló részecskék esetében a kísérlettervezés szintén megmutatta, amire hivatott, azaz, hogy mely körülmények között érhetünk el maximális PCM tartalmat, ez azonban önmagában nem utalhatott arra, hogy a legnagyobb PCM tartalom mellett a létrejövő héj megfelelő mechanikai stabilitással bír-e az azt érő külső hatásokkal szemben. Ahhoz, hogy ezt a szempontot egy modell segítségével figyelembe vegyünk, szintén érdemes lenne a mesterséges intelligencia kínálta eszközök használata, azonban ennek a vizsgálatát nehéz elképzelni nagyszámú kísérletek nélkül.

Kérdés:

(viii) A részecskék kolloidstabilitását elsősorban az elektrosztatikus és sztérikus kölcsönhatásokkal magyarázza a Szerző. Az első esetben ennek mértékét a zéta potenciálokkal hozza összefüggésbe. Azonban itt fontos megjegyezni, hogy ez függ a minta elektrolit tartalmától (koncentráció és vegyérték, lásd például Galli et al. Colloids and Interfaces, 4, 20, 2020), illetve a vonzóerők mértékétől (DLVO elmélet, vagy egyéb kölcsönhatások, lásd például Zacharia et al., ACS Symposium Series, 147, 31-47, 2023) amelyek nem kerülnek tárgyalásra. Ennek hiányában a kolloidstabilitásra vonatkozó eredmények általánosítása nem szerencsés, mivel az alkalmazásban megtalálható közegtől függ. Szintén ide vonatkozó megjegyzés, hogy bizonyos esetekben nem derül ki, hogy szerkezeti- vagy kolloidstabilitás kerül-e tárgyalásra.

Válasz: A kritikus koagulációs koncentráció (CCC) a részecskediszperziókban megadja az elektrolitkoncentrációk küszöbértékét, amely felett a diszperziók a gyors részecskeaggregáció

miatt destabilizálódnak. A CCC-értékek becsülhetők a DLVO-elmélet alapján, mely figyelembe veszi a taszító kettősréteg-erők és a vonzó van der Waals-erők hatását. A számított és a kísérleti CCC-adatok ugyanazon részecskék esetében mono- és multivalens elektrolitok jelenlétében jó egyezést mutatnak, feltéve, hogy a DLVO részecskék közötti erők dominálnak (https://www2.sci.u-szeged.hu/physchem/index_html_files/KMSc_koagulalas2025.pdf). A zéta-potenciál 25 mV stabilitási küszöbértéke nem alkalmazható a többértékű ionokat tartalmazó szuszpenziókra, azonban alacsony CCC értékek esetében sem. Ezenkívül a sztérikus erők is stabilizációt biztosíthatnak a diszperzióknak. Valóban igaza van Bírálónak, hogy a vizsgálati közegek leírása hiányában a stabilitási megállapítások a dolgozatban nem megfelelően alátámasztottak.

Kérdés:

(ix) A fázisváltó hőtároló anyagok alkalmazása lényegében eltérő elven működik, mint az elektrokémiai energiatároló rendszerek, például az akkumulátorok. Milyen fizikai mennyiségek és értékelési szempontok alapján tartja összehasonlíthatónak a PCM alapú hőtárolást más energiatárolási technológiákkal, és milyen korlátai vannak az ilyen jellegű összevetéseknek a teljesítmény, hatásfok és alkalmazhatóság szempontjából?

Válasz: A fázisváltó anyagok és pl. az elektrokémiai akkumulátorok összevetési alapja lehet az eltárolható energiatartalom. Ennek egyik fontos korlátja, hogy hőenergiát elektromos áramból jó hatásfokkal hőszivattyúval lehet előállítani, és a hőszivattyú COP (teljesítmény együttható) értéke megfelelően választott hőmérséklettartományokban jellemzően 3-4 körüli lehet, ami azt jelenti, hogy 1 kW villamos teljesítménnyel 3-4 kW hőteljesítmény állítható elő, bár ilyen érték jellemzően 50 °C-nál nem magasabb hőmérsékletű melegvíz előállítása esetében reális, természetesen nem túl alacsony környezeti hőmérséklet mellett.

Emellett amennyiben 100 °C-nál alacsonyabb hőmérsékletű hulladékhő/maradványhő vagy pl. geotermikus energia áll rendelkezésre, ezek áramtermelésre és ezért tárolásra gazdaságosan nem használhatók, viszont a hőenergia különböző célokra megfelelő fázisváltó megoldással tárolható és felhasználható.

Az összehasonlításhoz meg kell még említeni, hogy míg megfelelő méretezés esetén egy fázisváltó hőtároló anyagot tartalmazó tartálynak az élettartam nagyobb részében a teljes látens (ezenkívül működési tartománytól függő érzékelhető) hőkapacitása kihasználható, addig pl. a lítium-vasfoszfát akkumulátorok optimális üzemeltetési körülmények között 20-80%-os töltöttséggel üzemelhetnek, a kisebb vagy nagyobb mértékű töltési szint az élettartamukat akár 50 %-kal ronthatja. Utóbbiak várható élettartama realisztikus üzemeltetés mellett maximum 10 év. Ezzel szemben megfelelő fázisváltó hőtároló anyagok érzéketlenek a feltöltési és kisütési állapotokra, akár 20000 ciklust is kibírhatnak, ami 50 év élettartamot is jelenthet. Megemlítem még, mint nem mellékes szempontot, hogy az általunk a Thermofoam Kft. ipari partnerrel együttműködésben fejlesztett makrokapszulázott fázisváltó anyagokat tartalmazó hőtároló tartály azonos kapacitású lítium-vasfoszfát akkumulátorhoz képest hozzávetőleg fele akkora bekerülési költséggel rendelkezik. Fontos kiemelni, hogy a hőtárolással nyilvánvalóan nem tudjuk kiváltani az elektrokémiai energiatárolást, viszont megfelelő tervezés és körülmények között jó kiegészítő energiahatékonysági megoldás lehet.

Kérdés:

(x) Az elért eredmények alapján melyek azok az egyéb (nem a doktori műben tárgyalt, vagy említett) kutatási irányok vagy alkalmazási területek, ahol a bemutatott mikro- és nanokapszulázási megoldások rövid vagy középtávon a legnagyobb gyakorlati hasznosulási potenciállal rendelkeznek?

Válasz: A fázisváltó hőtároló mikro- és nanorészecskék nem említett gyakorlati hasznosulási potenciálja olyan hűtési és fűtési alkalmazások, ahol tartályban elhelyezve hőközlő folyadékkal körülvéve kihasználható a nagy fajlagos felületük. Ilyen megoldás lehet olyan hőtároló tartály, ahol megfelelő részecskeméretű mikrokapszulákat töltenek tartályba, és vizet áramoltatva bennük nagy felületű hőcserélőként működhetnek. Ígéretes lehetőség még a mikrokapszulázott PCM-ek sűrű diszperzióban, hőátadó közegként történő áramoltatása a hőátadó közeg hőkapacitásának megnövelésére.

Jelenleg folyó ígéretes saját kutatásunk a mikrokapszulázott fázisváltó hőtároló anyagok alkalmazása elektrokémiai akkumulátorok hűtésére, ahol a mikrokapszulákat az akkumulátor cellák közé a hőelvezetésre szolgáló dielektrikumba töltjük, hogy annak hőkapacitását jelentősen megnöveljük.

Végezetül még egyszer megköszönöm Dr. Szilágyi István részletes, segítő szándékú észrevételeit és javaslatait, melyekkel a kutatásaink mélyebb alapjainak a tovább gondolására serkentett.

Veszprém, 2026.03.31.


Dr. Feczko Tivadar