

VÝROBA ENERGIÍ A VODÍKU NAsAZENÍM MALÝCH JADERNÝCH REAKTORŮ V CHEMICKÉM PRŮMYSLU

MARTIN ŠILHAN^a, PETR POLÍVKA^a a PETRA DVOŘÁKOVÁ RUSKAYOVÁ^b

^a Centrum výzkumu Řež s.r.o., Hlavní 130, 250 68 Husinec-Řež, ^b The Extreme Light Infrastructure ERIC, Za Radnicí 835, 252 41 Dolní Břežany, Česká republika
martin.silhan@cvrez.cz

Došlo 26.10.23, přijato 13.11.23.

Článek popisuje synergii mezi malými modulárními jadernými reaktory a nízko- a vysokoteplotní elektrolýzou při produkci elektrické energie, tepla a výrobě vodíku. Je provedeno srovnání dodávek energií z malých jaderných reaktorů s běžnými typy obnovitelných zdrojů energie. Rovněž je uvedeno několik možných aplikací malých jaderných reaktorů pro potřeby chemického podniku.

Klíčová slova: malé jaderné reaktory, vodík, chemický podnik, elektrolýza

Obsah

1. Úvod
2. Srovnání dodávek energie z malých modulárních reaktorů a obnovitelných zdrojů energie
3. Ilustrace možného nasazení malých modulárních reaktorů ve středně velkém chemickém podniku
4. Závěr

1. Úvod

Malé modulární jaderné reaktory (SMR, zkratka je používána i pro malé jaderné reaktory, které nejsou modulární) mají potenciál fungovat jako stabilní, nízkoemisní a bezúdržbový zdroj elektrické a tepelné energie. Cenou vyráběné elektrické energie zřejmě nebudou konkurovat velkým jaderným reaktorům, avšak mají celou řadu vlastností, které je předurčují pro nasazení ve výrobních podnicích zpracovatelského a především chemického průmyslu. Jsou jimi např. nižší investiční náklady, rychlost výstavby nebo jednodušší provoz. Jaderné reaktory IV. generace (GIV) jsou pokročilými jadernými reaktory navrženými k dosažení vyšší bezpečnosti, účinnosti a snížení produkce jaderného odpadu ve srovnání s předchozími generacemi jaderných reaktorů. V konstrukci se využívá modulární technologie tak, aby bylo možné jednotlivé komponenty vyrábět sériově a následně převézt na místo využití a tam jednoduše sestavit. Zmenšení velikosti reaktoru navíc sníží investiční náklady. Kompletní zařízení SMR by mělo zaujímat méně než desetinu plochy proti klasickému velkému reaktoru. Klíčovým rysem vysokoteplotních reaktorů je schopnost dosahovat vysokých provozních teplot, obvykle nad 700 °C. To umožňuje efektivní využití tepelné energie

pro další různé účely. Takto vysoké teploty umožňují širokou škálu aplikací, včetně výroby elektřiny, páry a jejího využití při průmyslovém vytápění, výrobě elektřiny, vodíku a dalších. Existuje několik různých typů vysokoteplotních jaderných reaktorů, které se liší v konstrukci, chlazení a palivu. Jedním z vysokoteplotních reaktorů je Very High Temperature Reactor (VHTR, reaktor s velmi vysokými teplotami), který může dosahovat výstupních teplot až 1000 °C. Výběr vhodného typu reaktoru závisí na konkrétních potřebách a aplikacích, jakož i na technických a regulačních faktorech. Řada vyvíjených SMR pracuje při zvýšených teplotách, proto očekáváme teplotu výstupní páry ze SMR vyšší než z jaderných reaktorů typu VVER, která je 324 °C u reaktoru VVER-1000 (cit.¹). U reaktoru typu VHTR jde o teplotu až 1000 °C (cit.²), pára s takovými parametry je v průmyslu (jakožto i v energetice) velmi dobře využitelná.

Kombinace SMR a vysokoteplotní elektrolýzy (HTE, high temperature electrolysis) může plně nahradit zdroj energie, založený na fosilním palivu: jaderný reaktor je schopen dodávat kontinuálně teplo a elektrickou energii, připojený elektrolyzátor je schopen vyrábět vodík (a kyslík). Kombinace SMR a HTE pro výrobu elektrické energie a tepla při měnících se momentálních (tzv. spotových) cenách elektrické energie pak může zajistit jak (žádané) kontinuální zatížení SMR, tak prodej přebytků elektrické energie při vysokých spotových cenách, které mohou být zapříčiněny vysokým podílem obnovitelných zdrojů v elektrizační soustavě. (HTE zařízení je totiž v principu schopné provozu v režimu elektrolýzy, nebo palivového článku – v režimu palivového článku vyrábí elektrickou energii a teplo). Další významnou výhodou je snížení nákladů prostřednictvím lokálního využití elektrické energie, u kterého odpadá nutnost hrazení celé řady poplatků spo-

jených s dodávkou elektrické energie, které mohou být vyšší než cena silové energie. Jedná se například o poplatky za distribuci elektrické energie, nebo poplatky na podporu obnovitelných zdrojů energie.

Při HTE se vodní pára rozkládá na vodík a kyslík při použití elektrického proudu. Hlavním rozdílem oproti konvenční elektrolyze je použití vysokých teplot, často nad 800 °C, což zvyšuje účinnost procesu. HTE představuje v současnosti nejméně technologicky vyspělou vodíkovou technologii, která ale skýtá mnohé přednosti. Výhodou vysoké provozní teploty je, že část energie, která je potřebná k proběhnutí elektrochemických reakcí, je dodána pomocí tepla, které je typicky levnější než elektrická energie. Proto je HTE často zmiňována jako obzvláště výhodná ve spojení s procesy, při kterých vzniká větší množství odpadního tepla. Díky tomuto efektu dosahuje HTE technologie vysoké účinnosti, měrná spotřeba elektrické energie na výrobu vodíku se pohybuje okolo 3,7 kWh_{AC} / Nm³ H₂ (LHV lower heating value, výhřevnost) (cit.³). Náběh z normální na provozní teplotu však obvykle trvá dlouho, typicky 12 hodin. Vysokoteplotní jaderné reaktory mohou poskytovat vysokopotenciálové teplo potřebné k provozu elektrolyzy, což zvyšuje energetickou efektivitu HTE a umožňuje vyrábět vodík s nízkými emisemi CO₂ (cit.³). V databázi vodíkových projektů IEA (cit.⁴) jsou ve fázi „operational“ pouze čtyři projekty, tři z nich mají průmyslové využití (výroba železa a oceli, methanolu a methanu). HTE je schopna procesu ko-elektrolyzy, nejčastěji reakcí vody s oxidem uhličitým. Této kombinace se využívá převážně z důvodu tvorby syntézního plynu, který je následně možné využít pro syntézu vyšších uhlovodíků. Další zkoumané ko-elektrolyzní technologie využívají např. směsi CO₂ a glycerol, nebo směs vody s dusíkem, s cílem alternativní výroby amoniaku.

Alkalická elektrolyza je již komerčně zralá a poměrně levná technologie. V literatuře³ je uváděna měrná spotřeba elektrické energie na výrobu vodíku 5–6 kWh_{AC} / Nm³ H₂ (LHV). Oproti ostatním technologiím elektrolyzy však produkuje nejméně čistý vodík a je poměrně energeticky náročná. Vodíková elektrolyza s polymerním elektrolytem (PEM, proton exchange membrane) je technologie, které je v současnosti věnováno mnoho pozornosti pro její jednoduchost a dobré dynamické vlastnosti. Výhodou je vysoká čistota produkovaných plynů a kompaktní design. Měrná spotřeba elektrické energie na výrobu vodíku je podobná jako u alkalické elektrolyzy. Alkalická i PEM elektrolyza jsou dále označovány jako nízkoteplotní elektrolyza (LTE, low temperature electrolysis).

2. Srovnání dodávek energie z malých modulárních jaderných reaktorů a obnovitelných zdrojů energie

Pro srovnání byl jako reprezentant SMR využit koncept Energy Well (EW), vyvíjený v Centru výzkumu Řež. EW představuje koncept malého modulárního, fluoridového, konstrukčně jednoduchého jaderného reaktoru se sed-

miletým cyklem paliva a vysokým stupněm pasivní bezpečnosti. Je navržen tak, aby mohl být transportován s čerstvým jaderným palivem, bez nutnosti výměny jaderného paliva u zákazníka. Plánovaná jednotka EW produkuje 8 MWe a 20 MWt. Uvažována byla konzervativně provozní doba řetězce sestávajícího z SMR, elektrolyzéry a navazující technologie, která odpovídá 90 % z ročního hodinového fondu, který obnáší 8760 h. Technologie 1 MWe LTE produkuje ročně 0,16 kt vodíku, 1 MWe HTE pak vyrobí o 50 % více vodíku (pro to však spotřebuje ještě 0,3 MW tepla ve formě páry). Uvažované měrné spotřeby elektrické energie pro výrobu 1 t vodíku jsou 55 MWh pro LTE a 37 MWh pro HTE. Srovnání výroby EW, fotovoltaické elektrárny (FVE) a větrné elektrárny (VtE) je provedeno v tab. I.

Očekáváme, že vodík, vyráběný během kontinuálního provozu SMR bude mírně levnější než vodík vyráběný z OZE, a to díky vysokému využití elektrolyzéry ve spojení se SMR. Faktor využití výkonu elektrolyzéry má při určení nákladovosti výroby vodíku význam především při nižších cenách elektrické energie, při ilustrativní ceně silové elektřiny 100 EUR/MWh jsou již náklady na odpis elektrolyzéry zanedbatelné proti nákladům na spotřebu elektřiny. Pro srovnání nákladů bylo využito metodiky popsané v cit.⁸. Vzhledem k nedávnému výraznému poklesu cen HTE elektrolyzérů⁹ a obecně vysokým cenám silové elektrické energie očekáváme budoucí masivní nasazení HTE elektrolyzérů spolu se SMR.

3. Ilustrace možného nasazení malých modulárních jaderných reaktorů ve středně velkém chemickém podniku

SMR jsou koncipovány tak, aby pracovaly jako bezúdržbové. Další výhodou je dlouhodobá kontinuální dodávka energie s očekávanou vysokou dostupností výkonu, kterou konzervativně odhadujeme na cca 90 %. Taková dostupnost výkonu bezpečně pokryje potřeby navazujících technologií.

Střednědobé výkyvy v dobách nízké poptávky, nebo nízké ceny elektřiny, mohou být vykryty řetězcem, který se skládá z částí: elektrolyzér, zásobník vodíku a palivový článek. Při použití nízkotlakého skladování vodíku není nutné použití vodíkového kompresoru, což je investičně nákladné zařízení. Elektrolyzér může být nízkoteplotní, vysokoteplotní elektrolyzér může velmi rychle přejít do režimu palivového článku. Vzhledem k poklesu ceny HTE elektrolyzérů a vysoké elektrické účinnosti HTE procesu vychází jejich nasazení výhodněji než nízkoteplotních elektrolyzérů. V následujícím textu předestíráme několik reálně využitelných aplikací SMR v chemickém průmyslu.

Chlor-alkalická elektrolyza

Elektřinu produkovanou ze SMR je možné využít jako zdroj energie pro chlor-alkalickou elektrolyzu. Typická tuzemská průmyslová jednotka chlor-alkalické elektro-

Tabulka I
Srovnání Energy Well a vybraných obnovitelných zdrojů (fotovoltaických a větrných elektráren)

Parametr	Energy Well	OZE
Řiditelnost výkonu	Výkon je stálý a neřiditelný.	Výkon závisí na aktuálních přírodních podmínkách, není možné jej přesně predikovat ani řídit (výkon lze snížit).
Disponibilita výkonu (hodin/rok)	Očekává se vysoká, zhruba 8700 h/rok.	Obecně nízká, závislá na přírodních podmínkách. VtE v podmínkách ČR 1800–2100 h/rok. Pro přípovrchové VtE je mírně vyšší, běžně se neuvádí. FVE cca 1000 h/rok.
Zábor půdy pro 8 MWe jednotku	Očekává se 900 m ² .	VtE vyžaduje 1333 m ² (viz poznámka 1), FVE vyžaduje 80 000 m ² .
Nutná infrastruktura	Jako pro OZE, navíc nutný vodní zdroj a pravděpodobně vyšší míra ostrahy objektu.	Zpevněná cesta, oplocení pozemku, vyvedení výkonu do distribuční soustavy (nejčastěji na napětíové hladině 22 kV).
Potenciál dalšího rozvoje v ČR	Neomezený, podle potřeb trhu a elektrizační soustavy.	Potenciál VtE do roku 2040 je 2,5–7 GW (cit. ⁵). FVE nad 100 kW – technický potenciál výstavby špičkového výkonu je 10,23 GW (cit. ⁶).
Investiční náklady pro 8 MWe jednotku	Odhad 1000–1500 mil. Kč (cit. ¹⁵), viz Poznámka 2.	VtE 160–300 mil. Kč (cit. ^{5,7}), je patrný významný pokles cen především turbin. FVE 100 mil Kč (dle informací od investorů).

Poznámka 1: Uvedený parametr (MW/plocha) významně závisí na topologii pozemku. I když existují stále účinnější FV panely i nové koncepty umístění panelů, nelze očekávat, že by se potřebná plocha výrazně snížila a přiblížila se tak k ploše, nutné pro výstavbu EW. Plocha pro VtE vychází z VtE Pchery, jedna turbína o výkonu 3 MWe má zabranou plochu odhadem 500 m². Využití sousedních ploch má určitá omezení, nejedná se však o zábor půdy.

Poznámka 2: technologicky nejpodobnější projektu EW je reaktor IMSR (300) s investičními náklady 4,05 mil. USD/MWe (v cenách roku 2020) a s výrazně vyšším výkonem 195 MWe.

lýzy má příkon 30–50 MWe a její produkty tvoří vodík, chlor a hydroxid (sodný nebo draselný). Výhodou chlor-alkalické elektrolýzy je určitá variabilita ve výkonu, část energie ze SMR lze v případě vysokých spotových cen prodávat a produkci odložit na dobu nižší ceny elektrické energie. U membránové chlor-alkalické elektrolýzy je spotřeba elektrické energie cca 2,3–3 MWh/t chloru¹⁰ (uvažováno 2,5 MWh/t). Uvedená hodnota zahrnuje kromě elektrolýzy i následné operace jako sušení, čištění apod. Předpokládáme, že v roce 2017 zrušená a nově plánovaná výroba (s kapacitou 135 kt/rok Cl₂) v neratovické Spolaně má tržní potenciál a odhadnutý nominální příkon chlor-alkalických elektrolýzérů 43 MWe, kterýžto může být dodán pomocí SMR.

Výroba a skladování technických plynů

Energie a teplo ze SMR je možné využívat pro výrobu, čištění, lahvování a distribuci vodíku a kyslíku, které tvoří produkty elektrolýzy. Technologie 10 MW LTE (nebo 6,7 MWe HTE) ročně vyrobí 1,6 kt vodíku a 12,8 kt kyslíku. Elektřinu ze SMR je možné využít pro napájení jednotky frakční destilace vzduchu, jednotka na zpracování 360 t/h vzduchu má příkon 22,3 MW. Při použití 10 MWe ze SMR by bylo možné zpracovávat zhruba 161 t vzduchu/h (cit.¹¹). Je možné využít LTE i HTE, pro výrobu vysoce čistého vodíku, např. pro použití v dopravních aplikacích, je preferovanou technologií PEM.

Hydrogenované rostlinné oleje

Hydrogenované rostlinné oleje (HVO, hydrogenated vegetable oil) lze použít jako kvalitní součást motorové nafty. Uvažujeme jednu výrobní jednotku s produkcí 380 kt HVO za rok, která bude zpracovávat pouze řepkový olej. Řepkový olej obsahuje nejvíce olejové kyseliny (C18), palmový olej obsahuje 44 % palmitové kyseliny (C16) a 39 % olejové kyseliny (C18). Na přeměnu 1 kt palmového oleje na HVO je potřeba 210·10³ Nm³, tedy cca 0,019 kt vodíku¹². Odhadujeme, že na přeměnu 1 tuny řepkového oleje bude potřeba 0,02·10⁻³ kt vodíku, ročně tedy jednotka spotřebuje 7,6 kt vodíku. Pro takovou výrobu HVO by tedy byl potřeba LTE o příkonu 48 MWe, nebo HTE o příkonu 32 MWe. Vzhledem k velké kapacitě a relativně ustálenému charakteru výroby preferujeme použít HTE.

Další možné použití HVO je při výrobě cukrovinek. V ČR existuje několik potravinářských závodů, které využívají HVO, ale pravděpodobně hydrogenaci olejů nevyužívají. Celkovou roční výrobu cukrovinek v ČR odhadujeme na 60 kt, předpokládáme průměrný obsah 25 hm.% tuku v cukrovinkách, poměry molárních hmotností vodíku a oleje pak 2:836 (řepkový olej, výrobce PREOL, a.s.) a stechiometrii 4 atomy vodíku na jednu molekulu mastné kyseliny. S tím spojený odhad roční produkce vodíku na výrobu cukrovinek produkovaných v České republice činí 0,315 kt, to odpovídá nízkoteplotnímu elektrolýzérovi

o příkonu 2 MWe. Jde tedy o poměrně marginální oblast využití vodíku, vzhledem k velikosti výroby přichází do úvahy prakticky výhradně malý LTE, pravděpodobně PEM.

Výroba amoniaku

V rámci výroby amoniaku předpokládáme využití elektrické energie ze SMR pouze na výrobu vodíku, který bude následně využit pro Haberovu-Boschovu syntézu. Z jedné 100 MWe SMR jednotky lze získat 16 kt vodíku ročně pomocí nízkoteplotní elektrolyzy, nebo 24 kt vodíku ročně pomocí HTE. Z tohoto množství vodíku lze stechiometricky vyrobit 90 kt / 135 kt amoniaku ročně. Vzhledem k charakteru a velikosti výroby navrhuje využití HTE. Pro srovnání, spotřeba průmyslově vyrobených dusíkatých hnojiv v roce 2022 v ČR byla odhadem 390 kt. Tato hodnota je srovnatelná s uvedenou produkcí amoniaku, neboť typické dusíkaté hnojivo užívané v ČR (močovina, dusičnan amonný, dusičnan vápenatý, poslední dva s uměle sníženým obsahem dusíku z legislativních důvodů) má vyšší molární hmotnost i nižší podíl dusíku než amoniak.

Výroba anilinu

Při uvažované tuzemské produkci anilinu ve výši 210 kt/rok (tato hodnota odpovídá produkci společnosti BorsodChem MCHZ) bude potřeba pomocí elektrolyzy ze SMR vyrobit 13 kt vodíku ročně. Takovéto množství by vyžadovalo LTE o příkonu minimálně 81 MWe nebo HTE o příkonu 54 MWe. Vzhledem k charakteru a velikosti výroby navrhuje využití HTE.

Doprava a rezidenční sektor

Pro zásobování vodíkové plnicí stanice pro vozidla, která spotřebuje 1 t vodíku denně, je nutný nízkoteplotní elektrolyzátor o příkonu 2,3 MWe. Dodávka vodíku na plnicí stanice je potenciálně zajímavá podnikatelská příležitost pro chemické podniky, mj. protože vodík na plnicí stanice je výrazně dražší než vodík v průmyslu. Tato skutečnost je dána především logistickými náklady a částečně náklady na kompresi vodíku na vysoké tlaky. Logistické náklady je možné minimalizovat, např. umístěním výroby blízko místa spotřeby, nebo využitím potrubní přepravy vodíku. Zde existuje příležitost pro majitele velkoprostorových areálů, ve kterých budou umístěny SMR, výroba vodíku, a také prodej vodíku v plnicích stanicích. Je pravděpodobné, že v oblasti vodíkové logistiky dojde k dalšímu budoucímu technologickému rozvoji a k nárůstu konkurence a logistické náklady vodíku se sníží. Stejně tak očekáváme snížení investičních nákladů na vysokotlaké vodíkové kompresory, vhodné pro vysoce čistý vodík. Při výrobě suchého vodíku s využitím PEM elektrolyzátoru není nutná další chemická úprava vodíku, při využití alkalického elektrolyzátoru představuje nejdůležitější úpravu deoxygenace. Vzhledem ke specifickým požadavkům na kvalitu vodíku navrhuje využití LTE, konkrétně PEM technologie. Jedna vodíková plnicí stanice představuje příliš

malý odběr pro nasazení jednotky EW, plnicí stanice představuje spíše doplněk k jiné elektrolyzátorové technologii. Další možností je vybudování velkokapacitní plnicí stanice, například v místě očekávané vysoké spotřeby, typicky v intermodálních uzlech, kombinujících různé formy dopravy, např. silniční, železniční a lodní.

Ko-elektrolyza

Další možností je výroba chemických látek procesem vysokoteplotní ko-elektrolyzy. Bez výjimky jde o zajímavé ale málo komerčně zralé technologie. Využitelná je např. pro výrobu amoniaku ko-elektrolyzou dusíku a vody nebo výrobu uhlovodíků ko-elektrolyzou směsi oxidu uhličitého a vody¹⁴.

4. Závěr

Pokročilé malé modulární jaderné reaktory mají obrovský potenciál pro nasazení v chemickém průmyslu jako stálý, spolehlivý, bezúdržbový a prakticky bezemisní zdroj. Cena vyrobené elektrické energie je z jejich fyzikální podstaty vyšší než u velkých jaderných reaktorů a výrazně se liší podle použitých konceptů SMR (cit.¹⁵). Uvádí se typické investiční náklady 4 mil. USD / 1 MWe, což pro 8 MWe jednotku představuje investiční náklady 768 mil. Kč, v cenách roku 2023 uvažujeme s investičními náklady pro 8 MWe jednotku 1–1,5 mld Kč (cit.¹⁵).

Vzhledem k určité výkonové variabilitě chemických procesů očekáváme, že bude možné SMR využívat tak, aby bylo maximum dodávek elektrické energie dodáno v dobách vysokých cen elektrické energie. Dalším benefitem nasazení SMR v chemickém průmyslu je zajištění lokální spotřeby tepla a především elektrické energie a s tím související významná úspora poplatků za distribuci elektrické energie.

Pro nasazení SMR je třeba zjednodušit související legislativu, především zákon 263/2016 Sb, atomový zákon, který v současné době nerozlišuje mezi SMR a velkými jadernými reaktory. Dále je nutné legislativně zakotvit logický fakt, že vodík vyrobený elektrolyzou ve spojení s jaderným zdrojem je vodíkem nízkouhlíkovým.

Očekáváme, že v čase komerčního spuštění budou v kombinaci se SMR využívány především HTE elektrolyzátorové. Cena HTE elektrolyzátorů neustále klesá a pokles se očekává i ve výhledu let 2030 až 2050 (cit.¹⁶). Do roku 2030 se očekává pokles cen elektrolyzátorů nízkoteplotních, i když ne tak výrazný¹⁶. Procesem ko-elektrolyzy s využitím HTE bude v budoucnu možné efektivně vyrábět látky využitelné jako neropná motorová paliva nebo hnojiva. V době komerčního nasazení SMR tak jedno HTE zařízení bude schopné dodat energii pro elektrolyzu, palivový článek, nebo pro ko-elektrolyzu, což značně zvýší variabilitu využití zařízení. Očekáváme, že instalace SMR do chemických podniků a lokální využití elektrické energie a vyrobeného vodíku bude mít v chemickém průmyslu řadu dalších aplikací.

Prezentované výsledky byly realizovány v rámci Institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR.

LITERATURA

1. <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru>, staženo 17. 10. 2023.
2. Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems, Gen IV International Forum, 2013, dostupné na https://www.gen-4.org/gif/jems/c_60729/technology-roadmap-update-2013, staženo 17. 10. 2023.
3. Sebbahi S., Nabil N., Alaoui-Belghiti A., Laasri S., Rachidi S., Hajjaji A.: Mater. Today: Proc. 66, 140 (2022).
4. Hydrogen projects database, International Energy Agency. Dostupné na: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>, staženo 17. 10. 2023.
5. Hanslian D.: Aktualizace potenciálu větrné energie v České republice z perspektivy roku 2020. Dostupné na <https://csve.cz/img/wysiwyg/file/Potencial-vetrne-energie-2020.pdf>, staženo 17. 10. 2023.
6. EGÚ Brno, Oponentní posudek k vybraným tématům z návrhu Národního Klimaticko-Energetického Plánu (NKEP) pro oblast FVE, 2021, dostupné na https://www.solarniasociace.cz/aktuality/20190107_oponentni-posudek-k-nkep-pro-fve.pdf, staženo 17. 10. 2023.
7. Investice a návratnost větrných elektráren, dostupné na <https://www.pro-vetnriky.cz/cs/fakta-o-vetnych-elektrarnach/investice-a-navratnost-ve>, staženo 17. 10. 2023.
8. Tocháčková A., Laciok A., Šilhan M.: Chem. Listy 115, 623 (2021).
9. Gerlof N.: Sustainable Energy Fuels 7, 1893 (2023).
10. Brinkmann T., Giner Santonja G., Schorcht F., Roudier S., Delgado Sancho L.: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Chlor-alkali. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). EUR 26844. Publications Office of the European Union; 2014. JRC91156. Dostupný na <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91156>, staženo 17. 10. 2023.
11. Aneke M., Wang M.: Appl. Therm. Eng. 81, 223 (2015).
12. Blažek J., Kochetkova D., Shumeiko B., Váchová V., Straka P.: Paliva 2, 42 (2020).
13. Zpráva o stavu zemědělství ČR za rok 2022, dostupný na <https://eagri.cz/public/portal/mze/publikace/zpravy-o-stavu-zemedelstvi/zelena-zprava-2022>, staženo 17. 10. 2023.
14. Dvořáková Ruskayová P., Tocháčková A., Šilhan M.: Chem. Listy 115, 134 (2021).
15. Steigerwald B., Weibezahn J., Slowik M., von Hirschhausen Ch.: Energy 281, 128204 (2023).
16. Gerloff N.: Sustainable Energy Fuels 7, 1893 (2023).

M. Šilhan^a, P. Polívka^a, and P. Dvořáková-Ruskayová^b (^a Research Centre Řež, ^b The Extreme Light Infrastructure ERIC, Czech Republic): **Production of Energy and Hydrogen within Chemical Plants Using Small Nuclear Reactors**

The article outlines the possibility of synergistic use of small nuclear reactors and low- and high-temperature electrolysis. The small modular nuclear reactor is compared to common types of renewables. Furthermore, possible small nuclear reactors application in chemical enterprises is shown.

Keywords: small modular nuclear reactors, hydrogen, chemical enterprise, electrolysis

Acknowledgements

The presented results were realized within the Institutional Support of the Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic.



Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.cs>), která umožňuje neomezené využití, distribuci a kopírování díla pomocí jakéhokoliv média, za podmínky řádného uvedení názvu díla, autorů, zdroje a licence.