

**České vysoké
učení technické
v Praze**

**Fakulta strojní
Ústav energetiky**



**Nanotechnologie pro energetiku a jejich perspektiva ve
fotovoltaice**

Bakalářská práce

2022

**Martin
Homola**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Homola** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **495460**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Nanotechnologie pro energetiku a jejich perspektiva ve fotovoltaice

Název bakalářské práce anglicky:

Nanotechnology for energy systems and its prospects in photovoltaic systems

Pokyny pro vypracování:

Nanotechnologie jsou na prudkém vzestupu v řadě oborů a pronikají též do energetiky. Tato práce provede zevrubnou rešerši jednotlivých aplikací, kde jsou nanotechnologie v energetice uvažovány jako perspektivní řešení, případně se již využívají (of nano-povlaků pro náročné aplikace po fotovoltaické systémy, aplikace pro specifické membrány atd.). Následně bude zpracováno zhodnocení přínosů systémů využívajících nanotechnologií pro vybranou aplikaci. Konkrétně v práci bude obsaženo:

- Všeobecná rešerše aplikace nanotechnologií v různých odvětvích energetiky
- Výpočtový model určující parametry vybraných technologií, fotovoltaických systémů, referenčních oproti inovativním využívajících nanotechnologií
- Ekonomický model pro zhodnocení přínosů, zhodnocení perspektivy výroby pro oblast Evropy
- Závěrečné shrnutí a doporučení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Václav Novotný ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

Ing. Václav Novotný
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Nanotechnologie pro energetiku a jejich perspektiva ve fotovoltaice“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Václava Novotného a že jsem uvedl veškeré informační zdroje v souladu s Metodickým postupem o dodržování etických principů při tvorbě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 3.6.2022

.....

Martin Homola

Anotační list

Jméno autora:	Martin Homola
Název BP:	Nanotechnologie pro energetiku a jejich perspektiva ve fotovoltaice
Anglický název:	Nanotechnology for energy systems and its prospects in photovoltaic systems
Akademický rok:	2021/2022
Ústav:	Ústav energetiky
Vedoucí BP:	Ing. Václav Novotný
Bibliografické údaje:	Počet stran: 64 Počet obrázků: 20 Počet tabulek: 4 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Nanotechnologie, skladování, energie, povlak, fotovoltaika, solární, článek, panel, Perovskit, CIGS, DSSC, CNT
Keywords:	Nanotechnology, storage, energy, coating, photovoltaic, solar, cell, panel, Perovskite, CIGS, DSSC, CNT
Anotace:	Práce se zabývá nanotechnologiemi v energetice a jejich perspektivou ve fotovoltaice. První část se zabývá aplikací nanotechnologií ve výrobě, skladování, distribuci a použití energie. Ve druhé části bylo provedeno porovnání solárních panelů na bázi nanotechnologií s klasickými a pro slibné technologie byla provedena realizovatelnost výroby v Evropě.
Abstract:	The thesis deals with nanotechnologies in the energy sector and their perspective in photovoltaics. The first part deals with the application of nanotechnology in energy production, storage, distribution and use. In the second part, a comparison of nanotechnology-based solar panels with conventional ones has been made and the feasibility of production in Europe has been assessed for promising technologies.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu této bakalářské práce, panu Ing. Václavu Novotnému, za odborné vedení, připomínky a především čas, který mi byl ochoten věnovat při vypracovávání této práce.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Nanotechnologie v energetických zdrojích.....	2
2.1 Obnovitelné zdroje energie.....	2
2.1.1 Fotovoltaika.....	2
2.1.2 Fototermální přeměna záření.....	8
2.1.3 Termoelektrika	9
2.1.4 Palivové články	10
2.1.5 Větrná Energie.....	11
2.1.6 Energie moří a oceánů.....	14
2.1.7 Biomasa/biopaliva.....	15
2.1.8 Geotermální energie	16
2.2 Neobnovitelné zdroje energie	17
2.2.1 Jaderná energie	17
2.2.2 Energie z fosilních paliv.....	18
3. Nanotechnologie pro skladování energie.....	20
3.1 Elektrochemické skladování energie	20
3.1.1 Dobíjecí baterie	20
3.1.2 Průtoková baterie.....	22
3.1.3 Superkondenzátor.....	23
3.2 Skladování energie konverzí do paliv	24
3.2.1 Vodík.....	25
3.2.2 Metan.....	27
3.3 Mechanické skladování energie.....	27
3.3.1 Setrvačnick.....	27
3.3.2 Vodní přehrady a přečerpávací vodní elektrárny	28
3.3.3 Stlačený vzduch.....	28
3.4 Termální skladování energie	29
4. Nanotechnologie pro distribuci energie	30
4.1 Elektrická síť	30
4.1.1 Dráty a kabely	30
4.1.2 Transformátory.....	31
4.1.3 Nanosenzory.....	31
4.2 Potrubí	32
4.2.1 Povlaky.....	32

4.2.2	Inhibitory koroze	32
4.2.3	Materiály	32
4.3	Doprava	32
5.	Nanotechnologie pro použití energie	33
5.1	Snížení tření u strojů a vozidel	33
5.2	Lehká konstrukce využívající nanokompozity	33
5.3	Inteligentní, energeticky efektivní technologie budov	33
5.4	Energetická účinnost výrobních procesů	33
6.	Perspektiva nanotechnologické fotovoltaiky	34
6.1	Porovnání fotovoltaických technologií.....	34
6.2	Zhodnocení výroby vybraných fotovoltaických technologií v prostředí Evropy.....	42
7.	Závěr	45
8.	Zdroje.....	46
	Seznam obrázků	55
	Seznam tabulek	56
	Seznam rovnic	56

Seznam symbolů a zkratk

- CNT – Carbon nanotubes – Uhlíkové nanotrubičky
CIGS – Copper indium gallium selenide – Měď indium gallium selen
DSSC – Dye-sensitized solar cell – Grätzelův článek
SOFC – Solid oxide fuel cells – Palivové články s pevnými oxidy
MEA – Membrane electrode assemblies – Membránové elektrodové sestavy
CNF – Carbon nanofiber – Uhlíková nanovlákná
TENG – Triboelectric nanogenerator – Triboelektrický nanogenerátor
FEP – Fluorinated ethylene propylene – Fluorovaný ethylenpropylen
ECCS – Emergency core cooling Systems – Nouzový chladič aktivní zóny
LIS – Lubricant-impregnated surfaces – Povrchy impregnované mazivem
VRFB – Vanadium redox flow batteries – Vanadové redoxní průtokové baterie
PCM – Phase change materials – Materiály s fázovou změnou
LTES – Latent thermal energy storage – Latentní ukládání tepelné energie
MWCNT – Multi-walled carbon nanotubes – Vícestěnné uhlíkové nanotrubičky
QW – Quantum wires – Kvantové dráty
CUI – Corrosion under insulation – Koroze pod izolací
PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System – Fotovoltaický geografický informační systém
pH – potential of hydrogen – vodíkový exponent

Seznam chemických sloučenin

- | | |
|----------------------------|---------------------------------------|
| CeO_2 – Oxid ceričitý | Al_2O_3 – Oxid hlinitý |
| CO_2 – Oxid uhličitý | NO_x – Oxid dusíku |
| SO_x – Oxid siřičitý | CO – Oxid uhelnatý |
| KF – Fluorid draselný | CaO – Oxid vápenatý |
| CoS_2 – Cattierit | Fe_2O_3 – Oxid železitý |
| MnO_2 – Oxid manganičitý | Fe_3O_4 – Oxid železnato – železitý |
| SnO_2 – Oxid cíničitý | $LiBH_4$ – Lithium borohydride |
| MgH_2 – Hydrid horečnatý | $NaBH_4$ – Tetrahydridoboritan sodný |
| BeO – Oxid berylnatý | H_2O – Voda |
| CH_4 – Methan | NH_3 – Amoniak |
| H_2 – Vodík | TiO_2 – Oxid titaničitý |

1. Úvod

Vzhledem k tomu, že světová poptávka po energii stále roste, nabývá na významu vývoj účinnějších a udržitelnějších technologií pro výrobu a skladování energie. Jednou z technologií, která vykazuje obrovský potenciál, je nanotechnologie. Nanotechnologie je relativně nový obor vědy a techniky, který slibuje významný dopad na energetický průmysl. Jako nanotechnologii definujeme jakoukoli technologii, která obsahuje částice s jedním rozměrem menším než 100 nanometrů. V této oblasti vědy a techniky byl již zahájen vývoj a realizace způsobů, jak využít nanotechnologie pro energetiku. Tyto již realizované způsoby jsou popsány v této práci spolu s dalšími stále vyvíjenými technologiemi a zobrazují aktuální stav spolu s budoucím výhledem využití nanotechnologií v energetice.

Využití nanotechnologií začíná již od získávání energie, kde představují možnosti zlepšení jak pro konvenční zdroje energie (fosilní a jaderná paliva), tak obnovitelné zdroje energie, jako je sluneční, větrná, vodní, přílivová, geotermální energie nebo biomasa. Například vrtné sondy s nanopovlakem odolným proti opotřebení umožňují optimalizovat životnost a účinnost systémů pro rozvoj ložisek ropy a zemního plynu nebo geotermální energie, a tím šetřit náklady. Dalšími příklady jsou vysoce odolné nanomateriály pro lehčí a odolnější lopatky rotorů větrných elektráren a také ochranné vrstvy proti opotřebení a korozi pro mechanicky namáhané součásti (ložiska, převodovky atd.). Nanotechnologie budou hrát rozhodující roli zejména při intenzivnějším využívání solární energie prostřednictvím fotovoltaických systémů.

Využití nanotechnologií pro vylepšení zásobníků elektrické energie, jako jsou baterie a superkondenzátory, se ukazuje jako velmi slibné. Nanotechnologie mohou rozhodujícím způsobem zlepšit kapacitu a bezpečnost lithium-iontových baterií, například díky novým keramickým, tepelně odolným a stále pružným separátorům a vysoce výkonným elektrodovým materiálům. Existují také slibné možnosti využití palivových článků s nanotechnologiemi a jejich výhody oproti tradičním palivovým článkům v přenosných zařízeních, včetně delší životnosti a nižších nákladů.

Pokud jde o snížení energetických ztrát při přenosu proudu, existuje naděje, že mimořádná elektrická vodivost nanomateriálů, jako jsou uhlíkové nanotrubičky, může být využita v elektrických kabelech a vedeních. Kromě toho existují nanotechnologické přístupy k optimalizaci supravodivých materiálů pro bezeztrátové vedení proudu.

Nanotechnologie nabízejí množství přístupů k úsporám energie. Příkladem může být snížení spotřeby paliva v automobilech díky lehkým konstrukčním materiálům na bázi nanokompozitů, optimalizace při spalování paliva díky opotřebení odolným, lehčím součástem motoru a nanočásticovým přísadám do paliva nebo dokonce nanočásticím pro optimalizované pneumatiky s nízkým valivým odporem.

Celá práce dále všechny tyto oblasti rozvíjí a popisuje jednotlivé přístupy využití nanotechnologií v energetickém sektoru. Stále se však jedná pouze o obecné shrnutí a práce se zabývá spíše závěry vědeckých prací než ekonomickými aplikacemi. Vzhledem k pokročilému stadiu vývoje fotovoltaiky na bázi nanotechnologií zde však bylo provedeno komplexnější ekonomické zhodnocení, které je u většiny ostatních témat pouze povrchné z důvodu raného stádia vývoje. Na závěr je třeba zmínit, že nanotechnologie mají i mnoho dalších aplikací, které s energetikou úzce nebo vůbec nesouvisejí, ale výzkum v těchto odvětvích by mohl inspirovat další pokroky v energetických aplikacích.

2. Nanotechnologie v energetických zdrojích

2.1 Obnovitelné zdroje energie

2.1.1 Fotovoltaika

V oblasti výroby energie se zdá, že největší uplatnění nanotechnologie je v oblasti účinného využití sluneční energie pomocí fotovoltaických článků. Nanotechnologie lze využít k zavedení alternativních materiálů a výrobních metod k výrobě cenově výhodných fotovoltaických článků s přijatelnou, ne-li vyšší účinností přeměny energie. Klasické nanostruktury, jako jsou uhlíkové nanotrubičky (Carbon nanotubes, CNT), fullereny a kvantové tečky, se používají k tomu, aby byly solární články lehčí, levnější a účinnější. Zvýšený poměr povrchu nanočástic k jejich objemu zlepšuje sběr slunečního záření tím, že je slunečnímu záření vystaveno více vodivých povrchů. Také použití nanomateriálů, jako je selenid olovnatý, vede k uvolnění většího počtu elektronů (a tedy i více elektřiny) při dopadu fotonu světla. Strukturální vlastnosti fotovoltaických článků se navíc modifikují pomocí nanotechnologií. Na bázi nanotechnologií vzniká mnoho nových typů fotovoltaických článků jako jsou například perovskitové, směs mědi, india, gallia a selenu (Copper indium gallium selenide, CIGS), Grätzelovy, polymerní a průhledné články. Přes to vše však stále zůstávají některé nedostatky a obavy, které jsou pro tyto materiály charakteristické. [1][2]

První a nejzřetelnější nevýhodou fotovoltaiky využívající nanomateriály je skutečnost, že účinnost zařízení zůstává v průměru nižší než u tradičních fotovoltaických článků. Jednou z příčin, které k tomu přispívají, je vysoký poměr povrchu k objemu nanomateriálů. To zvyšuje podíl povrchových defektů, které zvyšují rekombinační ztráty a brání transportu fotogenerovaných nosičů náboje. Zmírnění tohoto konkrétního problému vyžaduje zvýšený důraz na vhodnou architekturu nanostruktur, jako jsou jednorozměrné materiály, a povrchové ligandy, které umožňují lepší vedení náboje. Dalším zásadním problémem, který lze rovněž řešit vhodnou funkcionalizací a modifikací povrchu nanostruktur, je otázka stability. Platí, že vzhledem k náchylnosti povrchových stavů mohou faktory okolního prostředí, jako je vystavení světlu a vlhkosti, způsobit degradaci optických a elektronických vlastností nanomateriálů. Barviva mají tendenci fotobělit (blednout), zatímco polovodičové nanostruktury jsou náchylné k fotooxidaci a tmavnutí. Možnost zapouzdření a hermetického uzavření celého zařízení však také není atraktivní, protože zvyšuje náklady na materiál. [2]

Pokud jde o náklady, je třeba zmínit, že aby byly skutečně nákladově efektivní bude třeba výrobní postupy, které se v současnosti používají pro nanosyntézu, rozšířit pro velkovýrobu a umožnit zpracování "roll-to-roll" na průmyslové úrovni. Kromě toho většina nanomateriálů používaných ve fotovoltaických člancích v současnosti využívá těžké kovy a další složky, které by nevydržely bezpečné dlouhodobé používání. Pro budoucí použití bude nezbytné začlenit netoxické prvky, zejména do polovodičových nanomateriálů. [2]

Použití nanočástic při výrobě solárních článků má následující výhody:

- (1) Snížení výrobních nákladů díky použití nízkoteplotního procesu podobného tisku namísto vysokoteplotního vakuového nanášení, které se obvykle používá k výrobě běžných článků z krystalického polovodičového materiálu. [3]
- (2) Snížení nákladů na instalaci díky výrobě pružných rolí namísto tuhých krystalických panelů. Tuto vlastnost budou mít i články vyrobené z tenkých polovodičových vrstev. [3]
- (3) V současné době dostupné nanotechnologické solární články nejsou tak účinné jako tradiční, ale jejich nižší cena to kompenzuje. V dlouhodobém horizontu by nanotechnologické verze měly být levnější a s využitím kvantových teček by měly být schopny dosáhnout vyšší účinnosti než konvenční články. [3]

Optimalizace pásmové mezery pro nejvyšší účinnost převodu

V tradiční fotovoltaice jsou nevodivé elektrony v polovodiči vybuzeny k pohybu absorpcí slunečního světla a mohou být využity jako zdroj elektrické energie. K vybuzení elektronů je zapotřebí světlo, které přesně odpovídá rozdílu energií mezi nevodivými a vodivými elektrony. Tento energetický rozdíl, označovaný jako "pásmová mezera" (band gap), je specifickou materiálovou vlastností pro každý polovodič. Jedním z cílů vývoje fotovoltaiky je optimalizace pásmové mezery polovodiče kombinací různých materiálů tak, aby k vybuzení volných elektronů byla použita co největší část slunečního světla a tím se zvýšila účinnost solárních článků. [4]

Jedním z nejúčinnějších článků s konverzní účinností až 46 % jsou "křemíkové stohované články" (wafer-based stacked cells) vyrobené z polovodičových systémů III-V. V těchto solárních článcích jsou kombinovány nano až mikrometrové tenkovrstvé systémy polovodičových materiálových vrstev s lišícími se pásmovými mezerami tak, aby bylo sluneční spektrum využíváno co nejefektivněji k přeměně světla na elektrinu. Avšak, vzhledem ke složitému výrobnímu procesu jsou tyto články často stále příliš nákladné. [4]

Jejich použití je ekonomičtější, pokud je sluneční světlo koncentrováno prostřednictvím relativně nákladově efektivní optiky, čímž se zvýší měrný výkon na plochu článků. Takové koncentrační moduly jsou komerčně dostupné a existují reálné možnosti podstatného snížení nákladů další optimalizací systému a ekonomickými efekty z rozsahu výroby. Dalším přístupem ke snížení nákladů na tyto solární články je jejich použití v kombinaci s levnějšími křemíkovými substráty. [4]

Přístupy k využití kvantových teček pro zvýšení účinnosti solárních článků jsou stále ve fázi základního výzkumu. Kvantové tečky jsou klastry polovodičových sloučenin v nanorozměrech s neobvyklými optoelektronickými vlastnostmi, které lze modifikovat pomocí kvantově fyzikálních efektů v závislosti na velikosti klastru. Aplikace v solárních článcích jsou zajímavé, protože na jedné straně lze pomocí kvantových teček generovat několik párů elektron-díra pro každý foton a na druhé straně lze absorpční pásy optimálně přizpůsobit vlnovým délkám dopadajícího světla. V laboratorním měřítku lze pomocí nanodrátek vyrábět trojrozměrné sítě kvantových teček nebo jiné struktury, které mohou být zajímavé pro aplikace v solárních článcích. Takové články umožňují teoretickou účinnost přeměny více než 60 %. Současný výzkum je však k tomuto cíli ještě daleko. [4]

Nanostruktury pro optimalizaci energetického výnosu

Bez ohledu na typ použitého materiálu a typ článku jsou přijímány nanotechnologické přístupy s cílem dále optimalizovat účinnost solárních článků. Zvýšení účinnosti lze například dosáhnout použitím nanostrukturovaných antireflexních vrstev, které umožňují lepší využití světla. Jedním z vývojových kroků, který je připraven k uvedení na trh, jsou antireflexní vrstvy pro tabulové sklo založené na nanoporézním povlaku oxidu křemičitého. Vrstvy se vytvářejí na základě procesu sol-gel a následného povlakování ponořením. Pórovitost umožňuje, aby se efektivní index lomu skla přiblížil indexu lomu okolního vzduchu, čímž se sníží reflexní ztráty skleněných tabulí z obvyklých 8 % na 2 %. [4]

Alternativní přístup je založen na nanotexturovaných, průhledných, vodivých oxidových vrstvách, které se používají jako přední elektrody, aby se minimalizoval rozptyl a ztráty odrazem světla. V organických solárních člancích lze velkoplošné periodické povrchové struktury vytvořené pomocí holografických expozičních metod přenést na polymerní vrstvu solárního článku pomocí cenově efektivní metody ražení. Kromě toho se pracuje na zdokonalení zadních reflektorů s cílem dále zvýšit využití světla v substrátu. Za tímto účelem se místo běžných kovových vrstev používají fotonické krystaly nebo nekovové nanovrstvy, které nabízejí potenciál pro další zvýšení účinnosti jako je například stříbro. [4]

Probíhá také výzkum povlakových struktur, kterými se frekvence slunečního spektra převádějí na světelná kvanta s vyšší (vzestupná konverze) nebo nižší energií (sestupná konverze), aby se optimalizovaly pro absorpční vlastnosti použitého materiálu solárního článku. Slibnou možností se zdají být nanoklastry kovů vzácných zemin zabudované do sklokeramiky, s jejichž pomocí lze infračervené a ultrafialové světlo převést na viditelné světlo využitelné ve fotovoltaice (obr. 1). [4]



Obrázek 1: Ukázka skleněné keramiky dopované kovy vzácných zemin pro vzestupnou a sestupnou konverzi [4]

Použití fotokatalyzátorů na bázi nanotechnologií v solárních člancích

Fotokatalyzátory jsou obvykle stabilní polovodičové oxidy, které sběrem fotonů vytvářejí pár elektron-díra. Tyto elektronové díry interferují s molekulami na povrchu částic. Fotokatalyzátory se používají v solárních panelech, čističkách vody, samočisticích čočkách, rozkladu organických sloučenin atd. Silný absorpční potenciál fotokatalyzátorů a jejich citlivost na viditelné a ultrafialové světlo rozšířily spektrum jejich použití. V tomto ohledu byla použita řada nanofotokatalyzátorů, jako je oxid titaničitý, oxid zinečnatý, sulfid kademnatý atd. Největším problémem fotokatalyzátorů je akumulace malých vlnových délek slunečního světla.

V důsledku toho klesá jejich produktivita, užitečnost a rostou ekonomické náklady. Pro řešení tohoto problému a spotřebování delších vlnových délek (ve spektru vlnových délek viditelného světla) je třeba fotokatalyzátory vzájemně míchat nebo používat dvě formy katalyzátorů současně. Například aplikace nanočástic stříbra na oxid titaničitý je úlohou fotokatalyzátoru oxidu titaničitého při absorpci vlnových délek. [5][6]

Vzhledem k tomu, že fotokatalyzátory absorbují specifická světelná spektra, jejich použití v solárních článcích zlepšuje absorpci světla v článku, a tím zvyšuje výkon solárního článku. Většina nanokatalyzátorů má také často samočisticí, protipárové a protiprašné vlastnosti a jejich použití vně i uvnitř těla solárního článku zajišťuje atmosféru bez znečišťujících látek ve vzduchu a překážek pro světlo v článku, což zlepšuje absorpci slunečního světla a výkon článku. Nanofotokatalyzátory mají pozitivní vliv i na další faktory, které ovlivňují katalytickou aktivitu, jako je separace a rychlost rekombinace elektron-děrových párů, teplota a pH. [5][6]

Samočisticí a antireflexní nanovrstvy, které chrání a zvyšují účinnost

Faktory prostředí, jako je absorpce světla z povrchu solárního článku, deštivé počasí a překážky vznikající při pohybu světla, například usazeniny na povrchu solárních článků, jsou jedním z faktorů, které omezují výkon solárních článků. Technologický pokrok a vytváření nanometrových vrstev s fascinujícími samočisticími a antireflexními vlastnostmi zlepšují výrobu solární energie a řeší tento problém. Nanočástice oxidu titaničitého, které mohou zachycovat organické sloučeniny, například uhlovodíky, tím, že blokují ultrafialovou vlnovou délku slunečního světla, mohou udržovat povrch solárních článků čistý (obr. 2). [6]

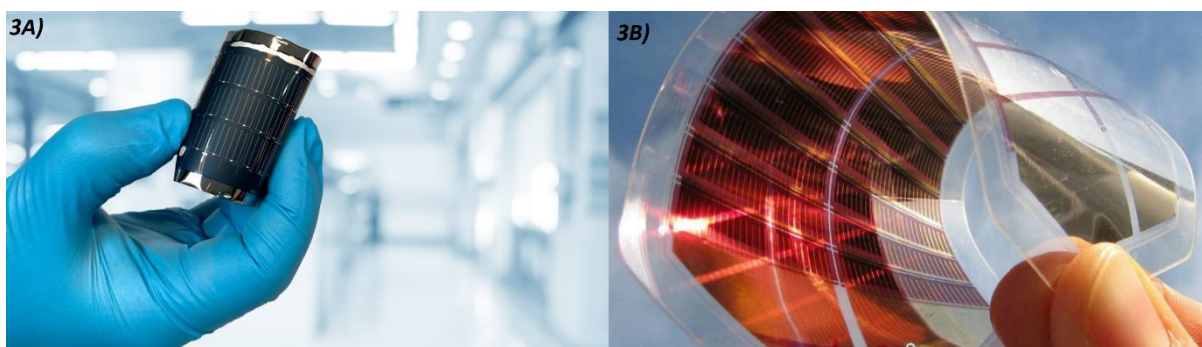


Obrázek 2: Důsledek samočisticí a antireflexní nanovrstvy [6]

Tímto způsobem bude reakce účinnější a vývoj elektronů a děr začne být produktivnější. Využitím nanotechnologií lze dokonce upravit hydrofilní a hydrofobní vlastnosti povrchu skla tak, aby se zdálo, že voda povrch nezlhčuje. Protože množství výstupu elektronů a děr v polovodičových článcích je úměrné intenzitě slunečního záření, je eliminace odrazivé části slunečního záření ochranným sklem povrchu solárního článku a jeho přechod na polovodičový povrch jednou z cest ke zvýšení výkonu. V tomto ohledu byly navrženy antireflexní nanopovlaky složené z nanostruktur, jako jsou nanokovy z polydimethylsiloxanu nebo nanometrové póry oxidu křemičitého z nanočástic oxidu titaničitého. Vzhledem k tomu, že všechny tyto nanovrstvy jsou teprve v laboratorní fázi vývoje, zvýšení výkonu solárních článků by je učinilo žádoucími pro komerční využití. [6]

Anorganické tenkovrstvé solární články

Pokud jde o anorganické tenkovrstvé solární články, jsou nanotechnologie potřebné především z hlediska technologie povlakování pro optimální konstrukci článků. Kromě fotoaktivní vrstvy, tlusté jen několik mikrometrů, se typický tenkovrstvý design solárních článků skládá také z vrstev v nanoměřítku, které působí jako podporovatelé přilnavosti a nárazníkové zóny pro kontakt se substrátem, kovovým zadním kontaktem a průhlednou přední elektrodou. Kromě krystalického a amorfního křemíku se pro anorganické tenkovrstvé solární články používají i další kombinace materiálů, jako je měď, indium, galium a selen (tzv. článek CIGS, zobrazen na obrázku 3A [7]), perovskit (obr. 3B [8]), telurid/selenid kadmia nebo sloučeniny polovodičů III/V (například nitrid galia, arsenid galia, fosfid galia a india). Použitím těchto tenkovrstvých solárních článků lze dosáhnout účinnosti vyšší než 20 %. [4]

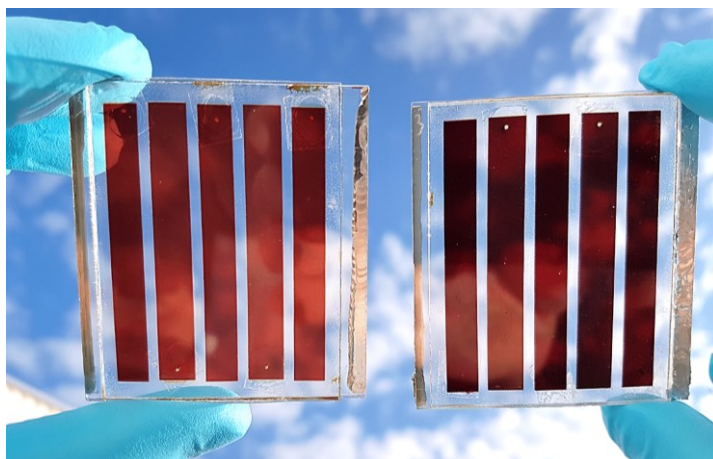


Obrázek 3: Zobrazení dvou článků 3A: CIGS solární článek [7] 3B: Perovskite solární článek [8]

Kromě již zavedených nanotechnologií tenkovrstvých solárních článků nabízí využití nanokrystalů potenciál k nahrazení složitých procesů vakuového nanášení nákladově efektivnějšími procesy v kapalně fázi nebo k nahrazení materiálů znečišťujících životní prostředí, jako je olovo v perovskitových solárních článcích, alternativními látkami, jako je například cín. [4]

Grätzelovy články (barvivem senzitivovaný článek)

Grätzelovy články (dye-sensitized solar cell, DSSC) využívají k separaci náboje nanočástice oxidu titaničitého dopované molekulami barviva (například různé komplexy ruthenia). Absorpce světla v molekulách barviva vede k uvolnění elektronů, které jsou následně přijaty částicemi oxidu titaničitého a prostřednictvím redoxního elektrolytu přeneseny na elektrodu. Mezi výhody DSSC patří nákladově efektivní výrobní metody využívající síťotisk, aplikace využívající dokonce i difúzní dopadající světlo (například v interiérových aplikacích) a možnosti průhlednosti (obr. 4 [9]) a barevného designu článků otevírající zajímavé možnosti architektonické aplikace. Nevýhody zahrnují použité chemicky reaktivní kapalně elektrolyty, které mohou unikat do prostředí, dále stále relativně nízkou účinnost dosahující do dvanácti procent a omezenou dlouhodobou stabilitu. [4]



Obrázek 4: DSSC při ukázce průhlednosti [9]

Polymerní solární články

Polymerní solární články využívají k přeměně energie organické polovodiče. Konjugované polymery se používají jako donory elektronů absorbující světlo a deriváty fullerenu jako akceptory elektronů. Obě složky jsou integrovány jako 100 až 300 nanometrů tlusté kompozitní vrstvy mezi vrstvami pro přenos náboje a elektrodami v sendvičové struktuře článku. [4]

Mezi výhody organických solárních článků patří cenově výhodné materiály, výrobní metody a flexibilita modulů, které se mohou přizpůsobit téměř jakýmkoli tvarům a konturám objektů a výrobků. Cílem je dosáhnout hromadné výroby velkoplošných modulů v tradičním tiskovém procesu převíjením substrátu (roll-to-roll process). Pomocí optimalizace materiálů a konstrukce článků se usiluje o účinnost přibližně deset procent a životnost až několik let. [4]

Průhledné solární články

Hlavní složení transparentních solárních článků je směs průsvitného substrátu (ze skla nebo plastu) a nanovrstev materiálů specifických optických vlastností a tloušťky, které jsou zodpovědné za absorpci mimo spektrum viditelného světla. Průhledné články propouští viditelné světlo a následně spotřebovávají ultrafialové a infračervené světlo, čímž produkují elektřinu. Tento inovativní aspekt průsvitných solárních článků umožňuje širokou škálu aplikací v budovách a automobilech. [6]

Objem viditelného světla v různých formách článků se pohybuje od 50 % do 80 %. Vědci očekávají, že s pomocí nanotechnologií by nebylo obtížné dosáhnout 12 % výkonu, aniž by se zhoršily vlastnosti pohybu buněk. Nejtlustší vrstvou tohoto systému je skleněná nebo plastová deska, ke které je přidána deska s mřížkou a povlakem. Některé povlaky se přidávají k podkladu v nanorozměrech. Uprostřed vrstev jsou dvě aktivní buňky, které absorbují stimulované světlo a emitují elektrony. Jednou z těchto dvou sloučenin je chloroaluminiumftalocyanin, který slouží jako organický donor elektronů, a druhou je elektronový receptor uhlíku 60 (C60). Tloušťka chloroaluminu ftalocyaninu je 15 nm a C-60 je 30 nm. Šířka těchto elektrod je menší než 20 nm. Vzhledem k tomu, že elektrody mohou být průsvitné (a nejsou vyrobeny z běžného kovu), lze na konec článku vložit povlak, který napomáhá opakování cyklu absorpce a přeměny. Zjistilo se, že během této zvláštní funkce se velká část viditelného světla pohybuje napříč a ven. Krátké a dlouhé čáry prodlouženého spektra ve slunečním světle jsou pohlcovány a přeměňovány. [6]

2.1.2 Fototermální přeměna záření

Na rozdíl od fotovoltaiky nejsou nanotechnologie pro fototermální aplikace potřebné pro optimalizaci pásmové mezery a účinnost fotoelektrické konverze. Stejně jako u solárních článků zajišťují nanooptimalizované antireflexní povlaky v solárních tepelných přijímačích, aby ztráty odrazem slunečního světla byly co nejmenší (obr. 5). Kromě toho se nátěrová řešení používají k minimalizaci ztrát tepelné energie vyzařováním v důsledku tzv. nízkoemisních vrstev, a tím ke zlepšení absorpčních vlastností přijímače. Tyto povlaky, které se obvykle vyrábějí fyzikálními metodami ve vakuu, musí být také stabilní při mechanickém zatížení a korozi, jakož i tepelně odolné. To platí zejména pro fototermální elektrárny s parabolickým žlabem, v nichž musí trubice přijímače dlouhodobě odolávat pracovním teplotám až 450 stupňů Celsia. Odborné znalosti nanotechnologických povlaků umožňují integrovat různé požadované vlastnosti do optimalizované konstrukce vrstvy. [4]



Obrázek 5: Ukázka přijímacích trubíc s nanovrstvou pro fototermální elektrárny.[4]

Další aplikace nanotechnologií se týká přímých solárních absorpčních kolektorů, a to konkrétně nahrazením vody nanotekutinami. Vzhledem k nízké absorpční schopnosti vody, která dokáže absorbovat pouze asi 13 % dopadajícího slunečního záření se výzkum zaměřil na využití nanotekutin se zlepšenými termofyzikálními vlastnostmi ke zlepšení výkonu solárních tepelných kolektorů. [10]

K jednomu takovému zlepšení byly použity syntetizované nanočástice CeO_2 a při koncentraci 0,01 % v nanotekutině CeO_2 /voda došlo ke zlepšení tepelného výkonu solárního ohřivače vody o 9,3 % [11]. Dále byl zkoumán vliv použití nanotekutiny Al_2O_3 jako absorpčního média v plochém solárním kolektoru výsledky ukazují, že použití 1,5 % (optimálního) objemového podílu částic nanotekutiny Al_2O_3 zvyšuje tepelnou účinnost i úsporu kgCO_2/kWh v hybridním režimu solárního kolektoru ve srovnání s vodou jako pracovní kapalinou o 31,64 %. [12]

Pro fototermální aplikace jsou důležitými vlastnostmi nanotekutin vysoké součinitele přestupu tepla pro kapaliny s vysokými body varu a středními tlaky. Zvýšené rychlosti přenosu tepla v solárních kolektorech by mohly snížit potřebu čerpacího výkonu. Ideální nebo dokonce optimalizované nanotekutiny pro fototermální aplikace však zatím neexistují. Aplikace nanotekutin v solárních energetických aplikacích je ale stále v počátcích. Praktické využití nanotekutin je ovlivněno hlavními faktory, jako jsou výrobní náklady, metody syntézy, fyzikální a chemické parametry. Budoucí vývoj v oblasti nanotechnologií by však měl tyto faktory překonat. [13]

Použití nanotekutin v solárních kolektorech může pomoci experimentálních i teoretických výzkumů zvýšit účinnost kolektorů, avšak s určitými omezeními. Experimentální práce narazily na zásadní omezení, jako je shlukování částic, stabilita, eroze a koroze zařízení pro přenos tepla. Pro řešení špatné dlouhodobé stability nanotekutiny z důvodů shlukování nanočástic, srážení a sedimentace byl navržen přídavek povrchově aktivních látek a aditiv jejich použití však může mít nepříznivý dopad na vlastnosti nanotekutiny. Numerické simulace stále vyžadují pro různé aplikace solárních kolektorů přesnější modely, jako například modely dvoufázových směsí. Na základě výzkumu bylo zjištěno, že objemový podíl a velikost částic hrají hlavní roli při určování účinnosti. Koncentrace nanotekutin v hmotnostních a objemových procentech spolu s pH hrají také významnou roli ve výkonu solárního kolektoru. [10][13]

Je třeba zdůraznit relativně malý počet článků pojednávajících o dalších vlastnostech nanotekutin, jako je povrchové napětí, fototermická odezva a viskozita. Kromě zvýšení tepelné vodivosti bylo navíc provedeno jen velmi málo modelových studií, které by předpovídaly vlastnosti nanotekutin. Pro další vývoj nanotekutin je tedy nezbytné zkoumat jejich jedinečné vlastnosti a vyhodnocovat jejich výkon v přímých fototermálních absorpčních kolektorech. [10]

2.1.3 Termoelektrika

Termoelektrika je mimořádně zajímavým zdrojem elektrické energie díky své schopnosti přeměňovat tepelný tok přímo na elektřinu. Termoelektrická zařízení jsou snadno škálovatelné měniče energie, které nemají žádné pohyblivé části ani kapalná paliva, takže jsou použitelné téměř v každé situaci, kde je velké množství odpadního tepla. Řada výzkumných skupin se snaží najít ideální materiál s vhodnými vlastnostmi pro vytvoření účinného termoelektrického efektu a zdá se, že nanomateriály jsou pro tento účel vhodné. [14]

Nanotechnologické inovace, které byly prokázány v nedávných výzkumných pracích, mohou termoelektrice poskytnout nové podněty díky podstatně vyšší účinnosti. Nanostrukturní termoelektrické materiály jsou mimořádně zajímavé, protože elektrické a tepelné vlastnosti materiálu lze specificky ovlivnit velikostí struktury. Nanostrukturní materiály s mnohem vyšším podílem hranic zrn lze vytvářet pomocí nových výrobních metod. Hranice zrn vedou ke snížení transportu tepla v důsledku mřížkových vibrací v pevném tělese, zatímco elektrická vodivost není ovlivněna nebo je zhoršena jen nepatrně. To je hlavní požadavek na zvýšení kvality termoelektrického materiálu. Díky charakterizaci vztahu mezi strukturou, složením a vlastnostmi na nanoúrovni by mělo být v budoucnu možné navrhovat materiály s požadovanými vlastnostmi. Nanostruktury zkoumané v souvislosti s termoelektrickými materiály zahrnují mimo jiné nanostrukturované povrchy, kvantové tečky nebo kvantové dráty. Jako vysoce účinné termoelektrické materiály se osvědčily nanostrukturované křemíky, křemík/germánium, skutterudit (sulfidy kobaltu a arsenu), klatrátové sloučeniny nebo supermřížky z teluridu vizmutu nebo teluridu antimonu s kvantovými tečkami. [4]

Termoelektrické materiály na bázi teluridu vizmutu jsou dokonalým příkladem, který podtrhuje roli nanomateriálů pro termoelektrická zařízení. Materiály z teluridu vizmutu jsou nejvhodnější pro aplikace při pokojové teplotě. Použitím těchto nanostruktur dochází ke snížení tepelné vodivosti, což se zdá být nejdůležitějším přínosem nanostruktur pro termoelektrické materiály. Dobrý termoelektrický materiál má tedy velmi nízkou tepelnou vodivost, ale velmi dobrou elektrickou vodivost. Uhlíkové nanotrubičky a grafen také jako termoelektrické materiály vykazují lepší termoelektrické vlastnosti. Pláty nanotrubiček byly například použity ke konstrukci termočlánků, které generují elektřinu, když mají strany článku různou teplotu. Tyto listy nanotrubiček by se mohly omotat kolem horkých trubek, například výfukového potrubí automobilu, a vyrábět tak elektřinu z tepla, které obvykle přichází nazmar. [14][15]

Byl také vyvinut nový levný materiál pro zachycování části obrovského množství energie, kterou stroje a zařízení vyzařují jako teplo. Tento termoelektrický nanomateriál by mohl zachycovat teplo ztracené zařízeními, od mobilních telefonů po motory vozidel, a přeměňovat je přímo zpět na užitečnou elektřinu. Vyrábí se pomocí nízkoteplotního výrobního procesu založeného na roztoku, takže je vhodný k nanášení na pružné plasty pro použití téměř kdekoli. Materiál vykazuje slibné termoelektrické vlastnosti. Jedním z důležitých parametrů dobrého termoelektrického materiálu je zvýšení Seebeckova koeficientu, který odpovídá napětí generovanému při působení teplotního gradientu. Týmu se také podařilo prokázat, že pro zvýšení Seebeckova koeficientu je důležitý efekt zvaný kvantové omezení, který mění elektronické vlastnosti materiálu při jeho zmenšení na nanorozměr. [16]

2.1.4 Palivové Články

Palivový článek se obvykle uvažuje ve spojitosti s vodíkem, protože mění vodík a kyslík na vodu, přičemž v procesu vyrábí elektřinu a teplo. Děje se tak způsobem šetrným k životnímu prostředí, bez škodlivých emisí oxidu uhličitého (CO_2). Mimo to lze pro palivový článek použít také metan a metanol. Palivový článek lze definovat jako elektrochemicko-energetické zařízení, které přeměňuje chemickou energii paliva, jako je vodík nebo metanol, na elektrickou energii prostřednictvím chemické reakce s oxidačním činidlem, jako je kyslík nebo vzduch. [17]

Nanotechnologie otevírají inovační a optimalizační možnosti pro všechny běžné systémy palivových článků. Zejména optimalizované elektrody, elektrolyty, katalyzátory a membrány umožňují zvýšení výnosu při přeměně chemické energie. Například palivových článků s pevnými oxidy (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) lze iontovou vodivost zlepšit použitím keramického nanoprášku na bázi zirkonia stabilizovaného yttriem. Dalšího vylepšení SOFC je možné docílit použitím nanomateriálů s integrací uhlíku nebo grafenu pro zvýšení výkonnosti materiálu při provozních teplotách. [4][18]

Pokud jde o membránové palivové články, optimalizační přístupy se týkají především polymerní membrány, kde je cílem zvýšit její teplotní stabilitu mimo jiné použitím anorganicko-organických nanokompozitů. Zde jsou funkcionalizované polymery modifikovány anorganickými nanočásticemi pomocí sol-gel procesů. Vyšší provozní teploty znamenají, že lze dosáhnout lepší účinnosti a snižuje se citlivost katalyzátoru na oxid uhelnatý, který vzniká při výrobě vodíku z metanolu v procesu reformování. Kromě toho hraje důležitou roli nanostrukturování elektrodových materiálů, které zvětšuje aktivní povrch. To umožňuje dosáhnout nejvyšší možné účinnosti při elektrochemické přeměně vodíku na kyslík nebo při výrobě vodíku přeměnou zemního plynu za co nejnižšího použití nákladných katalyzátorů z drahých kovů. [4][17]

Vyvinuta byla také membrána s použitím křemíkové vrstvy s póry o průměru asi 5 nanometrů, která je pokryta vrstvou porézního oxidu křemičitého. Vrstva oxidu křemičitého je navržena tak, aby zajistila, že voda zůstane v nanopórech. Voda se spojuje s molekulami kyseliny podél stěny nanopórů a vytváří kyselý roztok, který zajišťuje snadnou cestu vodíkovým iontům přes membránu. Hodnocení této membrány ukázalo, že má mnohem lepší vodivost vodíkových iontů (byla zaznamenána 100krát lepší vodivost) v podmínkách nízké vlhkosti než membrány běžně používané v palivových článcích. [19]

Byla též zahájena výroba tzv. membránových elektrodoých sestav (membrane electrode assemblies, MEA) pro bezpečné a cenově výhodnější vysokoteplotní membránové palivové články. MEA používá místo polymerních membrán dopovaných kyselinou fosforečnou pevné, neextrahovatelné polymerní elektrolyty. Dalšího vývoje MEA bylo dosaženo ve výzkumném projektu, kde byly membrány vyrobeny z vysoce sulfonovaných polyfenylensulfonů. Zde byly tzv. multiblokové kopolymery strukturovány tak, že byla vytvořena speciálně uspořádaná nanomorfologie. Tato nanostrukturace umožnila vyvinout chemicky a mechanicky stabilní vysokoteplotní palivové články s protonovou výměnnou membránou s velmi vysokou protonovou vodivostí. [4]

V palivových článcích se katalyzátory používají s palivy, jako je vodík nebo metanol, k výrobě vodíkových iontů. V tomto procesu se obvykle používá katalyzátor z platiny, který je velmi drahý. Ke snížení potřebného množství platiny se používají nanočástice platiny nebo se používají nanočástice jiných materiálů, které platinu zcela nahrazují, a tím snižují náklady. [20] Z toho důvodu byl vyvinut model pro předpověď optimální velikosti pro katalýzu nanočástic platiny. Ze kterého bylo ověřeno, že částice o průměru jednoho nanometru a obsahující přibližně 40 atomů platiny vykazují zvýšenou katalytickou účinnost [21]. Dále byly také například vyvinut "nanoplatinový" katalyzátor využívající platinu a olovo, který má vysokou úroveň redukce kyslíku a zároveň dlouhou životnost [22]. Jako další příklad byl také vyvinut katalyzátor využívající nanočástice platiny a kobaltu, který má 12krát vyšší katalytickou aktivitu než čistá platina. Za účelem dosažení tohoto výkonu vědci žíhali nanočástice tak, aby vytvořily krystalickou mřížku, čímž se zmenšily rozestupy mezi atomy platiny na povrchu, což zvýšilo jejich reaktivitu [23]. Také bylo zjištěno že výrazného snížení množství platiny je také možné dosáhnout řízením hustoty balení nanočástic platiny, protože vzdálenost mezi nanočásticemi platiny ovlivňuje katalytické chování [24].

Dalším snížením nákladů by se dalo docílit použitím nanočástic jiných materiálů, které platinu zcela nahrazují. Jedním takovým je katalyzátor vyroben z listu grafenu pokrytého nanočásticemi kobaltu [25]. Dále byly například vyrobeny nanodestičky grafenu s halogenovanými hranami, které mají dobré katalytické vlastnosti. Vědci připravili nanodestičky kulovým mletím grafenových vloček v přítomnosti chloru, bromu nebo jódu [26].

Nanotechnologie dále mohou hrát významnou roli ve skladování vodíku a metanu využívaného v palivových článcích což je popsáno v jejich příslušných kapitolách.

2.1.5 Větrná Energie

Větrnou energii lze přeměnit na užitečnou formu energie. Například větrné turbíny ji přeměňují na elektřinu, větrné mlýny se používají k její přeměně na mechanickou energii a větrná čerpadla slouží k využití energie větru při čerpání vody nebo odvodňování. Nanotechnologie lze použít při vývoji nátěrů, maziv a lehkých, vysoce odolných materiálů používaných při přeměně větrné

energie. Kromě toho lze použít snímací materiály založené na nanotechnologiích ke sledování stability nebo případných poškození. [27]

Větrné turbíny mají své problémy, které musí přijít v úvahu. Jedním z nich je koroze lopatek, které lze předejít nebo ji snížit použitím ochranného povlaku, jenž snižuje náklady na údržbu a prodlužuje životnost větrných turbín. Byla zkoumána odolnost proti korozi a opotřebení elektrolyticky nanášeného nikl-fosforového povlaku na plastové kompozity vyztužené skleněnými vlákny, které jsou široce využívány v lopatkách větrných turbín. Na základě získaných výsledků se tímto postupem povlakování zvýšila odolnost materiálu proti vodní korozi. [27]

Dále byl také navržen superhydrofobní povlak, který je vytvořen z nanočástic oxidu křemičitého. Tyto povlaky byly použity u větrné turbíny za účelem ochrany před proudem vody a ultrafialovým zářením. Pro komponenty větrných turbín se zkoumají také nanokompozity z polymeru uhlíkových nanotrubiček (Carbon nanotubes, CNT) a polyimid/ Al_2O_3 , protože tyto materiály mají některé výhody, jako je zlepšení mechanických a tepelných vlastností. Dále bylo zkoumáno zlepšení lopatek větrných turbín pomocí hybridních vláken a polymeru, které jsou vyztuženy nanočásticemi oxidů, karbidů a boridů. Dalším výzkumem prošla kombinace Salisburyho absorpční struktury a uhlíkového nanokompozitu pro lopatky větrných elektráren za účelem snížení radarového rušení. Došlo k návrhu nanokompozitní vrstvy pro lopatky větrných turbín, která zvyšuje odolnost lopatek a chrání je před úderem blesku, deštěm a pískem. Studován byl také vliv vyztužení polymeru nanohlinítky na mechanické vlastnosti. A pro výrazné snížení poškození způsobeného bleskem byla v lopatkách větrných turbín využita kombinace epoxidu a nanokompozitů oxidu grafenu. [27][28]

Dalším problémem lopatek je, že lopatkové listy rotoru na bázi plastů vyztužených skelnými vlákny již dosáhli svých limitů. Listy rotoru větrné turbíny určují maximální energetický výnos, který lze z větru získat, a to zejména v pobřežních zařízeních s průměrem rotoru až 200 metrů a hmotností lopatek 50 tun. Alternativu zde však nabízejí plasty vyztužené uhlíkovými vlákny. Inovativní materiálové systémy pro materiály rotorových listů mohou také nabývat na důležitosti, jako jsou nové, lehké a stabilní nanokompozity skládající se z epoxidů vyztužených uhlíkem a skelnými vlákny, kde jsou CNT přidávány do pryskyřicové matrice jako stabilizační složky. [4]

Uhlíkové nanotrubičky také nabízejí potenciál pro ochranu lopatek rotorů větrných turbín před námrazou. Listy rotoru pokryté ledem ztrácejí svou původní aerodynamiku a generují méně energie. Bylo zjištěno, že navzdory silnému větru se zamrzlé turbíny otáčejí podstatně pomaleji a čas od času se dokonce vypínají, což má za následek až 80 % ztrát výkonu turbín způsobených námrazou. U větrných farem se značným výskytem ledu dosahují ztráty výkonu způsobené námrazou více než 20 % roční výroby energie [29]. Aby se tomuto problému vyhnuli, přišli vědci s inteligentním řešením pomocí povlaku topného systému na listu rotoru na bázi uhlíkových nanotrubic. Vrstva uhlíkových nanotrubic o tloušťce několika mikrometrů se nanese nastříkáním na samolepicí polymerní fólii. Lze tak ošetřit jakoukoli velikost listu rotoru větrné turbíny a lopatky mohou být rozděleny do několika topných sekcí. Integrovaním detektorů ledu do topných sekcí lze ohřívat pouze ty sekce, které jsou specificky ovlivněny tvorbou ledu. Tímto způsobem lze led rozmrazit během několika sekund a velmi energeticky efektivně, protože není nutné zahřívat celý list rotoru (obr. 6). [4]



Obrázek 6: Ukázka nového energeticky účinného topného systému, který dokáže během několika sekund rozpustit led na větrných turbínách. Povlak z uhlíkových nanotrubiček zahřívá definované oblasti lopatek rotoru, jakmile integrované senzory zjistí námrazu.[4]

Dalším řešením je potažení náběžných hran lopatek větrné turbíny aktivními nanočásticemi. Na povlak je pak přiveden malý budicí proud, který spustí vysokofrekvenční vibrace způsobující oteplovací efekt. [30]

Některé generátory běžně instalované ve větrných turbínách používají velké permanentní magnety. Magnety obsahují kovy takzvaných vzácných zemin, které je primárně nutné dovážet z Číny a jsou drahé. Dalším cílem výzkumných prací je tedy snížit obsah vzácných zemin v magnetech. Jedním z přístupů je například nedistribuovat zvláště problematické dysprosium homogenně v legovaných materiálech, ale místo toho jej aplikovat na krystalické hraniční vrstvy, kde je to vyžadováno pro stabilitu magnetů při vysokých teplotách. Tímto způsobem by mohl být obsah dysprosia snížen z v některých případech z osmi procent hmotnosti na méně než dvě procenta hmotnosti. Kromě toho může být s nanotechnologiemi obecně možné obejít se bez dysprosia snížením velikosti zrn ostatních kovových složek na rozsah nanometrů a jejich „spojením“ za vzniku kompozitů. [4]

Dále je možné prodloužit životnost převodovek povrchovými nátěry na ozubených kolech a ložiskách pomocí nanomateriálů. Byl vyvinut nano povlak, který dokáže revitalizovat opotřebované kovové povrchy a chrání před opotřebením i za nepříznivých podmínek. Tato technologie je založena na cílených úpravách povrchové struktury třecích materiálů, což umožňuje vytvoření nové vrstvy křemičitanu kovu s drsností povrchu pouze několika nanometrů. Aktivní složkou je směs různých syntetických silikátových sloučenin, které se přidávají ke stávajícímu mazivu a reagují s kovovými povrchy v důsledku vysokých teplot a tlaků. [4]

V několika pracích byly také prokázány možnosti zlepšení vlastností kompozitů přidáním nanovýztuže do matrice. Začlenění malého množství nanovýztuže, jako jsou uhlíkové nanotrubičky nebo nanojíl, do polymerní matrice, dimenzování vláken nebo mezilamelových vrstev prokázalo 30-80 % zlepšení vlastností kompozitů, jako je únavová odolnost, pevnost ve smyku nebo tlaku a lomová houževnatost. Bylo prokázáno, že přídavek malého množství uhlíkových nanotrubiček může zvýšit životnost až o 1500 % u různých vzorků lopatek větrných turbín vyrobených se sekundární výztuží uhlíkovými nanočásticemi (vinylester, termoplasty,

epoxidové kompozity obsahující CNT). Nanomodifikace kompozitů pro větrné turbíny s použitím grafenu jako sekundární výztuže ukázala, že grafenová výztuž je velmi slibná při vývoji pevnějších a odolnějších lopatek větrných turbín. U epoxidových kompozitních lopatek větrných turbín vyztužených skleněnými vlákny s přídavkem 1-5 hmotnostních procent uhlíkových nanovláken (Carbon nanofiber, CNF) bylo odhadnuto zlepšení napětí v tahu a modulu pružnosti, 20 % snížení hmotnosti a zvýšení životnosti. Pro zvýšení mezivláknové lomové houževnatosti a odolnosti kompozitních laminátů proti delaminaci se stává koncept prokládání polymerních nanovláken stále atraktivnějším. Kromě toho se stále zkoumá možnost použití hybridních kompozitů a kompozitů vyztužených nanovláknem ve větrných lopatkách jako alternativy k v současnosti používaným kompozitům ze skleněných vláken a epoxidu. Z numerických a experimentálních studií je zřejmé, že zvýšení životnosti kompozitů s použitím hybridních a nanovýztužných konceptů ospravedlňuje další investice do výroby lopatek větrných turbín z těchto kompozitních materiálů s nanovýztuží. [31]

2.1.6 Energie moří a oceánů

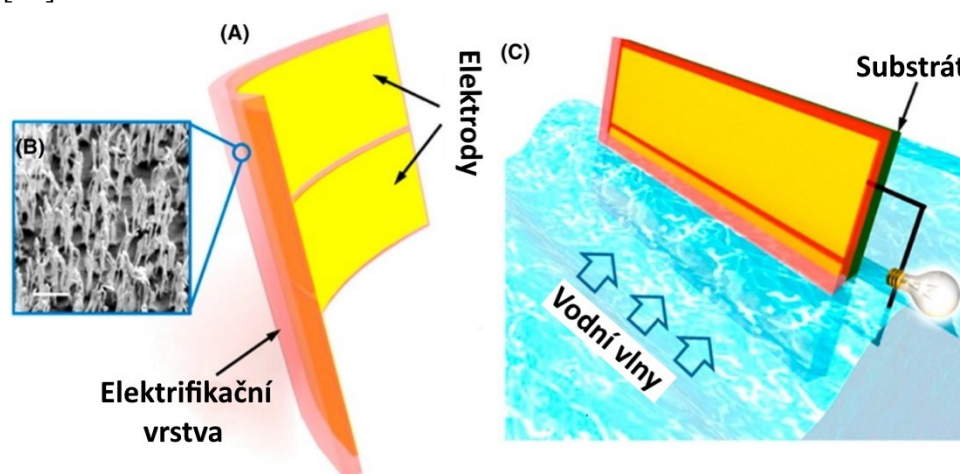
Využití nanotechnologií jako takových není v centru pozornosti výzkumu mořské energie. Určité nanomateriály jsou však v různých fázích výroby energie stále důležitější. Přebírají spíše pasivní nebo konzervační roli při ochraně součástí před agresivně-korozivním a degradačním účinkem mořské vody i před procesy zanášení a při snižování tření. Nanovrstvy a nanostrukturované ochranné povlaky a maziva jsou v závislosti na svém účelu vysoce voděodolné (superhydrofobní), antimikrobiální, mrazuvzdorné, snižující tření, antikorozi atd. a významně přispívají k ochraně materiálu. Nejtypičtějšími zařízeními, která jsou potřebná pro výrobu elektřiny z vln, jsou příbojové přehrady, turbíny na příbojové proudy a vlnové turbíny. Elektroaktivní polymery například hrají aktivní roli, pokud jde o výrobu elektřiny z vln. Jedná se o plasty, které mění tvar, když jsou vystaveny elektrickému napětí. Občas se označují také jako umělé svaly. Naproti tomu vnucené kladné nebo záporné vnější napětí vytváří elektrické napětí, které lze při vhodných technických opatřeních využít k výrobě energie. Čím tenčí je elektroaktivní polymerní film, tím silnější je vztah mezi změnou tvaru a generováním napětí. V rámci různých výzkumných projektů se testuje využití elektroaktivních polymerních komponent pro generování energie z vln. [4][27]

Další přístup k výrobě energie z moře je založen na využití rozdílů v koncentraci soli ve vodě. Tyto gradienty jsou obzvláště velké v ústích řek. Při přístupu založeném na tlakové osmóze (pohyb vody v důsledku rozdílů v koncentraci soli) dochází k čistému proudění vody ve směru zásobníku slané vody, když jsou mezi zásobníky sladké a slané vody instalovány polopropustné membrány. Osmotický tlak lze využít k pohonu turbíny. Při reverzní elektrodialýze jsou střídavě za sebou umístěny série katodových a anodových výměnných membrán, z nichž každá je propustná pro draselné, resp. chloridové ionty a odděluje od sebe zásobníky slané a sladké vody. Rozdíl chemických potenciálů mezi sousedními komorami vytváří na každé membráně elektrické napětí. Membrány mají v obou přístupech rozhodující význam. Nanotechnologické inovace významně přispívají k optimalizaci účinnosti membrán z hlediska struktury pórů, struktury povrchu a složení materiálu. [4][27]

Nově byly představeny technologie triboelektrického nanogenerátoru (triboelectric nanogenerator, TENG) pro sběr mechanické energie přítomné v okolním světě. TENG mohou shromažďovat energii v široké frekvenční oblasti, včetně vibrací, lidské chůze, pohybů těla a mořských vln. TENG jsou závislé na kontaktní elektrizaci mezi dvěma materiály a výměně náboje mezi jejich elektrodami v důsledku elektrostatické indukce a jako erozní vrstvy

pravidelně používají dvojici polymer-kov. V důsledku toho jsou levné, lehké, jednoduché na vytvoření a nabízejí bohatý výběr materiálů. Kromě toho účinnost přeměny energie TENG dosahuje až 55 % a mohou se dobře přizpůsobit různým druhům mechanické energie pomocí různých režimů provozu. [27]

Následující obrázek (Obrázek 7) ukazuje dvě nezbytné elektrizace s vodními vlnami. Obrázek 7B ukazuje vertikálně uspořádané nanodrátky na fluorovaném ethylenpropylen (fluorinated ethylene propylene, FEP) s využitím plazmového leptání z důvodu hydrofobizace filmu FEP a navíc pro zlepšení kontaktní plochy, a tedy i výstupního výkonu. Na obrázku 7C je znázorněna velkoplošná výroba energie připojená k substrátu. Pro funkční strukturu platí, že kontaktní elektrizace vodními vlnami vyvolává na povrchu vrstvy FEP záporné triboelektrické náboje. Při ponoření a vymoření velkoplošného generátoru energie v důsledku putujících vodních vln protéká mezi elektrodami proud, který stíní triboelektrické náboje na povrchu FEP, v důsledku čehož vzniká elektrická energie. Velkoplošná výroba energie o rozměrech 6×3 cm dosáhla energetického výkonu 0,12 mW při rychlosti vln 0,5 m/s. Velkokapacitní konstrukce pro výrobu energie je konstrukcí typu "vše v jednom", protože nepotřebuje další segmenty, například turbíny pro sběr mechanické energie. Kromě toho je rozsáhlá výroba energie díky použitým materiálům levná a lze ji snadno zvětšovat. Značné množství rozsáhlých výroben energie lze propojit a vytvořit tak síť pro získávání energie z vodních vln ve velkém měřítku. [27]



Obrázek 7: Ukázka struktury generátoru s podporou elektrizace kapalina-pevná látka. (A) Schematické znázornění nábojové vrstvy se dvěma vývody na zadní straně. (B) snímek polymerních nanodrátek na elektrifikační vrstvě. Měřítko je 1 μm . (C) Schematické zobrazení substrátem vyztuženého zařízení ve vodních vlnách [27]

2.1.7 Biomasa/biopaliva

Biomasa je považována za jedno z obnovitelných řešení při přeměně energie, ale stále se s ní pojí určité problémy. Těmito problémy mohou být I) tvorba usazenin popela a koroze uvnitř kotle ve fázi spalování paliva, II) emise NO_x a SO_x z elektráren spalujících biomasu vedle emisí CO_2 a CO a III) mohou vést k rychlé deaktivaci katalyzátorů. Tyto zmíněné problémy lze překonat využitím nanotechnologií prostřednictvím odolného povlaku materiálů při výrobě spalovacích kotlů. [32]

Pro příklad nedávný vývoj v oblasti konstrukce katalyzátorů přinesl hydrofobní porézní nanomateriál, který vykazoval velmi vysokou katalytickou aktivitu pro konverzi sacharidů na hydroxymethylfurfural spolu s vyšší účinností dvoufázových systémů [33]. Také byl navrhnout nový integrovaný proces biorafinace pro společnou výrobu biopaliv a stříbrných nanomateriálů.

Impregnací heterogenní celulózy biomasy, dusičnanem stříbrným a následnou pyrolýzou se podstatně zvýšil výtěžek pyrolýzních plynů, zejména plynného vodíku [34].

V posledních letech se stále více uplatňují nanotechnologie při výrobě biopaliv ze zemědělského odpadu. Kovové nanočástice se používají jako nanokatalyzátor při výrobě biopaliva, ale dopad kovových nanočástic na životní prostředí není dobrý. Nanokatalyzátory se také používají k přeměně metanu na uhlík a vodík. Tento přístup lze využít pro anaerobní digesci k výrobě elektřiny z bioplynu. V nedávné době se zintenzivnil výzkum přeměny biomasy na biopaliva pomocí nanokatalyzovaných reakcí. Výzkum se rozšířil o použití nanokatalyzátorů pro výrobu bionafty a glycerolu z rostlinných olejů nebo živočišných tuků, přičemž tato aplikace snižuje množství složitých kroků při výrobě bionafty z rostlinných olejů nebo živočišných tuků ve srovnání s jinými konvenčními metodami. Při těchto procesech lze také nanokatalyzátor obnovit a recyklovat, což u běžných metod není možné. [35]

Bylo zjištěno, že přidáním nanočástic oxidu ceru do bionafty dojde k výraznému snížení úrovně emisí uhlovodíků a složek NO_x [36]. Dále výtěžnost bionafty dosáhla v přítomnosti nanokatalyzátoru KF/CaO až 96,8 % a lze ji účinně využít k přeměně oleje s vyšší hodnotou kyselosti na bionaftu [37].

2.1.8 Geotermální energie

Co se týče dalšího vývoje geotermální energie tak nanotechnologie mohou hrát klíčovou roli, a to hlavně ve formě nanotekutiny. Geotermální energie je často definována jako tepelná energie získávaná ze zemské kůry ve hloubce 5 až 10 km. V těchto velkých hloubkách je teplota velmi vysoká. Proto lze nanotekutiny použít jako chladicí tekutinu k chlazení potrubí, které je vystaveno této vysoké teplotě. [38][39]

Nanotekutiny jsou kapalné suspenze, v nichž jsou nanomateriály rozptýleny v základní kapalině. Získaly pozornost pro použití v procesu přenosu tepla díky své slibné výkonnosti jako topné nebo chladicí tekutiny. Tradičními pracovními tekutinami používanými v průmyslových zařízeních pro přenos tepla jsou například voda, glykol nebo termoolej. Je dobře známo, že jejich účinek je omezený zejména díky nízké tepelné vodivosti, a uvažuje se o jejich nahrazení supratekutinami s lepšími vlastnostmi. O nanotekutinách bylo provedeno mnoho teoretických a experimentálních studií, které zkoumaly termofyzikální vlastnosti. V těchto studiích bylo prokázáno, že nanotekutiny výrazně zvyšují tepelnou vodivost a schopnost přenosu tepla ve srovnání s tradičními pracovními tekutinami. [38][39]

Využití geotermálních zdrojů pro výrobu energie se ukázalo jako složitá záležitost vzhledem k nákladům a rizikům spojeným s hlubokými vrty. Výzkumníci však našli způsob, jak zvýšit potenciál výroby energie z nízkoteplotních horkých pramenů, které jsou ve větší blízkosti zemského povrchu, a to s využitím nanotechnologií. Bylo zjištěno že nanostruktury podobné klecím pro ukládání oxidu uhličitého mohou fungovat také jako částice uchovávající teplo ve speciálních kapalinách, jako jsou alkany. S využitím nanostruktur jsou zdokonalovány různé směsi kapalin v naději, že se tak potenciálně zlepší účinnost výroby energie v geotermálních elektrárnách o 30 až 40 procent. [39][40][41]

Navzdory slibnému potenciálu zlepšení přenosu tepla, který zaznamenalo mnoho výzkumníků, existuje několik překážek, které brání širokému uplatnění v průmyslovém prostředí. Na nanotekutiny působí během suspenze a po ní řada sil, jako jsou termoforéza, odpor, Van der Waalsovy síly, Brownovy síly a síly elektrické dvojvrstvy. To je velký problém a zároveň jeden

z hlavních faktorů, který podle mnoha výzkumníků přispívá k agregaci a následné sedimentaci. Sedimentace nanočástic v průběhu času zůstává vážnou výzvou, kterou je třeba překonat, než dojde k širokému rozšíření nanotekutin. Byly navrženy jednoduché metody, jako je přidání stabilizačních činidel (povrchově aktivních látek) do základní tekutiny před suspenzí nanočástic, aby se snížily mezifázové síly mezi molekulami tekutiny a nanočásticemi. Ani po přidání povrchově aktivních látek však není zaručena trvalá stabilita. Další překážkou je že nanočástice nejsou levné což spolu s dalšími faktory činí tyto látky komerčně nevhodnými. Došlo se však k závěru, že celkové využití nanotekutin je stále v počátečním stádiu, a počítá se, že budoucí výzkumy rozšíří možnosti využití nanotekutin, zdá se tedy, že dlouhodobější perspektiva nanotekutin je slibná. [38]

2.2 Neobnovitelné zdroje energie

2.2.1 Jaderná energie

Nové poznatky jaderné nanotechnologie mohou být využity při navrhování a výrobě pokročilých jaderných paliv, zachycování štěpných produktů, materiálů odolných proti záření, jako jsou disperzní oxidy, korozivzdorné nanovrstvy, materiály pro sanaci životního prostředí a detekci a snímání záření. Hlavní podíl na radiační odolnosti mají rozhraní a hranice zrn v nanomateriálech. Tato škála přístupů pomůže pochopit vztahy mezi strukturou a vlastnostmi z nových perspektiv v jaderných nanotechnologiích. Toto porozumění může být zahrnuto do budoucích prací při navrhování nanomateriálů pro různé aplikace, jako jsou pokročilé palivové cykly a monitorování radiace v jaderných reaktorech pro bezpečnou a zvýšenou výrobu jaderné energie. [42]

Využití nanotechnologií má potenciál ke zvýšení účinnosti reaktoru implementací do tlakových reaktorů, kde je voda v přímém kontaktu s palivovými tyčemi jaderného reaktoru. Bubliny, které se zde tvoří na povrchu palivových tyčí mohou výrazně snížit účinnost tím, že izolují tyče od vody. V takovém případě se snižuje účinnost přenosu tepla. Byly proto zavedeny nanočástice oxidu hlinitého, které pokrývají palivové tyče a zabraňují tvorbě bublin na topných člancích. Jejich výsledkem bylo zvýšení účinnosti reaktoru. Dalším potenciálním přínosem je snížení ztrát vody pomocí nové třídy nanomateriálů zvaných nanočástice s fázovou změnou jádra. Tyto částice, které mají střed z jednoho materiálu a vnější obal z jiného materiálu mohou být přimíchány do vody používané k transportu tepelné energie generované v reaktoru a docílit tak ke snížení množství vody potřebné k přeměně tepelné energie vytvořené reaktorem na páru pro otáčení turbín. Předpokládá se, že tato technologie by mohla snížit potřebu vody v elektrárnách až o 20 %. [43][44]

A co je nejdůležitější, existují také potenciální bezpečnostní aplikace nanokapalin schopných rychle přenášet velké množství tepelné energie. Jeden z návrhů počítá s použitím nanokapalin v pohotovostní chladicí kapalině uložené v nouzových chladicích systémech aktivní zóny (Emergency Core Cooling Systems, ECCS). ECCS jsou nezávislé pohotovostní systémy určené k bezpečnému odstavení reaktoru v případě havárie nebo poruchy. Jednou ze součástí ECCS je sada čerpadel a záložní chladicí kapalina, která se má rozstříkovat přímo na reaktorové tyče. Tyto systémy mají zásadní význam pro zabránění tomu, aby se havárie se ztrátou chladiva vymkla kontrole. Vzhledem k tomu, že ECCS mají záložní zásobníky chladiva, mohly by technologie, díky nimž je toto záložní chladivo účinnější při odvádění tepla z reaktoru, zvýšit bezpečnost reaktorů. Vzhledem k tomu, že nanokapaliny mohou zvýšit účinnost přenosu tepla

vodou o 50 % nebo více, někteří výzkumníci naznačují, že by mohly být užitečné i v havarijních scénářích. [43][45]

Než však bude možné nanočástice bezpečně a efektivně používat v provozovaných elektrárnách, je třeba překonat mnoho překážek. Zvyšování výroby částic na velké objemy částic, které jsou nezbytné pro zavedení v elektrárně, je velmi nákladné. Pro výrobu těchto malých částic ve velkém měřítku mohou být nezbytné nové infrastruktury pro syntézu. Kromě toho k širokému přijetí této technologie nedojde, dokud se neprokáže, že ve fungující elektrárně dochází k významným úsporám nákladů. V důsledku toho musí být částice k dispozici za cenu, která je pro provozovatele elektráren přijatelná. [43]

Kromě analýzy nákladů a přínosů musí být provedeno rozsáhlé testování, aby se zajistilo, že dlouhodobá aplikace těchto částic neohrozí provozní bezpečnost elektrárny. Za tímto účelem mohou reaktory menšího rozsahu (například reaktory umístěné ve výzkumných zařízeních a na univerzitách) testovat tyto částice v průběhu let, aby bylo možné sledovat dopady dlouhodobého používání. Mezi potenciální úskalí patří zvýšená koroze, ucpávání systému a únik nanočástic do odpadní vody. Korozní inženýři budou potřebovat ověřit, do jaké míry nanočástice přispívají k celkovému stárnutí reaktorů, v nichž se používají. Konstrukteři nanočástic a odborníci na hydrodynamiku budou potřebovat zajistit, aby se dalo zvládnout ucpávání systému. Kromě toho budou zapotřebí odborníci na filtraci a agentura pro ochranu životního prostředí, aby stanovili osvědčené postupy pro minimalizaci množství nanomateriálu, který opouští zařízení, a také pro pochopení a kvantifikaci dopadů tohoto emitovaného materiálu na životní prostředí. [43]

2.2.2 Energie z fosilních paliv

Použití nanotechnologií by mohlo zlepšit několik částí výroby energie z elektráren spalujících fosilní paliva. Jedno z těchto vylepšení by mohlo mít podobu nanostrukturovaných izolačních vrstev pro plynové turbíny. Tepelně izolační vrstvy jsou nepostradatelné pro ochranu lopatek plynových turbín před teplem. Teplota plynu na vstupu do turbíny je při 1 500 stupních Celsia podstatně vyšší než teplota tání použitých materiálů turbíny. Mezi hlavní požadavky na tepelně izolační vrstvy patří nízká tepelná vodivost a tepelná roztažnost přizpůsobená podkladu, aby se minimalizovalo napětí a tvorba trhlin v materiálu. Moderní vícezdrojové plazmové metody nanášení povlaků umožňují vyrábět komplexní tepelně izolační systémy sestávající z aktivních, adhezních a bariérových vrstev s přesností v nanoměřítku a s různými kombinacemi materiálů. To vytváří další optimalizační možnosti, například pro další snížení tepelné vodivosti vrstev, zvýšení odolnosti součástí turbíny a tím umožnění vyšších provozních teplot. Účinnost plynových turbín tak může být dále zvýšena, což povede ke značným úsporám nákladů a emisí oxidu uhličitého. [4]

Jedním z dalších problémů při provozu uhelných elektráren nebo elektráren spalujících odpad jsou inkrustace zbytků spalování v kotli a výměnících tepla, které se musí v pravidelných intervalech nákladně servisovat. Keramické antiadhezní povlaky na bázi nanočásticových povlakových materiálů podstatně snižují tvorbu inkrustací, čímž zvyšují životnost trubek výměníků tepla a prodlužují servisní intervaly. [4]

Největší přínos by však k výrobě energie z fosilních paliv mohlo přinést využití nanotechnologií pro snížení emisí oxidu uhličitého. Současné metody separace CO₂ z odpadních plynů jsou drahé, využívají chemikálie a nejsou dostatečně konkurenceschopné pro rozsáhlé aplikace. Membrány zkonstruované z nanomateriálů by však mohly fungovat stejným způsobem za

zlomek ceny a bez dalších sloučenin [46]. Například použitím nanostrukturovaných polymerních membrán potažených katalyzátory, které v přítomnosti vody přeměňují oxid uhličitý na hydrogenuhličitan by byl pevný hydrogenuhličitan snadno oddělitelný od zbývajících složek spalin [4]. Dalším příkladem je vyvíjená membrána z uhlíkových nanotrubiček, která by mohla oddělovat oxid uhličitý z výfukových plynů elektráren [47]. Jako další možností je vývoj keramických nanotrubiček, které usnadňují vysoce účinnou separaci kyslíku ze vzduchu. Pokud by se tento čistý kyslík používal ke spalování fosilních paliv, spaliny by se skládaly téměř výhradně z oxidu uhličitého, který by se dal snadno oddělit a využít [4].

Výzkumníci také vyrobili ultratenký polymerní film v nanoměřítku, který filtruje CO₂ s bezkonkurenčními výsledky. Za tuto vysokou propustnost vděčí CO₂-filnímu materiálu, jehož tloušťka je jen několik desítek nanometrů. Podle vědců by se tento materiál mohl používat k úpravě velkých proudů plynů za nízkého tlaku, například k zachycování CO₂ ze spalin v uhelných elektrárnách. Těkavé organické sloučeniny rovněž představují nebezpečí pro kvalitu ovzduší, protože přispívají ke smogu a vysoké hladině ozonu. Výzkumníci objevili způsob, jak odstraňovat těkavé organické látky (a také oxidy síry a dusíku) ze vzduchu při okolních teplotách. Využili porézní oxid mangančitý s nanočásticemi zlata vrostlými do něj jako katalyzátor, který rozkládá a odstraňuje škodlivé sloučeniny. [46]

Dále mohou být nanotechnologie využity při zlepšení dostupnosti fosilních paliv čehož mohou dosáhnout zlevněním výroby paliv z nekvalitních surovin a zefektivněním výroby paliv z běžných surovin. Nanotechnologie mohou toto vše zajistit zvýšením účinnosti katalyzátorů. Katalyzátory vyrobené z nanočástic mají větší plochu povrchu pro interakci s reagujícími chemikáliemi než katalyzátory vyrobené z větších částic. Větší povrch umožňuje, aby s katalyzátorem interagovalo více chemických látek současně, což zvyšuje účinnost katalyzátoru. Tato zvýšená účinnost může učinit proces, jako je výroba motorové nafty z uhlí, ekonomičtější a umožnit výrobu paliva z v současnosti nepoužitelných surovin, jako je například surová ropa nízké kvality. Katalyzátory mohou také snížit teplotu potřebnou k přeměně surovin na palivo nebo zvýšit procento paliva spáleného při dané teplotě. [48]

Pro příklad se používají nanočástice oxidu wolframu na materiálu zvaném zirkonium jako nanokatalyzátor k zefektivnění procesu rafinace benzínu [49]. Dále se nanokatalyzátory používají při přeměně uhlí na kapalná paliva a při zušlechťování ropy s nízkou kvalitou, např. ropy z břidlic [48].

3. Nanotechnologie pro skladování energie

3.1 Elektrochemické skladování energie

Využití nanotechnologií je stále častěji považováno za nezbytný předpoklad pro výkonné baterie a superkondenzátory. Snaha o vysoce účinné využití energie podněcuje rychlý vývoj elektrochemických technik skladování. Zvyšují se hlavně požadavky na hustotu energie a bezpečnost. Těmto dvěma aspektům je proto věnována velká pozornost při vývoji elektrochemického skladování energie. Elektrody a elektrolyty proto potřebují speciální konstrukci, aby bylo dosaženo stanoveného cíle. [4][50]

V poslední době došlo k pokroku v oblasti nanostrukturovaných elektrod-elektrolytů, baterií z alkalických kovů, redoxních průtokových baterií a superkondenzátorů. Elektrodové materiály spolu s pokročilými elektrolyty mohou těmto elektrochemickým aparaturám pro skladování energie propůjčit vysokou hustotu energie nebo výkonu, dlouhou životnost a vysokou bezpečnost. [4][50]

3.1.1 Dobíjecí baterie

Schopnost baterie uchovávat náboj závisí na energetické hustotě a výkonové hustotě. Důležité je, aby náboj mohl zůstat uložen a aby bylo možné v baterii uložit maximální množství náboje. Důležitým faktorem je také cyklování a zvětšování objemu. I když existuje mnoho dalších typů baterií, současná technologie baterií je založena na lithium-iontové interkalační technologii pro její vysokou hustotu výkonu a energie, dlouhou životnost cyklu a absenci paměťových efektů. Tyto vlastnosti vedly k tomu, že lithium-iontové baterie jsou upřednostňovány před ostatními typy baterií. Pro zdokonalení technologií baterií je třeba maximalizovat schopnost cyklování, hustotu energie a výkonu a minimalizovat objemovou roztažnost. Mnohá z těchto zdokonalení lze dosáhnout právě pomocí nanotechnologií. [51]

Nanotechnologie ve skutečnosti nabízí nové způsoby navrhování, syntézy a manipulace s katodovými materiály, které řeší omezení výkonu a výrazně zvyšují účinnost baterií. Je nepochybné, že nanostrukturní materiály otevřely nové paradigma výkonu při výrobě dobíjecích bateriových článků. Nanostrukturované materiály mají v zásadě různé výhody ve srovnání se svými objemovými protějšky: (1) usnadňují transport Li^+/Na^+ a elektronů tím, že poskytují kratší difuzní cesty, (2) poskytují větší plochu, (3) poskytují prostory umožňující expanzi, a tím zachovávají strukturální integritu a (4) umožňují účinnou hybridizaci/kompozici různých materiálů. [52]

Použitím nanotechnologií při výrobě baterií se dá dosáhnout zvýšení dostupného výkonu a zkrácení doby potřebné k jejímu dobití. Těchto výhod se dosahuje potažením povrchu elektrody nanočásticemi. Díky tomu se zvětší plocha povrchu elektrody, což umožní větší proudovou hustotu mezi elektrodou a chemickými látkami uvnitř baterie. Dále je možné dosáhnout prodloužení životnosti baterie pomocí nanomateriálů, které oddělují kapaliny v baterii od pevných elektrod. Toto oddělení zabraňuje nízké úrovněmu vybíjení, ke kterému dochází u běžných baterií, což výrazně zvyšuje životnost baterie. [53]

Zde je uvedeno několik příkladů různých aplikací nanotechnologií pro dobíjecí baterie:

(1) Společnost TruSpin testuje li-ion baterie s anodami vyrobenými z křemíkových nanovláken. Tyto testy ověřují použití křemíkových nanovláken ke spolehlivému znásobení energetické kapacity li-ionových baterií. [54]

(2) Vědci z Georgia Tech zjistili, že nanokrystaly antimonu (u kterých byla zjištěna spontánní tvorba dutých struktur) pokryté oxidem použité v anodě li-iontové baterie mohou zabránit mechanické degradaci anody při vysokém výkonu. [55]

(3) Výzkumníci z NIMS demonstrovali techniku využívající nanášení nanočástic Si rozprašováním k výrobě anod pro polovodičové baterie, která by podle jejich názoru mohla vést k levné/velkoobjemové metodě výroby anod pro polovodičové baterie s vysokou kapacitou. [56]

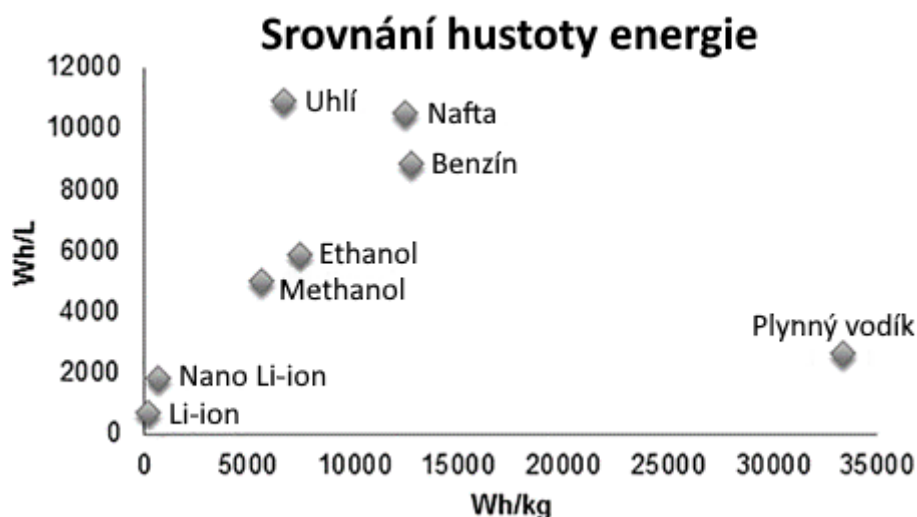
(4) Vědci z Purdue University předvedli elektrodu vyrobenou z antimonu ve tvaru, který nazývají nanořetězec. Prokázali, že lithium-iontové baterie s těmito elektrodami se nabíjejí rychleji než lithium-iontové baterie s grafitovými elektrodami. [57]

(5) Vědci z Rice univerzity používají k zastavení růstu dendritů na kovových lithiových anodách vrstvy uhlíkových nanotrubiček. Tento krok může pomoci vyvinout lithium-kovové baterie, které by mohly mít mnohem vyšší kapacitu a rychlejší nabíjení než lithium-iontové baterie. [58]

Nanomateriály mají v aplikacích li-ion baterií také některé nevýhody, jako např: (1) Zvětšení povrchu také zvýší nežádoucí vedlejší reakce a potenciálně sníží bezpečnost článků. Například při použití nanomateriálů jako katody v lithium-iontových bateriích způsobuje jejich zvětšený povrch navýšení reakcí mezi elektrodou a elektrolytem, což má za následek vyšší nevratnost, ale ke kompromisu s nízkou životností cyklu. Kromě toho vysoká povrchová reaktivita nanoelektrodoých materiálů vede ke snížené životnosti cyklu. (2) Objemová hustota energie lithium-iontových baterií je u nanoelektrodoých materiálů ve srovnání s materiály mikrorozměrů poměrně nižší. [59]

Přestože nanostrukturované anodové materiály vykazují lepší elektrodové vlastnosti, existují určitá omezení pro komerční aplikace. Coulombická účinnost a reverzibilní kapacity nanostrukturovaných anodových materiálů jsou mnohem nižší než u objemových vzorků. Vzhledem k tomu, že coulombická účinnost a reverzibilní kapacity jsou rozhodujícími faktory pro elektrody v komerčních aplikacích, lze se zaměřit na to, jak získat stabilnější povrchy a lepší krystalinitu nanomateriálů pro jejich praktické využití v bateriích. Proto je nezbytné použít nanomateriály do inteligentních nanostruktur s přizpůsobenými vlastnostmi, které specificky zlepšují požadované reakce. [59]

Přestože li-ion baterie zaznamenaly v průběhu let drastické změny, je třeba ještě vykonat mnoho práce, aby se baterie staly alternativou srovnatelnou se stávajícími palivy. Nanotechnologie nepředstavuje všelék. I při jejím použití energetická hustota a další vlastnosti značně zaostávají za ostatními palivy, jak je vidět na obr. 8. [60]



Obrázek 8: Graf pro srovnávající hustoty energie [60]

3.1.2 Průtoková baterie

Průtokové baterie obsahují místo pevných elektrod suspenzi z drobných částic suspendovaných v kapalině. Díky tomu lze kapacitu baterie snadno zvýšit pouhým přidáním větší nádrže. V současné době však mají jednu zásadní nevýhodu, a to že jsou omezeny průtokem, a proto nemají dostatečnou účinnost. Řešení tohoto problému se nyní možná podařilo nalézt, a to s využitím nanotechnologií. Výzkumný tým z MIT zveřejnil studii, v níž uvádí, že nanovrstva může zajistit potřebnou kluzkost. Díky použití povrchů impregnovaných mazivou (lubricant-impregnated surfaces, LIS) v nanoměřítku se obsah průtokové baterie může volněji pohybovat, což výrazně zvyšuje účinnost (obr. 9). [61]



Obrázek 9: Ukázka nanovrstvy, která vytváří samomazný povrch [61]

Profesoři MIT použili nanovrstvu a zjistili až 86 % úsporu mechanického výkonu při nízkých průtokových rychlostech u LIS ve srovnání s konvenčními povrchy pro průtokovou elektrodu z polysulfidu lithia v konfiguraci poloviční průtokové baterie. Objev nového nanovrstvení nejenže učinil průtokové baterie praktičtější řešením, ale byly také stanoveny kritéria pro jejich elektrochemickou, chemickou a termodynamickou stabilitu. [61]

Zvýšení kluzkosti není jediné využití nanotechnologií navržené pro průtokové baterie. Například pro vanadové redoxní průtokové baterie (Vanadium redox flow batteries, VRFB) byl navržen několikastupňový proces elektrospinningu a postfunkcionalizace k výrobě pokročilé

integrované elektrody s mikronovou a nanoměřítkovou strukturou. Pro mikronovou strukturu je zkonstruována reakční oblast a oblast transportu elektronů s cílem optimalizovat aktivační oblasti a proces vedení elektronů. Pro strukturu v nano měřítku se vytváří katalytická vrstva s nanopóry bohatými na kyslík a vodivá vrstva s kanály pro přenos elektronů, aby se zvýšily elektrokatalytické a vodivé vlastnosti bez obětování transportu hmoty. VRFB s takto připravenými elektrodami dosahuje vynikajícího výkonu s 80,28 % energetickou účinností a je stabilní po více než 1000 cyklů. Kromě toho poskytuje vysokou špičkovou hustotu energie, která je o 69,45 % vyšší než u baterie s konvenčními grafitovými plstmi. [62]

Nanotechnologie by se mohly dále aplikovat při vylepšení hybridních průtokových baterií, které by mohly uchovávat elektřinu po velmi dlouhou dobu za přibližně pětinou cenu oproti současným technologiím skladování, s flexibilitou umístění a s minimálním dopadem na životní prostředí. Vyvíjená technologie kombinuje elektrody na bázi uhlíku s elektrolyty z ekonomických zdrojů (mangan nebo síra, což jsou na planetě hojně rozšířené chemické látky) pomocí jednoduchého, a přitom velmi účinného elektroforetického nanášení nanouhlíkových přísad (grafen dopovaný dusíkem), které výrazně zvyšují životnost a výkon elektrod ve vysoce kyselém nebo zásaditém prostředí. [63]

3.1.3 Superkondenzátor

Superkondenzátory jsou zařízení, která jsou ve srovnání s bateriemi schopna zvládat vysoké výkony. Přestože superkondenzátory poskytují stokrát až tisíckrát vyšší výkon ve stejném objemu, nejsou schopny uchovávat stejné množství náboje jako baterie, které je obvykle 3–30krát nižší. Díky tomu jsou superkondenzátory vhodné pro ty aplikace, ve kterých je zapotřebí nárazový výkon, ale není vyžadována vysoká kapacita pro ukládání energie. Pokrok v rozvoji funkčních nanostruktur směřuje k potenciálnímu širokému využití superkondenzátorů jako zařízení pro udržitelné skladování energie. [64][65]

Pokrok ve vědě o materiálech odhalil řadu možností, které nabízejí velké výhody pro nanostruktury superkondenzátorů, včetně těch, které jsou založeny na elektrostatické dvouvrstvé kapacitě, elektrochemické pseudokapacitě a hybridech. Poly(3,4-ethylenedioxythiofen) - PEDOT - je vodivý polymer, který nabízí zařízením superkondenzátorů výhody nízké ceny a flexibility, přičemž poskytuje dobrou elektrickou vodivost a pseudokapacitu, pokud se podaří překonat problémy s jeho stabilitou. Dalším zajímavým nanotechnologickým materiálem, který má zvláštní význam pro výzkum superkondenzátorů, je grafen. Povrchová plocha bývá přímo spojena se zvýšenou kapacitou nebo hustotou energie a v grafenu jsou všechny atomy povrchové. Mezi výhody grafenových vláken patří jedinečná a laditelná nanostruktura, vysoká elektrická vodivost, vynikající mechanická pružnost, nízká hmotnost a snadná funkcionalizace. [65]

Jak již název napovídá, superkondenzátory mají z hlediska kapacity obecně náskok před kondenzátory s dielektrikem nebo elektrolytickými kondenzátory. Mají však tendenci pracovat pomalu, což podnítilo výzkum využití nanostrukturování, například pomocí soustav pórů, ke snížení iontové impedance. Bohužel výhody, které tyto velké póry přinášejí, mohou být kompenzovány nadbytkem jiných materiálů, které jsou pak nutné k podpoře velkých polí pórů. [65]

Kromě pórů a polí byly využity i další nanostruktury. Při zlepšování vlastností superkondenzátorů ze sulfidů přechodných kovů, které mají konkurovat oxidovým protějškům, byla k maximalizaci plochy povrchu použita struktura nanodrátků. Cílem bylo využít vysoké

vodivosti a stability kovového CoS_2 . Vypěstováním nanodrátků přímo na jejich podložce bylo možné zajistit nízký kontaktní odpor, což také pomohlo dosáhnout dobré cyklovatelnosti – pouze 0-2,5 % ztráty kapacity po 4250 cyklech. Ve srovnání s jednofázovým materiálem mohou tyto hybridní materiály s hierarchickou nanostrukturou poskytovat kratší cesty pro transport iontů, nabízet synergické efekty z více aktivních složek a mít snadno přístupná elektroaktivní místa pro ionty elektrolytu. [65]

Pro vysoce výkonné superkondenzátory se rovněž upřednostňují oxidy kovů s 3D nosičem, jako je grafenová pěna, redukovaný oxid grafenu, uhlíková nanovlákna, uhlíkový nanopapír a elektrospunované CNF. Přestože jsou vhodným kandidátem, jejich nevýhodou je nízká hustota výkonu ve srovnání s lithium-iontovou baterií. [66]

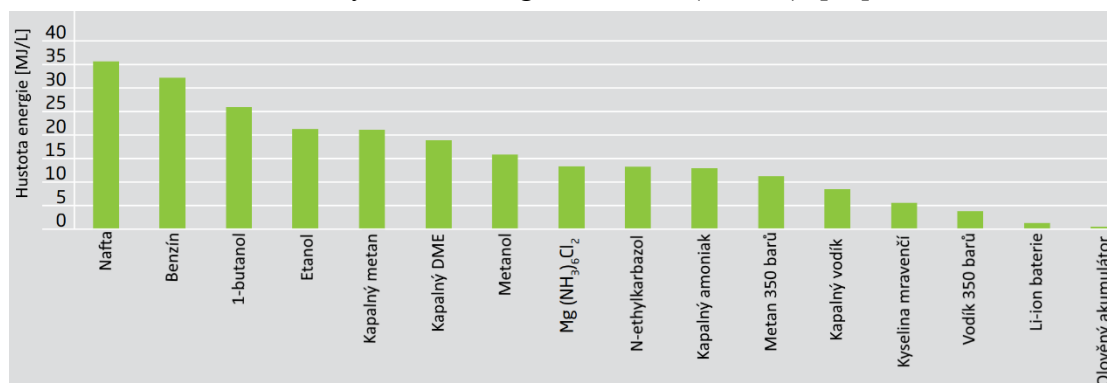
Hybridní materiály na bázi oxidů uhlíkových nanometalů se staly novým směrem pro elektrody superkondenzátorů, který řeší synergický efekt, zlepšuje ukládání náboje a celkovou cyklickou výkonnost zařízení. [66]

Pomocí hierarchické sestavy grafitové pěny a uhlíkových nanotrubiček potažených Fe_2O_3 bylo dosaženo velmi vysoké hustoty energie a dlouhé stability cyklu. Toho však bylo dosaženo na úkor coulombické účinnosti (tj. zachování kapacity) a hustoty výkonu. Naopak vysoké hustoty výkonu a účinnosti bylo dosaženo u substrátu grafenového nanosvitku z uhlíkových vláken na úkor stability cyklu. [66]

Pokud se nepodaří najít jeden materiál, který by splňoval všechny požadované vlastnosti, je oblíbeným řešením kombinace nejlepších vlastností z řady materiálů. Snadný návrh hierarchické architektury a kontrola nad vícesložkovou strukturou nabízí novou strategii pro výrobu elektrod pro vysoce výkonné superkondenzátory MnO_2 obohacené o elektrochemicky aktivní Fe_3O_4 ve vnitřní části a elektricky vodivé nanočástice SnO_2 v povrchové vrstvě. [65]

3.2 Skladování energie konverzí do paliv

Fosilní paliva jsou jedním z nejznámějších příkladů uchování energie v chemických vazbách. Energie se uvolňuje při rozpadu vazeb v chemických sloučeninách, jako je ropa, uhlí a zemní plyn. Energie se však uchovává i v jiných chemických formách, včetně plynů, jako je vodík a metan nebo biomasy, jako je dřevo. Tyto další chemické formy jsou klíčovými faktory pro dekarbonizaci. Výhodou chemických skladovacích systémů je mnohem větší hustota energie například ve srovnání se současnými technologiemi baterií (obr. 10). [67]



Obrázek 10: Energetické hustoty různých chemických látek pro skladování (na bázi nižší výhřevnosti) a bateriových technologií. (2013) [67]

Pravděpodobně největší budoucnost, a to nejen z hlediska využití nanotechnologií pro chemické skladování energie, má skladování energie pomocí vodíku. [67]

3.2.1 Vodík

Různé nanostrukturní materiály mají díky své vysoké povrchové ploše vynikající potenciál pro použití při skladování vodíku. Poskytují také mnoho výhod pro fyzikálně-chemické reakce, a hlavně nabízejí alternativu, která překonává dvě hlavní překážky objemových materiálů, rychlost sorpce a teplotu uvolňování. Zlepšení sorpční kinetiky a skladovací kapacity lze dosáhnout pomocí dopování katalyzátoru nanomateriálem, jak ukázal výzkum LiBH_4 dopovaného nanočásticemi niklu a analýza úbytku hmotnosti a teploty uvolňování různých druhů. Bylo zjištěno, že zvyšující se množství nanokatalyzátoru snižuje teplotu uvolňování přibližně o 20 °C a zvyšuje hmotnostní ztráty materiálu o 2 až 3 %. Optimální množství částic Ni bylo zjištěno na úrovni 3 mol %, pro které byla teplota v rámci stanovených mezí (přibližně 100 °C) a úbytek hmotnosti byl výrazně vyšší než u nedopovaných druhů. Rychlost sorpce vodíku se v nanorozměrech zlepšuje díky krátké difuzní vzdálenosti ve srovnání s objemovými materiály. Mají také příznivý poměr povrchu k objemu. [68][69]

Teplota uvolňování materiálu je definována jako teplota, při které začíná proces desorpce. Energie nebo teplota pro vyvolání uvolňování ovlivňuje náklady na jakoukoli strategii skladování chemických látek. Pokud je vodík vázán příliš slabě, je tlak potřebný k regeneraci vysoký, čímž se ruší jakákoli úspora energie. Modifikovaná van't Hoffova rovnice (1) spojuje teplotu a parciální tlak vodíku během procesu desorpce. Modifikace standardní rovnice souvisí s velikostními efekty v nanorozměrech. [70]

$$\ln(p_{\text{H}_2}) = \frac{\Delta H(r)}{RT} + \frac{3V_m\gamma}{rRT} + \frac{\Delta S(r)}{R} \quad (1)$$

kde p_{H_2} = parciální tlak vodíku

ΔH = entalpie sorpčního procesu (exotermická)

ΔS = změna entropie

R = ideální plynová konstanta

T = teplota v Kelvinech

V_m = molární objem kovu

r = poloměr nanočásticey

γ = povrchová volná energie částice

Z výše uvedeného vztahu vyplývá, že změna entalpie a entropie při desorpčních procesech závisí na poloměru nanočástice. Navíc je zahrnut nový člen, který zohledňuje specifický povrch částice, a lze matematicky dokázat, že zmenšení poloměru částice vede ke snížení teploty uvolňování pro daný parciální tlak. [70]

Ukládání může být i ve fyzické formě, tj. jako plyn, nadkritická kapalina, adsorbát nebo molekulární inkluze. Zde byly navrženy nosiče vodíku na bázi nanostrukturovaného uhlíku (např. uhlíkové "buckyballs" a nanotrubičky). Aby se uhlíkové materiály mohly stát účinnou technologií pro skladování vodíku, byly uhlíkové nanotrubičky (Carbon nanotubes, CNT) dopovány MgH_2 . Ukázalo se, že tento hydrid kovu má dostačující teoretickou skladovací kapacitu (7,6 hmotnostních procent), ale jeho praktické využití je omezené kvůli vysoké teplotě uvolňování. Navrhovaný mechanismus zahrnuje vytvoření rychlých difuzních kanálů pomocí CNT v mřížce MgH_2 . [68][69][71]

Výzkum probíhá na různých nanostrukturovaných úložných systémech v pevné fázi, schopných účinně vázat a vypouštět vodík. Slibně se zde jeví vysoce porézní materiály nebo komplexní hydridy, ve kterých je vodík chemicky reverzibilně uložen v mřížkové struktuře. Komplexní hydridy jsou sloučeniny podobné soli sestávající z vodíku a směsi lehkých slitin, jako jsou hydridy alkalických kovů, například borohydrid lithný, které obsahují gravimetrickou hustotu vodíku až 20 procent. Jako systém pro reverzibilní skladování vodíku lze však použít pouze jeho část, navíc vysoké teploty potřebné k opětovnému uvolnění vodíku jsou problematické jak z praktických, tak z ekonomických důvodů. Výhodnější jsou borohydridy porézních kovů, jako je borohydrid hořečnatý, který má jako hydrid z lehkých slitin také vysoce porézní strukturu organického skeletu (33 procent objemu pórů). Takové materiály mohou nejen ukládat velká hmotnostní procenta vodíku (14,9 až 17,4 procenta), ale mohou také uvolňovat vodík znovu při relativně nízkých teplotách (přibližně 300 stupňů Celsia). [4][69]

Další přístup je založen na nanoporézních metalorganických sloučeninách (takzvaných kovově organických rámcích), které poskytují velmi vysoké specifické povrchy větší než 6 000 metrů čtverečních na gram. Materiálová struktura se skládá z kovových shluků (například mědi, chromu, zinku) a organických přemostujících molekul. V současné době dosažitelné skladovací kapacity jsou však stále relativně daleko od jakéhokoli možného použití jako systémy skladování vodíku v automobilech. První nákladově efektivní aplikace se proto očekávají spíše pro provoz palivových článků v mobilní elektronice. Obecně lze ale říct, že ve vývoji úložných systémů v pevné fázi je ještě mnoho ke zkoumání. [4]

Co se týče zvýšení produkce vodíku je jedním z nadějných způsobů použití nanoklastrů přechodných kovů jako katalyzátorů, protože velké procento atomů leží na povrchově aktivních nanoklastrech. Byly vybrány Co, Cu, Ni a Fe, protože patří mezi reaktivní přechodné kovy vůči hydrolýze hydridů na bázi boru, jako je NaBH_4 . Levnější katalyzátory z přechodných kovů obecně vykazují pouze mírnou katalytickou aktivitu. Pro získání polymerně stabilizovaných kovových nanoklastrů je k dispozici řada preparativních metod. Nejpoužívanější syntetická metoda zahrnuje redukci kovového iontu v nulovém valenčním stavu v polymerním prostředí. Následuje koalescence polymeru na vzniklé nanoklastry, přičemž je zapotřebí silného stabilizátoru, jako je polymer, aby se zabránilo aglomeraci kovových nanoklastrů ve vodném roztoku při vysokém pH prostředí, který působí jako katalyzátor při hydrolýze borohydridu sodného. [72]

Byla zkoumána úloha kyseliny olejové jako stabilizačního činidla na velikost a morfologii kvartérního nanokatalyzátoru. Od svého objevu přitahují CNT díky svým zvláštním fyzikálním a chemickým vlastnostem stále obrovský zájem po celém světě. Zejména adsorpční chování jednotěnných CNT, ať už jde o chemisorpci nebo fyzisorpci, se podstatně liší od chování grafitu nebo fullerenu a rozhodujícím způsobem závisí na tom, zda je vystaven vnitřní nebo vnější povrch, a dále také na chiralitě (asymetrii prostorového rozložení) a průměru trubice. Pochopení jeho vlastností a schopnost předpovědět příslušné adsorpční konfigurace jsou důležité pro doplnění probíhajícího experimentálního úsilí při vývoji kovalentní funkcionalizace bočních stěn, aplikací CNT jako plynových senzorů a materiálu pro skladování vodíku. [72]

Dále bylo prokázáno, že nanočástice zlata mohou být velmi účinné při využívání sluneční energie k výrobě vodíku z vody. Klíčem k úspěchu je, aby nanočástice byly velmi malé. Bylo také zjištěno, že nanočástice obsahující méně, než tucet atomů zlata jsou velmi účinnými fotokatalyzátory pro výrobu vodíku. [73]

3.2.2 Metan

Stejně jako vodík je i metan považován za čistý energetický plyn. Ve srovnání s ropou má mnohem nižší emise uhlíku, a kromě toho jsou ložiska zemního plynu obsahujícího metan celosvětově rozšířenější než ložiska ropných olejů a jeho rafinace (čištění) na energetické palivo je mnohem jednodušší než rafinace surového ropného oleje na benzin nebo naftu. Metan vzniká také rozkladem organického odpadu a působením bakterií ve střevech přežvýkavců a termitů. Z hlediska krátkodobého praktického využití a inovací nezbytných pro komercializaci se metan jeví jako slibnější alternativa pro mobilní aplikace. Pro adsorpci může být výjimečným členem oxidů alkalických zemin oxid berylnatý (BeO), který je důležitou kovalentní složkou v počáteční iontové vazbě Be-O. Syntetizované nanočástice BeO jsou izolátory se širokou pásmovou mezerou přibližně 10,6 eV. V poslední době byla studována adsorpce některých plynů, jako jsou H₂O, CH₄, NH₃, H₂ a CO, na nanomateriálu BeO. Nicméně několik materiálů, jako jsou nanostruktury nitridu hliníku, systémy nitridu boru a fullerénové klastry borových "buckyballs" a listů, B80 byly experimentálně a teoreticky testovány jako potenciální materiály pro skladování vodíku. [72]

3.3 Mechanické skladování energie

3.3.1 Setrvačnick

Jedním z hlavních a důležitých typů mechanických systémů pro skladování energie jsou setrvačnické systémy. U těchto typů je velmi důležité zvážit otázky nanotechnologií jako součást výroby a skladování energie. V rámci tohoto tématu bylo provedeno několik prací a pokusů s cílem zlepšit účinnost a rychlost setrvačnických systémů použitím nanomateriálů, nanoplňiv a nanokompozitů v jejich rotorech. [74]

Nanomateriály, jako jsou nanotrubičky, destičky, nanovlákná atd. s výjimečnými mechanickými vlastnostmi, jsou slibnými prostředky pro vyztužování kompozitů používaných u setrvačnických systémů. Kompozity vyztužené plnivy v nanorozměrech mají potenciál mít výjimečné vlastnosti od mechanických vlastností přes přizpůsobení modulu pružnosti v tahu, pevnost, lomovou houževnatost nebo odolnost proti opotřebení, jakož i elektrické a optické vlastnosti. Nanomateriály mají mnohem větší povrch na jednotku objemu ve srovnání s částicemi mezoměřítka a vlákny (např. uhlíkovými vlákny). Proto se mohou mnohem účinněji spojit s polymerní matricí. S objemovými podíly nad 5 % však začínají přicházet problémy spojené se špatnou disperzí nanovýtzuže. Ve srovnání s mikrovlákny je však zapotřebí podstatně menší množství nanomateriálu, aby se vlastnosti kompozitu dramaticky změnilo. Řada studií prokázala, že hladiny pod 5 % nanoplňiv mohou významně změnit vlastnosti matrice. [75]

Na pryskyřici vyztuženou nanomateriály lze použít techniky, jako je vstřikování a impregnace vlákn, protože mají relativně nízkou viskozitu nevytvrzené kompozice. Vzhledem k velkému povrchu těchto částic je však třeba přijmout opatření, aby nedocházelo k jejich aglomeraci. Vzhledem k současným problémům s disperzí a vysokým nákladům na nanomateriály se zdá, že setrvačnické systémy pro ukládání energie s hybridními plnivy (mikrovlákna a nanoplňiva) jsou slibnou cestou vpřed, která zajišťuje rovnováhu mezi výhodami nanomateriálů z hlediska zvýšení pevností a cenou. Alternativně je možné použít i levné nanomateriály. [75]

Byl zkoumán vliv nanodrátů TiO₂ na mechanické vlastnosti kompozitních setrvačnických systémů. Nanodráty TiO₂ jsou relativně levné, snadno se připravují a mají snadnou "funkci povrchu"

(surface function, což je proces nutný k dosažení dobré vazby mezi plnivem a matricí a ke zvýšení disperze). Kompozitní setrvačnický byl vyroben navíjením uhlíkových vláken v pryskyřičné lázni napuštěné nanodráty TiO_2 funkcionalizovanými silanem. Výsledky tříbodové ohybové zkoušky kompozitního setrvačnicku ukázaly, že začlenění nanodrátů TiO_2 může zvýšit pevnost kompozitu o 30 %. Zlepšení mechanických vlastností kompozitního setrvačnicku má velký ekonomický dopad v podobě snížení nákladů na skladování energie setrvačnicku o přibližně 20-30 %. [75]

Dále bylo navrženo, začlenění uhlíkových nanotrubiček do epoxidové matrice což by mohlo zvýšit výkon setrvačnicků. Pro zajištění vyšší pevnost kompozitu byla navržena konstrukce, která zahrnuje postupné změny koncentrace nanotrubiček v rotoru podél radiálního směru. Koncentrace nanotrubiček je vyšší ve vnitřní části rotoru a při pohybu podél radiálního směru se koncentrace nanotrubiček snižuje. Uhlíkové nanotrubičky by mohly zajistit zvýšení hustoty energie přibližně 25krát (2 500 Wh/kg bez pouzdra, 900 Wh/kg včetně pouzdra) [76]. Dále použitím svazků uhlíkových nanotrubiček by mohlo dojít až ke zvýšení hustoty energie na 10 000 Wh/kg [77]. [75]

Navzdory dobrým předběžným výsledkům se zdá, že v oblasti aplikace nanomateriálů na setrvačnický je třeba vykonat ještě mnoho práce. Nejzajímavější cestou vpřed se zdá být řešení problémů, které jsou společné pro konstrukci setrvačnicků a zpracování nanokompozitů obecně, jako je rozptýlení nanoplňiva a vyrovnání pro lepší přenos zatížení. Další zajímavý směr se týká specifického použití nanomateriálů na setrvačnický, včetně změn uspořádání a koncentrace plniva v závislosti na poloměru, aby se modulovala pevnost a tuhost. Cílem tohoto přístupu by mělo být snížení napěťových polí (modulací tuhosti) a tím umožnění vyšších úhlových rychlostí. [75]

3.3.2 Vodní přehradý a přečerpávací vodní elektrárny

Byl proveden výzkum, kde byly využity nanotechnologie ke zlepšení epoxidového nátěru použitého na přehradě. Nanočástice oxidu titaničitého kontaminované cínem a následně polymerizované polypyrolem byly přidány do barvy používané v přehradě s různým hmotnostním podílem (od 0,1 do 1 %) a bylo zjištěno, že pokud se použije 0,5 % nanočástic v barvě, výrazně se zvýší odolnost epoxidové pryskyřice vůči korozi. V tomto výzkumu byly použity všechny materiály použité v přehradě, včetně potrubí, barvy a vody z potrubí a narušených stěn. K provedení korozního testu byla použita elektrochemická metoda, jejíž jednou z elektrod byly kusy trubek použitých v přehradě, natřené běžným epoxidem a zesíleným epoxidem s nanočásticemi. Mezitím byly pro elektrolyt použity v trubkách použity různé vzorky vody odebrané z různých míst hráze. [78]

3.3.3 Stlačený vzduch

Adsorpcí posílené skladování energie ve stlačeném vzduchu využívá k adsorpci vzduchu nanoporézní materiály. Tím se dosáhne hustoty vzduchu odpovídající 100 barům při méně než pětinovém tlaku. Mění se také efektivní stavová rovnice vzduchu, takže je možné provozovat systém při v podstatě konstantním tlaku pomocí cyklického střídání teplot. Nízký a konstantní tlak výrazně snižuje náklady na hardware potřebný pro jiné než podzemní skladování energie stlačeného vzduchu. Kromě toho je rychlost uvolňování adsorbovaného vzduchu vnitřně omezena difúzí, což spolu s nízkým tlakem činí systém v podstatě nevybušným. [79]

3.4 Termální skladování energie

Nanomateriály mohou způsobit významné změny termofyzikálních vlastností materiálů pro akumulaci tepla, zejména v případě materiálů s fázovou změnou (phase change materials, PCM). Začlenění nanostruktur/nanomateriálů ve stanovených poměrech do čistých PCM může přinést lepší tepelnou vodivost, rychlé zmrazování a tání, vysokou tepelnou stabilitu a dlouhodobě dobrou tepelnou spolehlivost. Lze očekávat, že přenos tepla podobný fononům, Brownův pohyb a agregace dobře rozptýlených nanočástic přispějí ke zlepšení tepelně akumulčních vlastností PCM určených pro aplikace latentního ukládání tepelné energie (latent thermal energy storage, LTES). [80][81]

Například bylo zkoumáno zlepšení tepelně skladovacích vlastností včetně tepelné vodivosti, transportních jevů a tepelných interakcí PCM kyseliny palmitové zapletené s nedotčenými vícevrstevnými uhlíkovými nanotrubičkami (Multi-walled carbon nanotubes, MWCNT). Nedotčené MWCNT připravené mechano-chemickou metodou a zároveň začleněné do PCM přispívají ke zvýšení tepelné vodivosti o 30 % více, než byly dříve uváděné hodnoty. Zvýšená tepelná vodivost tohoto PCM umožňuje uvažovat o jeho využití pro aplikace LTES. [80]

Obecně lze však identifikovat výhody integrace nanotechnologií v optimalizaci účinné výroby, absorpce a skladování energie. Tepelně skladovací vlastnosti materiálů pro ukládání latentního tepla lze zlepšit pomocí pokročilých materiálů vyráběných na úrovni nanorozměrů. Nanotechnologie také usnadňují výrobu materiálů požadovaných fyzikálně-chemických a termofyzikálních vlastností ve velkém měřítku. Náklady spojené s výrobou, distribucí a skladováním energie lze také snížit, aniž by se při stejných očekávaných výsledcích spotřebovalo velké množství materiálu [80]. Dále přidáním pevných materiálů o nanorozměrech do PCM lze výrazně urychlit procesy nabíjení/vybíjení. Další výhodou je zlepšení tepelných vlastností, které je způsobeno především zvýšením tepelné vodivosti a snížením latentního tepla tání (ve většině případů), což vede ke zkrácení doby tání/tuhnutí. [81]

S integrací nanotechnologií však přichází řada výzev, například navzdory účinku přidání nanočástic na tepelnou vodivost se při zvyšování koncentrace zvyšuje dynamická viskozita, což je nepříznivý účinek, který znamená, že musí existovat optimální koncentrace pro dosažení nejlepšího výkonu [81]. Nanomateriály zabudované do PCM mají také velký a přední problém, pokud jde o aglomeraci nebo agregaci částic, takže stabilita suspenze PCM a výkonnost skladování tepelné energie mohou být také značně sníženy. Dalším problémem je významný dopad na životní prostředí syntetizovaných nanomateriálů nebo jejich vedlejších produktů, pokud nejsou před vypuštěním nebo likvidací řádně zpracovány. Některé chemické složky používané k přípravě nanomateriálů mohou být také velmi nebezpečné a manipulace s nimi může být velmi obtížná. Další problém může spočívat v nedostatečných odborných znalostech při přípravě nanomateriálů začleněných do PCM, což může také vést k plýtvání materiály jak v nanoměřítku, tak v surovém stavu. [80]

4. Nanotechnologie pro distribuci energie

4.1 Elektrická síť

4.1.1 Dráty a kabely

Z hlediska přenosu elektrické energie mají standardní nadzemní vodiče (hliníkový vodič vyztužený ocelí) nevýhodu, že v důsledku relativně vyššího odporu se velká část přenášené energie ztrácí ve formě tepla. Zvýšená teplota vodičů také vede k jejich prohýbání, což vyžaduje zmenšení vzdálenosti mezi přenosovými stožáry nebo sloupy a následné zvýšení nákladů na přenos. Použití nanomateriálů by umožnilo zlepšit účinnost vodičů pro přenos elektřiny a snížilo by prohýbání. [82][83][84]

Současné dráty by mohly být nahrazeny přenosovými dráty v nanorozměrech, tzv. kvantovými dráty (quantum wires, QW) nebo "křeslovými" (armchair) QW. Elektrická vodivost QW je vyšší než u mědi při šestinové hmotnosti a QW je dvakrát pevnější než ocel. Mřížka tvořená takovými přenosovými dráty by neměla žádné ztráty na vedení ani odpor, protože elektrony by byly nuceny procházet trubici podélně a nemohly by unikat ven pod jinými úhly. Vlastnosti mřížky by byly odolné vůči změnám teploty a měla by minimální nebo žádný průhyb. Snížený průhyb by umožnil umístit stožáry dále od sebe, čímž by se zmenšila plocha a související dopady na výstavbu a údržbu. [83][84][85]

Uhlíkové nanotrubičky (Carbon nanotubes, CNT) jsou jedním z takových nanomateriálů, který má potenciál ovlivnit systém přenosu energie. Speciální typ jedностěnných CNT nazvaný jako "křeslové" (armchair) CNT vykazuje extrémně vysokou elektrickou vodivost (více než 10krát vyšší než měď) a má také pružnost, elasticitu a vysokou pevnost v tahu. Jejich mechanická pevnost zpříčiní výrazné snížení mechanických poruch. Mezi další benefity zavedení CNT patří jejich nízká hustota, která usnadní manipulaci, přepravu, instalaci a údržbu. Díky vysoké proudové zatížitelnosti a nízké tepelné roztažnosti CNT lze přenášet větší výkon se sníženým efektem průhybu což má za následek mnohé benefity. CNT má tedy potenciál, pokud bude vetknut do drátů a kabelů, zajistit vedení pro přenos elektřiny s podstatně lepšími parametry než současná elektrická vedení. [82][84][86]

CNT vykazují v porovnání se současnými vodiči dobré výsledky ve všech oblastech, avšak jejich výroba zatím není kvůli různým výzkumným překážkám praktická. Technologie pro zabudování CNT do vodičů ještě není plně připravena. Některé problémy byly sice v poslední době díky rozvoji nanotechnologií vyřešeny, ale je stále zapotřebí dalšího výzkumu. Listy CNT se dělí na polovodiče a kovy, avšak v silových přenosových vedeních se vyžadují pouze kovové CNT. Oddělit kovové nanotrubičky od polovodičových CNT je však poměrně náročný úkol. Ačkoli bylo různými separačními metodami (chemická depozice z par, di-elektroforéza atd.) dosaženo některých úspěšných výsledků, po použití chemických a fyzikálních procesů pro separaci byly pozorovány některé chemické a fyzikální změny, které mění vlastnosti CNT. V přenosových vedeních je také vyžadováno dokonalé vzájemné propojení CNT. Spojování CNT je možné různými technikami (ozařování elektronovým a iontovým svazkem, spékání jiskrovým plazmatem atd.), avšak dokonalého spojení konců CNT a vytvoření správné sítě se však dosud nepodařilo. Daří se však vypěstovávat stále delší CNT o délkách dosahujících již 550 mm. Výzkum v oblasti nanotechnologií tedy dosahuje stále větších úspěchů a předpokládá se, že během jednoho až dvou desetiletí budeme schopni z CNT vyrábět vodiče. [86]

4.1.2 Transformátory

Rozsáhlé používání transformátorového oleje pro vysokonapěťovou izolaci a chlazení energetických zařízení vedlo k rozsáhlým výzkumným pracím zaměřeným na zlepšení jeho dielektrických i tepelných vlastností. Zvláště inovativním příkladem takové práce je vývoj dielektrických nanotekutin. Tyto materiály se vyrábějí přidáním suspenze nanočástic do transformátorového oleje s cílem zlepšit některé izolační a tepelné vlastnosti oleje. Tekutiny obsahující nanomateriály by mohly zajistit účinnější chladicí tekutiny v transformátorech, případně zmenšit velikost nebo dokonce počet transformátorů. Nanočástice zvyšují přenos tepla a pevné nanočástice vedou teplo lépe než tekutina. Nanočástice zůstávají v tekutinách suspendovány déle než větší částice a mají mnohem větší povrch, na kterém snadno dochází k přenosu tepla. Použití nanočástic při vývoji vysokoteplotních supravodičů by mohlo vést k vytvoření kompaktních transformátorů bez hořlavých kapalin, což by mohlo pomoci zvýšit jejich flexibilitu. [82][83][84]

Životnost výkonových transformátorů přesahuje 25-50 let, ale při jejich předčasném selhání často dochází k nebezpečnému výbuchu. Sledování stavu těchto transformátorů je pro udržení energetické infrastruktury země zásadní. Jedním z nejspolehlivějších způsobů, jak předpovědět předčasné selhání transformátoru, je sledování hladiny plynného vodíku v izolačním oleji. Jak se olej zhoršuje, hladina plynného vodíku se zvyšuje. Byl vytvořen senzor z nanočástic slitiny palladia, který je o velikosti pouhého milimetru čtverečního. Tento snímač může nabídnout nepřetržité monitorování vodíku v oleji. Sensory mohou monitorovat i nárůst hladiny vodíku, což umožňuje energetickým společnostem sledovat rychlost zhoršování kvality oleje. Zařízení fungují na základě rozpínání a smršťování palladia v dielektrickém substrátu. Palladiové paměti fungují jako spínače, které se při kontaktu s vodíkem rozpínají. Protože se zapínají pouze při rozpínání, nespotebovávají při běžném provozu žádnou energii. Před příchodem těchto zařízení bylo nutné sledovat zhoršování kvality oleje a hladinu vodíku pomocí drahé a časově náročné plynové chromatografie. Současný výzkum rozšířil tyto vlastnosti a vytvořil tenkovrstvé vodíkové senzory. Tyto nové senzory by mohly mít zásadní význam pro budoucí dopravní infrastrukturu, jakmile bude vodík možné rozšířit jako zásobárnu energie. [84]

4.1.3 Nanosenzory

Nanosenzory mohou být extrémně citlivé, selektivní a pohotové. Mohly by tak být menší, levnější a spotřebovávat méně energie než běžné senzory. Sensory a ovládací prvky, které mají malé rozměry, bezpečně pracují v přítomnosti elektromagnetických polí, vysokých teplot a vysokých tlaků a lze je nákladově efektivně měnit, mohou poskytnout možnost nepřetržitého sledování podmínek v infrastruktuře a monitorování znečišťujících látek (únik par nebo oleje). Vědci vyvinuli senzory vyrobené z titanových nanotrubiček potažených diskontinuální vrstvou palladia. Fotokatalytické vlastnosti titanových nanotrubiček jsou tak velké (stokrát větší než u jakékoli jiné formy titanu), že se nečistoty ze senzorů účinně odstraňují působením ultrafialového světla, takže senzory účinně obnovují nebo si zachovávají svou původní citlivost. Sensory na nekontrolovaných místech se kontaminují různými látkami včetně těkavých organických par, sazí a olejových výparů, ale i prachem a pylem. Samočisticí funkce schopná oxidovat kontaminanty by prodloužila životnost snímače a minimalizovala chyby snímače. [85]

Nanosenzory by se mohly samy kalibrovat a diagnostikovat. Mohly by oznamovat potíže technikům, kdykoli by se vyskytly nebo předvíдалy problémy. Takové senzory by také mohly umožnit dálkové monitorování infrastruktury v reálném čase. Miniaturní senzory rozmístěné

po celé přenosové síti by mohly poskytnout přístup k údajům a informacím, které dříve nebyly k dispozici. Stav distribučních napáječů pod napětím v reálném čase by urychlil obnovu výpadků a vyrovnávání fází a ztráty na vedení by se daly snadněji řídit, což by pomohlo zlepšit celkový provoz distribuční napájecí sítě. [83]

4.2 Potrubí

4.2.1 Povlaky

V současné době se většina identifikovaných aplikací nanotechnologií pro potrubí týká povlaků materiálů (izolačních, protikorozních a víceúčelových). Povlaky s nanostrukturou mají vynikající houževnatost, opotřebení a přilnavost. Nanostrukturní prášky mají zrna o velikosti menší než 100 nm, která jsou aglomerována a vytvářejí částice dostatečně velké pro nástřik běžnými metodami tepelného stříkání. Tyto povlaky lze použít k opravě součástí namísto jejich výměny, což vede ke snížení nákladů na údržbu a poruch. Kromě toho mohou povlaky s nanostrukturou prodloužit životnost součástí díky svým lepším vlastnostem oproti běžným povlakům. [85]

4.2.2 Inhibitory koroze

Koroze pod izolací (Corrosion under insulation, CUI) je nákladný problém, který se v potrubí obtížně odhaluje. Nansulate™ je materiál na bázi nanotechnologie, který funguje jako vysoce účinný tepelný izolant, jenž zabraňuje vzniku CUI. Průsvitná charakteristika povlaku umožňuje vizuální kontrolu podkladu bez nutnosti odstraňovat povlak, takže se dobře hodí pro použití v plynovodech a potrubích pro přepravu kapalin. [85]

4.2.3 Materiály

Pokročilé materiály využívající nanotechnologie mohou prodloužit životnost, snížit poruchovost a omezit možnost poškození životního prostředí. Nanopovrchová úprava kovových povrchů může pomoci dosáhnout mimořádného zpevnění, nízkého tření a zvýšené ochrany proti korozi. Pevnější materiály mohou snížit opotřebení, korozi a pravděpodobnost proražení spojenou s poškozením třetí stranou. Také proto, že nanovrstvy mohou být na jednotku objemu pevnější než konvenční materiály, může použití trubkových materiálů, které obsahují nanovrstvy nebo jsou jimi potaženy, znamenat menší narušení životního prostředí při instalaci, údržbě a demontáži. [85]

4.3 Doprava

Nanotechnologie mohou umožnit účinnější dopravu prostřednictvím katalyzátorů v palivech. Pro účinnější spalování motorové nafty byla použita přísada využívající částice oxidu ceru v nanorozměrech (o průměru 10 nm), které katalyzují spalovací reakce mezi naftou a vzduchem. Malá velikost částic vytváří větší povrch pro katalyzační reakce, způsobuje, že částice zůstávají rovnoměrněji suspendovány v palivu, a umožňuje použití aditiva v koncentraci pouhých pěti částic na milion, což je desetina koncentrace předchozích aditiv. V nezávisle vyhodnocených provozních zkouškách v komerčních provozních podmínkách byl prokázán přínos ke snížení spotřeby paliva až o 10 %. [83]

Energeticky účinnější dopravy je také možné dosáhnout použitím vysoce pevných materiálů s nízkou hmotností vyvinutých pomocí nanotechnologií. [83]

5. Nanotechnologie pro použití energie

5.1 Snížení tření u strojů a vozidel

Maziva pomáhají minimalizovat tření a opotřebení styčné plochy, aby se minimalizovaly ztráty výkonu. Přídavek nanočástic do základového oleje zlepšuje určité vlastnosti mazacího oleje, jako je zlepšení odolnosti proti tření a opotřebení, zlepšení nosnosti atd. Nanočástice suspendované v mazivu mohou pronikat do malých mezer mezi drsnými povrchy v kontaktu a měnit tribologické vlastnosti kontaktu. Proto nanočástice nabízejí alternativní přístup k mazání zavedením třetích těles přímo do kontaktu. Chování snižující tření a zabraňující opotřebení závisí na vlastnostech nanočástic, jako je velikost, tvar a koncentrace. Ke zlepšení tribologických vlastností stačí nízká koncentrace nanočástic (<1 %). Po dosažení vyvážených formulací mají tedy nanomateriály potenciál zlepšit určité vlastnosti maziv. [87][88]

5.2 Lehká konstrukce využívající nanokompozity

Materiály vyztužené nanočásticemi, které jsou stejně pevné nebo pevnější než dnešní materiály, ale váží méně, pomohou zajistit lepší úsporu paliva. Použitím vysoce pevných nanomateriálů by mohly být díly pro automobily a další druhy dopravy o více než 50 % lehčí než běžné alternativy. Snížení hmotnosti by mohlo snížit nároky na palivo, čímž by se potenciálně snížila poptávka po ropných palivech (a s tím související potrubní doprava). Stejně tak nové materiály vyvinuté pomocí nanotechnologií umožní miniaturizaci systémů a zařízení, což může dále zlepšit úsporu paliva. [83]

5.3 Inteligentní, energeticky efektivní technologie budov

Pro snížení spotřeby energie na vytápění a chlazení budov. Vědci demonstrovali zařízení s tepelně absorpční fólií složenou z nanočástic zinku a mědi na tenké vrstvě mědi a fólií odrážející teplo pomocí tenké stříbrné vrstvy. Záměrem je využít tyto materiály pohlcující a odrážející teplo k doplnění stávajících systémů vytápění, větrání a klimatizace dále také k snížení energie potřebné k vytápění a chlazení budov. [89]

Pomocí nanotechnologií byly také vyvinuty vysoce účinné žárovky. Takové žárovky mohou být vyrobeny pomocí plazmonických dutin (struktury soustředující elektromagnetické pole), struktur o velikosti nano nebo polymerní matrice s nanotechnologiemi. Výhodou posledního jmenovaného řešení je, že je odolné proti rozbití a má dvakrát vyšší účinnost než kompaktní žárovky. Vyvíjejí se také polovodičová světelná zařízení v podobě světelných diod. Dalším vyvíjeným nápadem je modernizace žárovek obklopením běžného vlákna krystalickým materiálem, který přeměňuje část odpadního infračerveného záření na viditelné světlo. [90]

5.4 Energetická účinnost výrobních procesů

Při aplikaci na chemickou výrobu nabízí nanotechnologie možnost vyvinout nové, atomárně přesné katalyzátory (materiály, které zvyšují rychlost chemické reakce) pro specifické procesy, které výrazně snižují energetickou náročnost a zlepšují produktivitu materiálů v průmyslu. Jedním ze způsobů, jak může nanotechnologie zlepšit energetickou účinnost chemické výroby, je kompenzace potřeby používat k výrobě chemických látek vysoké teploty. Může také optimalizovat výrobní procesy tak, aby se požadovaná chemická látka vyráběla bez vedlejších produktů, které spotřebovávají energii a materiál a zároveň vytvářejí odpad. [91]

6. Perspektiva nanotechnologické fotovoltaiky

6.1 Porovnání fotovoltaických technologií

Pro porovnání fotovoltaických technologií jsem zvolil několik klasických zavedených polykrystalických a monokrystalických fotovoltaických panelů. Zvolil jsem od obou druhů jeden klasický v České republice používaný model a jeden z nejúčinnějších modelů na trhu.

Jako vyvíjené fotovoltaické technologie na bázi nanotechnologií jsem vybral perovskitové, CIGS a DSSC solární panely. Specifikace vybraných panelů jsem čerpal ze závěrů odborných prací, tak aby co nejlépe reprezentovala podobu, ve které by tyto panely byly nabízeny na trhu. Ne všechna data byla poskytnuta z jednotlivých odborných prací, proto jsem provedl zkombinování více prací s podobnými výsledky při tvorbě specifikací jednotlivých panelů.

Porovnávání jednotlivých solárních panelů jsem prováděl pomocí programu MS Excel, do kterého jsem naimportoval hodinová data z fotovoltaického geografického informačního systému (Photovoltaic Geographical Information System, PVGIS) [92]. Data byla sbírána v období deseti let od začátku roku 2011 do konce roku 2020 ze zvolené lokality střechy fakulty strojní. Pro tuto lokalitu byly použity optimální parametry vygenerované nástrojem PVGIS s optimálním sklonem 39° a optimálním azimutem -5° .

Upravil jsem prostředí v Excelu tak, aby ze vstupních dat získaných pomocí PVGIS v libovolné lokalitě vypočítalo údaje potřebné k porovnání fotovoltaických technologií. Z dat získaných pomocí nástroje PVGIS se dále počítá s teplotou, rychlostí větru a globálním osvětlením (které se spočítá z přímého, difuzního a odraženého osvětlení). K jednotlivým řádkům se následně automaticky přiřazuje informace o datumu a hodině měření, čehož se následně využívá pro zobrazování dat v denních, týdenních a měsíčních intervalech.

Jako první jsem provedl výpočet pro konvekci vlivem větru pomocí rovnice (2) v jednotlivých hodinách. [93][94]

$$h_w = 5,7 + 3,8w \quad (2)$$

kde $h_w =$ konvekce větrem

$w =$ rychlost větru

Získané hodnoty jsem dále použil v rovnici (3) pro výpočet teploty panelu (jde o zjednodušený předpoklad zanedbání elektrického výkonu), zde jsem zvolili přibližnou hodnotu 8 % pro odrazivost panelu z důvodu použití výpočtu pro porovnání panelů mezi sebou. [93][94]

$$t_{PV,panelu} \cong t_{vzduchu} + \frac{(1-\rho) \cdot G}{h_w} \quad (3)$$

kde $t_{PV,panelu} =$ teplota panelu

$t_{vzduchu} =$ je teplota okolního vzduchu

$(1 - \rho) = \alpha =$ pohltivost modulu

$\rho = 0,08 =$ odrazivost panelu (přibližná hodnota)

$G =$ globální ozáření

$h_w =$ konvekce větrem

Teploty panelů jsem počítal, jelikož účinnost udávaná výrobcem je pouze referenční a vztahuje se k takzvaným standardním zkušebním podmínkám (Standard Test Conditions, STC), které jsou za teploty 25 °C (mezi další podmínky patří například sluneční záření o intenzitě 1000 wattů na metr čtvereční [95]), při jiných teplotách dochází ke změně účinnosti. Tudíž pro výpočet účinnosti při teplotách mimo STC musíme použít teplotní koeficient, který popisuje procentuální rychlost změny účinnosti při změně o stupeň Celsia. Hodnoty teplotních koeficientů pro jednotlivé panely jsou popsány v Tabulce 1 a jsou dále použity v rovnici (4) pro výpočet aktuální účinnosti. V rovnici (4) pro aktuální účinnost také počítáme s vlivem slunečního ozáření, který je reprezentován poslední závorkou v rovnici (4). [93][94]

$$\eta_{PV,panelu} = \eta_{ref} \cdot \left(1 + \frac{\beta}{100} \cdot (t_{PV,panelu} - t_{ref})\right) \cdot \left(1 + 0,03 \cdot \ln \frac{G}{1000}\right) \quad (4)$$

kde $\eta_{PV,panelu}$ = aktuální účinnost panelu

η_{ref} = referenční účinnost

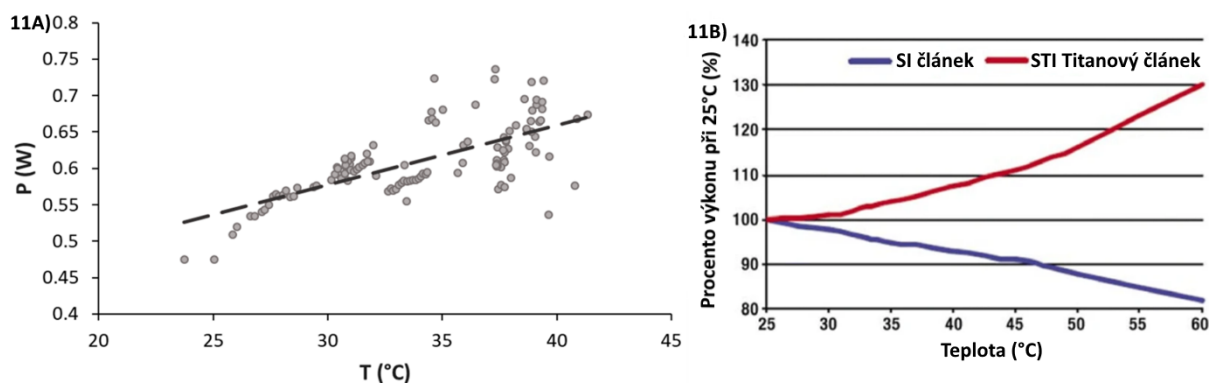
β = teplotní koeficient

$t_{PV,panelu}$ = teplota panelu

$t_{ref} = 25^\circ\text{C}$ = referenční teplota článku

G = globální ozáření

Obvykle účinnost solárních panelů klesá s rostoucí teplotou, avšak DSSC solární panely z tohoto pravidla vybočují, jelikož se efekty teploty na účinnost projevují opačně. Z obrázku 11A a 11B je vidět stoupající účinnost DSSC solárních panelů při stoupajících teplotách, avšak nepodařilo se nalézt data která by podporovala pokračování tohoto trendu nad teplotou 60 °C. Z důvodu nedostatku informací o chování panelu na této teplotě jsem rozhodnul počítat při teplotách nad 60 °C s nulovým teplotním koeficientem. Je sice nepravděpodobné, že by došlo k tak prudké změně, ale z důvodu výskytu některých informací naznačujících nižší maximální operační teplotu než 85 °C u DSSC panelů, byl vytvořen tento kompromis. Účinnost při teplotách pod 25 °C začne klesat, a to až k minimální operační teplotě která se pohybuje u DSSC okolo -7 °C. Tato teplota je v porovnání s ostatními panely, které mají minimální operační hodnotu -40 °C výrazně vyšší, avšak solární panel je při produkci zasahován slunečním svitem, který ho ohřívá, a proto takto nízkých teplot většinou nedosahuje (nejnižší operační teplota z dat použitých v této práci byla -12 °C a jedná se o zanedbatelné ztráty v setinách kWh za životnost panelu). [96][97][98][99]



Obrázek 11: Ukázka rostoucího teplotního koeficientu DSSC panelů 11A Závislost teploty na výkonu [96] 11B Závislost teploty na procentuálním navýšení výkonu [97]

Pomocí získané účinnosti v jednotlivých hodinách dále počítám rovnicí (5) určující množství vyrobené energie. Vyrobena energie se však nepočítá při teplotách přesahujících 85 °C, jelikož dochází k překročení maximálních operační teplot panelů. [93][94]

$$E = \frac{\eta_{PV,panelu}}{100} \cdot \frac{G}{1000} \quad (5)$$

kde E = vyrobená energie

$\eta_{PV,panelu}$ = aktuální účinnost

G = globální ozáření

Tabulka 1: Porovnání panelů s daty převedenými na 1 m²

Typ	Výkon [W]	Referenční účinnost [%]	Teplotní koeficient [%/°C]	Životnost [roky]	Zdroj
Polykrystalický 1	168	16,8	-0,403	35	[100][101][102]
Polykrystalický 2	203,7	20,4	-0,36	35	[103][104][101][102]
Monokrystalický 1	162,2	16,2	-0,45	40	[105][101][102]
Monokrystalický 2	226,3	22,6	-0,29	40	[106][107][101][102]
Perovskite	190	19	-0,17	15	[108][109][110]
CIGS	186	18,6	-0,36	25	[111][112]
DSSC	112	11,2	-0,6/0,6*	6	[96][97][113][114]

*Teplotní koeficient pro DSSC solární panely s rostoucí teplotou nad 25 °C navyšuje účinnost s klesající teplotou pod 25 °C, ale účinnost klesá

V závislosti na datech z PVGIS a specifikací jednotlivých panelů vypočítávám vyrobenou energii v období 10 let (Tabulka 3) avšak do této hodnoty není započítána roční ztráta účinnosti. Snižování výkonu solárních panelů v průběhu času neboli degradace je zapříčiněná vlivem různých vnějších faktorů (např. počasí). Jedním ze způsobů degradace solárních panelů jsou mikrotrhliny, které způsobují poškození elektrických spojů. Dalšími problémy mohou být poruchy přilnavosti spojovacích skříněk a změna barvy [115]. Roční ztráty účinnosti pro jednotlivé panely jsou popsány v tabulce 2. Přesnost hodnoty u rozvíjeních se technologií fotovoltaiky je často neověřená, jelikož se jedná o stále zkoumané nové technologie. Pro počítání s roční degradací jsem vypočítal průměrnou roční výrobu z 10leté výroby energie. Následně počítám s každoročním snížením výroby o procento odpovídající jednotlivým panelům, a to po celou dobu jejich životnosti. Životnosti jednotlivých panelů jsou zobrazeny v tabulce 1. Opět je třeba brát v potaz možnou nepřesnost u rozvíjeních se technologií fotovoltaiky z předem avizovaných důvodů. Součet vyrobené energie v jednotlivých letech dále představuje vyrobenou energii za životnost pro jednotlivé panely (Tabulka 3).

Tabulka 2: Porovnání panelů s daty převedenými na 1 m²

Typ	Referenční účinnost [%]	Roční degradace [%/rok]	Cena za Watt [\$]	Cena na m ² [\$]	Zdroj
<i>Polykrystalický 1</i>	16,8	0,8	0,95	159,6	[100][101][102]
<i>Polykrystalický 2</i>	20,4	0,8	0,95	193,5	[103][104][101][102]
<i>Monokrystalický 1</i>	16,2	0,5	1,25	202,8	[105][101][102]
<i>Monokrystalický 2</i>	22,6	0,5	1,25	282,8	[106][107][101][102]
<i>Perovskite</i>	19	0,5	0,16	30,4	[108][109][110]
<i>CIGS</i>	18,6	0,5	0,5	93	[111][112]
<i>DSSC</i>	11,2	1,33	1,485	166,3	[96][97][113][114]

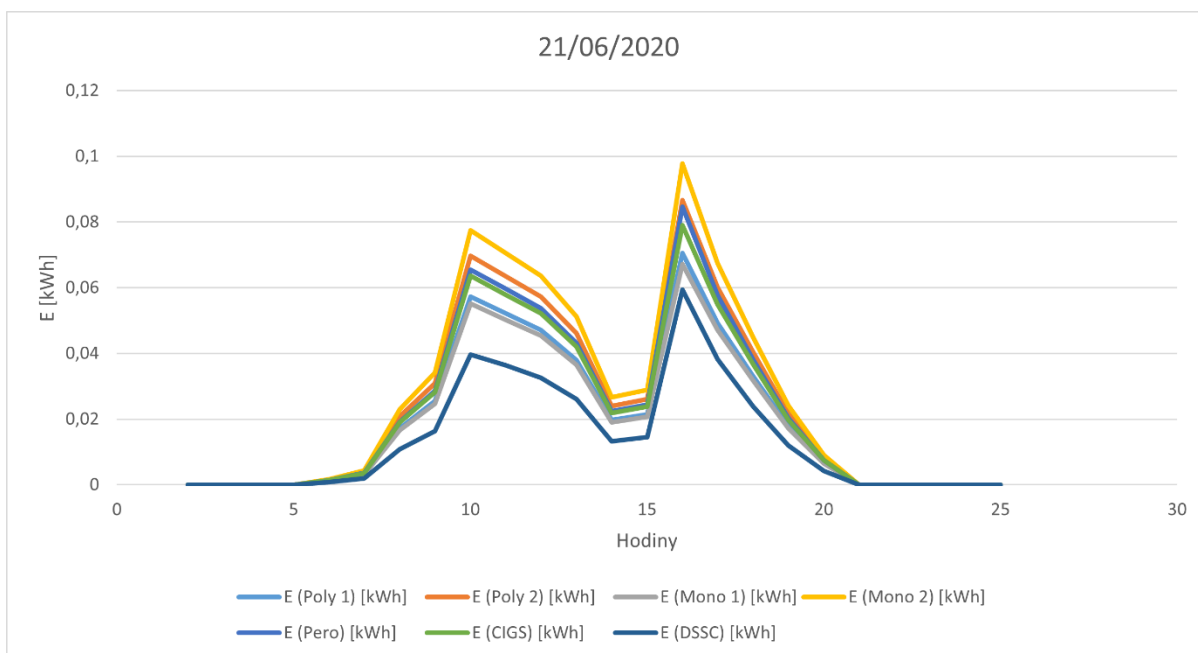
Pro ekonomické zhodnocení jsem provedl výpočet cen jednotlivých panelů (Tabulka 2) a to pomocí stanovených cen za Watt pro jednotlivé panely, které jsou vypsány v tabulce 2. Je třeba opět brát v potaz možnou nepřesnost u rozvíjeních se technologií fotovoltaiky z důvodů předem avizovaných. Poslední výpočet, který jsem provedl, byl výpočet ceny za vyrobenou kilowatthodinu pro jednotlivé panely (Tabulka 3) a to jednoduchým podělením ceny vyrobenou energií. Jedná se pouze o cenu za samotný panel, bez zahrnutí dalších systémů (střídače, regulátory, ...) a jejich účinností.

Tabulka 3: Porovnání výsledků v České republice

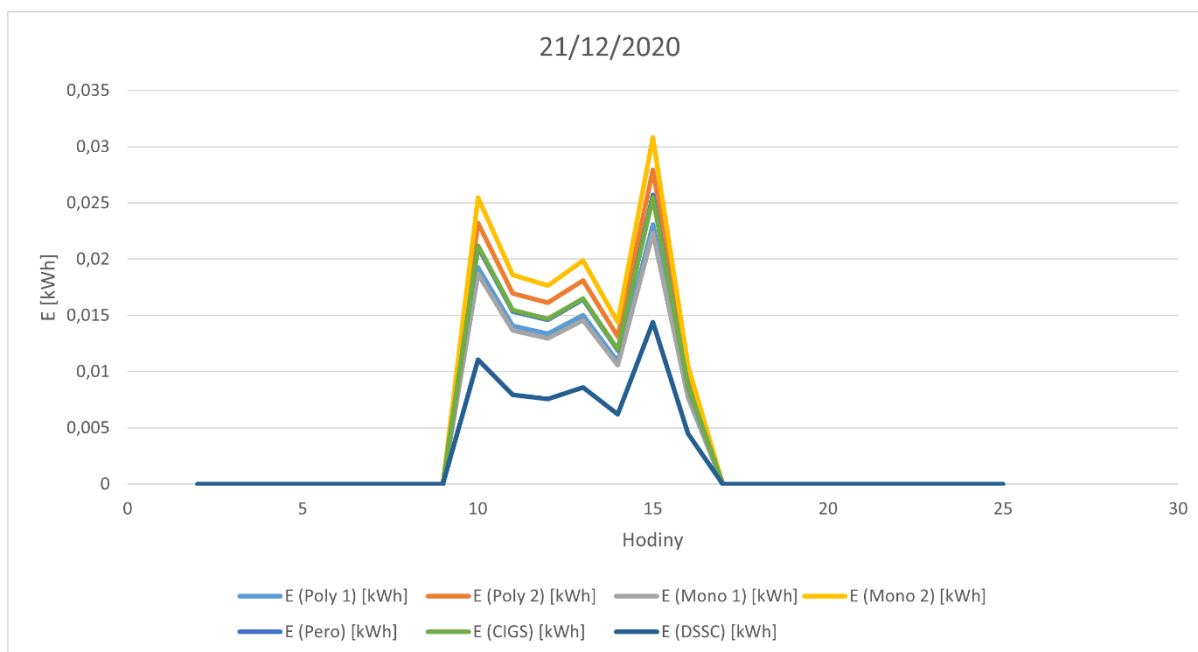
Typ	Referenční účinnost [%]	Energie za 10 let* [kWh]	Energie za životnost [kWh]	Cena za kWh [\$]
<i>Polykrystalický 1</i>	16,8	2 246	6 880	0,0284
<i>Polykrystalický 2</i>	20,4	2 740	8 393	0,0281
<i>Monokrystalický 1</i>	16,2	2 155	7 831	0,0319
<i>Monokrystalický 2</i>	22,6	3 057	11 109	0,0307
<i>Perovskite</i>	19	2 602	3 770	0,0096
<i>CIGS</i>	18,6	2 498	5 884	0,0192
<i>DSSC</i>	11,2	-	855	0,2035

*Bez započítání roční degradace

Porovnání výroby energie v průběhu nejkratšího (obr. 12) a nejdelšího (obr. 13) dne roku 2020 v České republice:



Obrázek 12: Ukázka nejdelšího dne roku 2020 v České republice



Obrázek 13: Ukázka nejkratšího dne roku 2020 v České republice

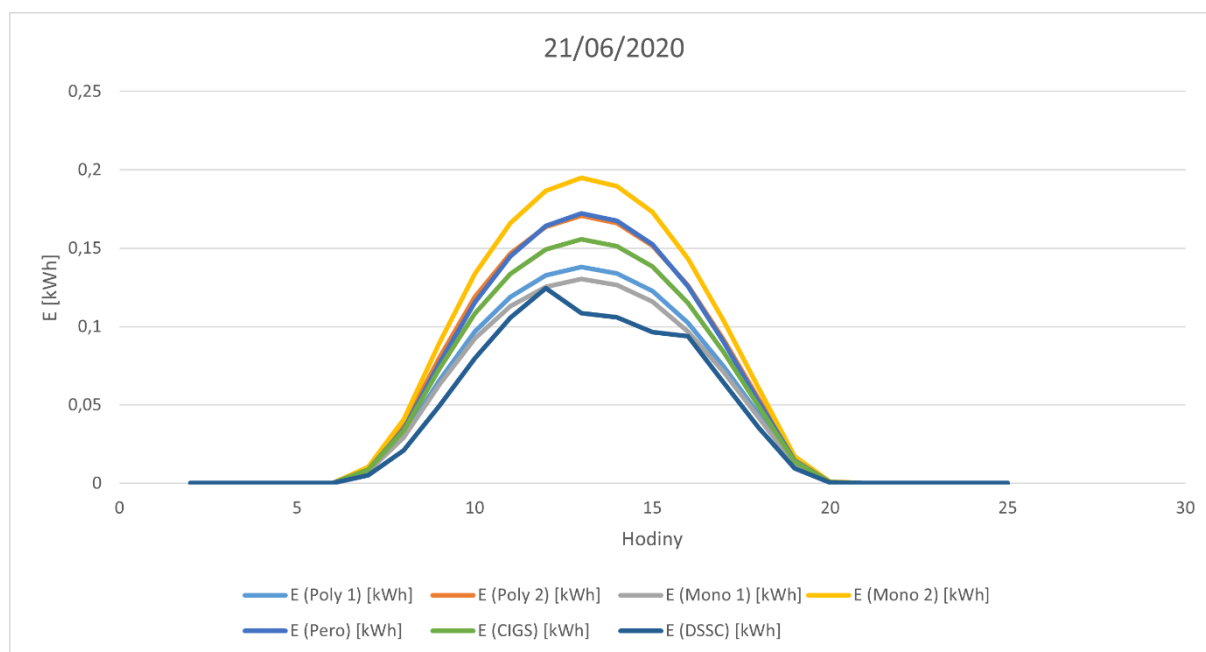
Po získání dat v České republice jsem proces opakovat v jiné lokalitě. Jako tuto lokalitu jsem zvolil Tunisko, jelikož se nachází ve stejném časovém pásmu a v slunečnější lokaci, kde dochází k vyššímu využití solárních panelů. Pro tuto lokalitu byly opět použity optimální parametry vygenerované nástrojem PVGIS s optimálním sklonem 31° a optimálním azimutem 0°. Data z této lokace jsou zobrazena v tabulce 4.

Tabulka 4: Porovnání výsledků v Tunisku

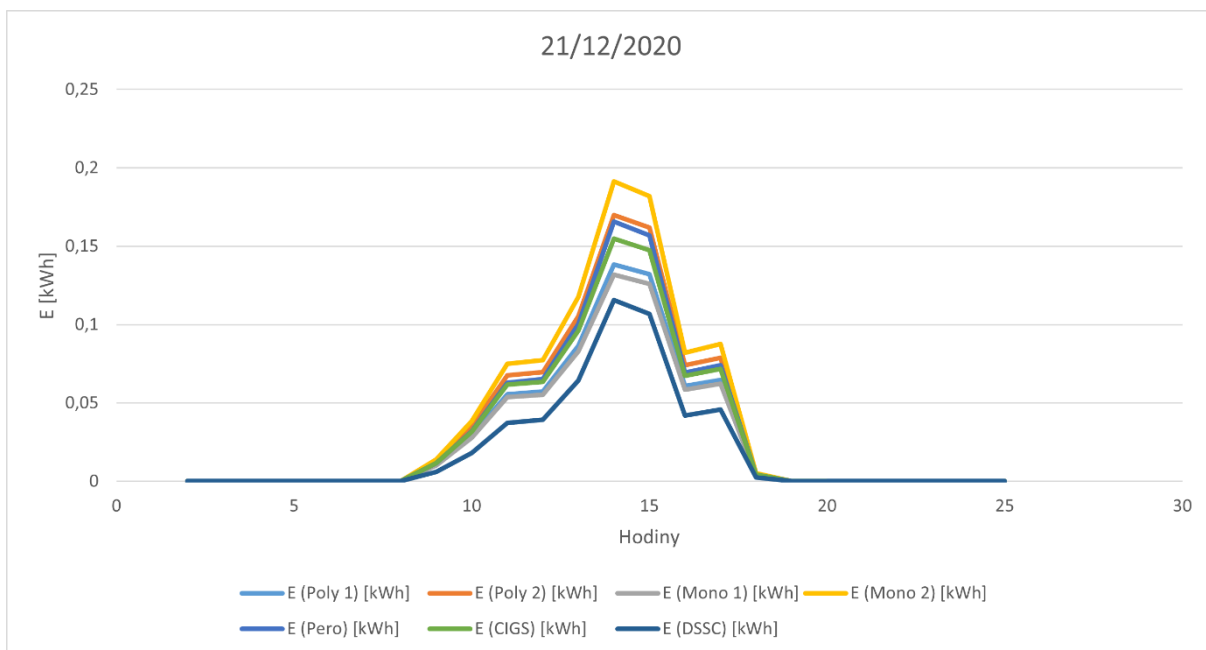
Typ	Referenční účinnost [%]	Energie za 10 let* [kWh]	Energie za životnost [kWh]	Cena za kWh [\$]
Polykrystalický 1	16,8	4 083	12 509	0,0169
Polykrystalický 2	20,4	4 978	15 248	0,0166
Monokrystalický 1	16,2	3 921	14 247	0,0191
Monokrystalický 2	22,6	5 549	20 162	0,0180
Perovskite	19	4 715	6 830	0,0055
CIGS	18,6	4 538	10 691	0,0144
DSSC	11,2	-	1 649	0,1136

*Bez započítání roční degradace

Porovnání výroby energie v průběhu nejkratšího (obr. 14) a nejdelšího (obr. 15) dne roku 2020 v Tunisku:



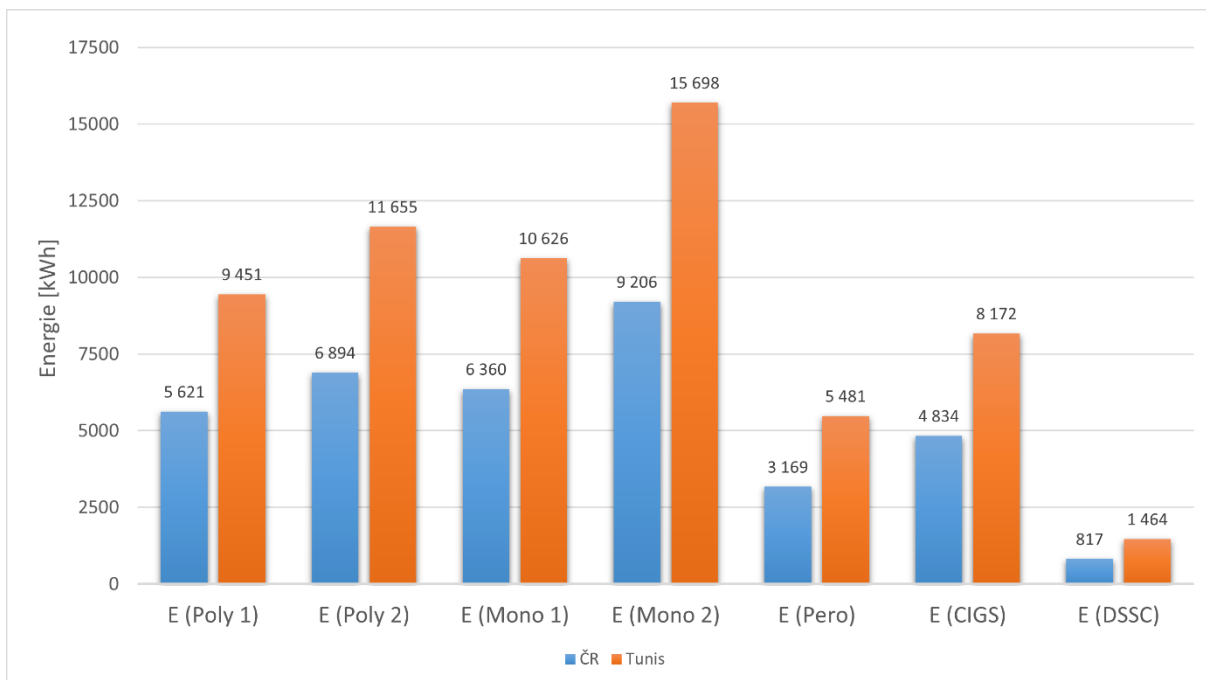
Obrázek 14: Ukázka nejdelšího dne roku 2020 v Tunisku



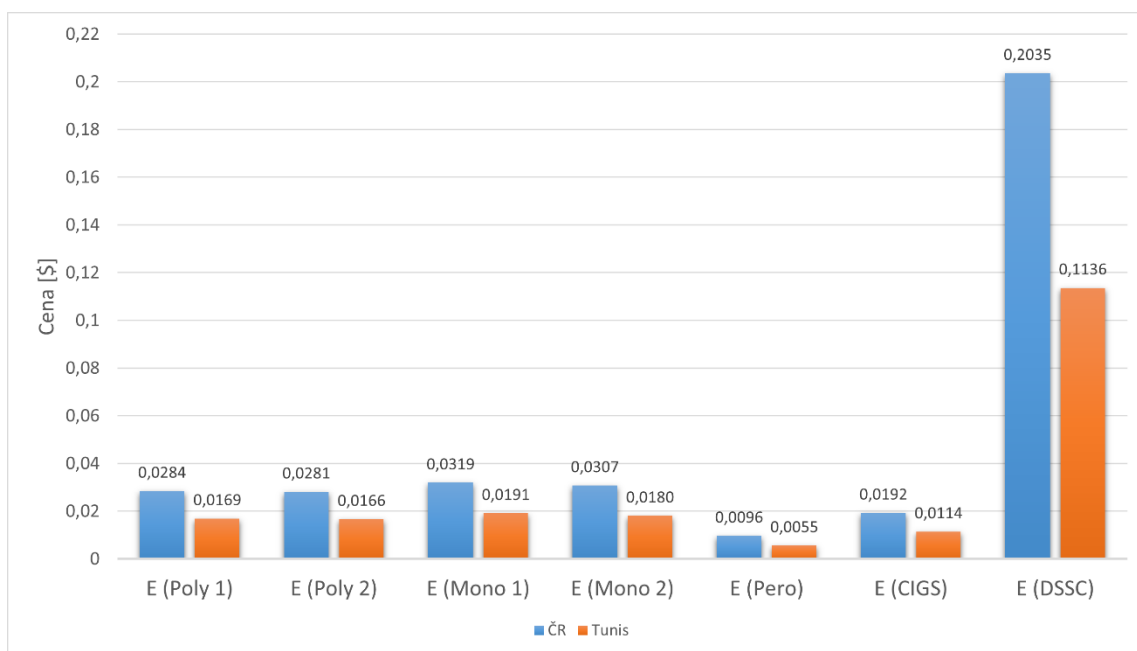
Obrázek 15: Ukázka nejkratšího dne roku 2020 v Tunisku

Obrázek 14 ukazuje odlišný průběh panelu DSSC, který je způsoben nestabilitou těchto panelů při vysokých teplotách. V mém modelu dochází pouze ke snížení výroby, ale je možné, že by panel při těchto teplotách nemohl pracovat vůbec.

Obě lokality jsem následně porovnal z hlediska vyrobené energie za životnost (obr. 16) a z hlediska ceny za kWh vyrobené energie (obr. 17).

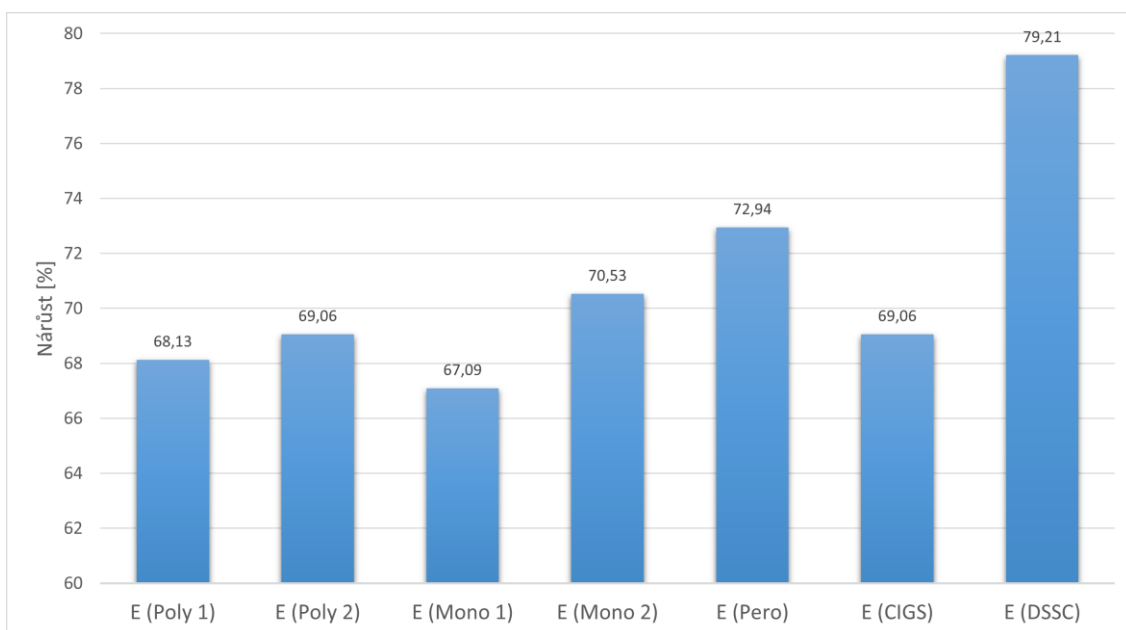


Obrázek 16: Porovnání vyrobené energie za životnost mezi dvěma lokacemi



Obrázek 17: Porovnání cen za kWh mezi dvěma lokacemi

Z obrázků 16 a 17 je vidět nárůst vyrobené energie a z toho se odvíjející nižší cenu za kWh v teplejší lokaci. Procentuální nárůst v teplejší lokaci je zobrazen na obrázku 18 ze kterého je možné usoudit, které panely se nejvíce vyplatí provozovat v tropičtějším lokalitách. Mezi panely opět vybočují DSSC panely, tentokrát ale v pozitivním smyslu, jelikož jejich unikátní teplotní koeficient přináší v teplejších lokalitách největší výhody. Za zmínku také stojí perovskitové panely, které díky svému nízkému teplotnímu koeficientu ve srovnání s ostatními panely dosahují lepších výsledků v teplejších klimatických podmínkách. Je sice pravda, že v teplejší lokalitě dochází k velkému nárůstu výroby, ale je třeba vzít v úvahu i další faktory, jako je větší riziko poruch z důvodu přehřátí a potenciálně vyšší náklady na údržbu a chlazení panelů.



Obrázek 18 Porovnání zvýšení výroby v teplejší lokaci

Porovnávání z hlediska výroby a z hlediska nákladů rozvíjejících se technologií fotovoltaiky oproti klasickým zavedeným technologiím fotovoltaiky, přineslo různorodé výsledky, avšak faktem je, že tyto nové technologie stále nedosahují množství vyrobené energie za životnost jako klasické panely. Hlavním důvodem těchto výsledků je jejich kratší životnost. Perovskitové panely mají však určitou perspektivu, jelikož jejich krátkou životnost kompenzuje nízká cena a nízký teplotní koeficient nabízí lepší uplatnění za vyšších teplot. CIGS panely se jeví také jako dobrá ekonomická alternativa ke klasickým zavedeným polykrystalickým a monokrystalickým fotovoltaickým panelům. DSSC panely se však v současné fázi vývoje jeví jako nevýhodné, avšak jejich stoupající účinnost s rostoucí teplotou nabízí slibné uplatnění v teplejších regionech, pokud dojde k vylepšení základních specifikací. Všechny tyto rozvíjející se technologie fotovoltaiky však sdílí mnohé benefity mimo výpočty. Jedním takovým benefitem je jejich menší hmotnost, která přináší mnohé potenciální výhody jako je například snadnější přeprava a instalace. Nižší hmotnost také otvírá nové možnosti umístění panelů a případně jejich umístění na dopravní prostředky. Další výhody nízké hmotnosti mohou přijít i za provozu, a to ve formě natáčení panelů podle pohybu slunce, které je pro lehčí panely proveditelnější a šetří další náklady. V teplejší klimatach je možné využít natáčení také k odstínění přehřátých panelů a zabránění tak možných poruch z přehřátí. Další benefitem může být například i jejich flexibilita, která nelimituje instalaci pouze na rovné plochy.

6.2 Zhodnocení výroby vybraných fotovoltaických technologií v prostředí Evropy

Uvažování masové výroby v prostředí evropské unie pro DSSC solární panely je z důvodů nízkých účinností a krátké životnosti spojené s vysokými náklady v tuto chvíli nevhodné. To se však nedá říct o perovskitových a CIGS solárních panelech jejichž masová výroba již začala, a to nejen ve světě, ale i přímo v prostředí Evropy.

Perovskitová krystalová struktura byla poprvé objevena jako přirozeně se vyskytující minerál oxid vápenatý (CaTiO_3). Ložiska tohoto minerálu mohou být nalezeny po celém světě a co se týče Evropy jsou evidována naleziště v Německu, Norsku a České republice (u města Nové lesy v Královéhradeckém kraji [116]) [117]. Perovskity používané v solárních článcích však není nutné těžit ze země. Perovskit je jakýkoli materiál s krystalovou strukturou podle vzorce ABX_3 . Kde "A" a "B" jsou dva kladně nabití ionty, často různé velikosti, a X je záporně nabitý ion. Vědci si uvědomili, že mohou vytvořit rozmanitou řadu uměle vyrobených perovskitových krystalů, které se řídí stejným uspořádáním a mají velmi užitečné vlastnosti.[118][119]

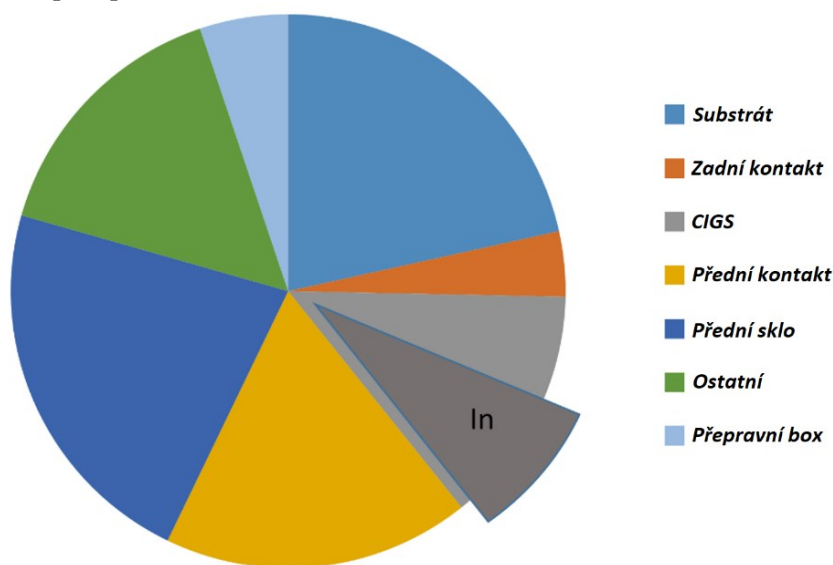
Výroba perovskitových solárních panelů nedávno dosáhla důležitého milníku, kterým bylo otevření první průmyslové výroby perovskitových panelů na světě. Jedná se o společnost Saule Technologies, která zahájila svoji výrobu v polské Vratislavi v první polovině roku 2021. Společnost syntetizuje své perovskitové inkousty v laboratoři ze snadno dostupných a levných substrátů. Které jsou dále používány pro tisk solárních článků. Tato jednoduchost ve zpracování spolu s tolerancí vůči vnitřním defektům je výhodná oproti nákladným, několikasupňovým procesům tradičních křemíkových článků, které se provádějí při vysokých teplotách ($>1000\text{ }^\circ\text{C}$) ve vysokém vakuu a ve speciálních čistých prostorách. Zatímco hybridní organicko-anorganický perovskitový materiál lze vyrábět jednoduššími technikami v tradičním laboratorním prostředí. Zpracovávání při teplotách okolního vzduchu do $120\text{ }^\circ\text{C}$ navíc násobně snižuje uhlíkovou stopu v porovnání s křemíkovými solárními články. V porovnání s křemíkovými solárními články je také nutno zmínit, že k pohlcení veškerého slunečního

světla je spotřebováno u perovskitových článků mnohem méně materiálu. Další výhodou tisku solárních článků je velká flexibilita a skvělá škálovatelnost výrobního procesu s relativně malými náklady. Tato výrobní infrastruktura je navíc poměrně jednoduchá. Stroje se snadno servisují a snadno se k nim dodávají náhradní díly, což vytváří velmi ekonomicky výhodný proces. Tato firma je proto dobrou reprezentací proveditelnosti výroby perovskitových solárních panelů v evropských podmínkách.[118][119][120]

CIGS solární panely mají oproti perovskitovým solárním panelům náskok, neboť největší výrobce Solar Frontier se sídlem v Japonsku má v současnosti roční výrobní kapacitu 1 GW. V současné době také probíhají rozsáhlé investice do výroby CIGS ze strany významných energetický a průmyslových subjektů, a to především v Číně.[121]

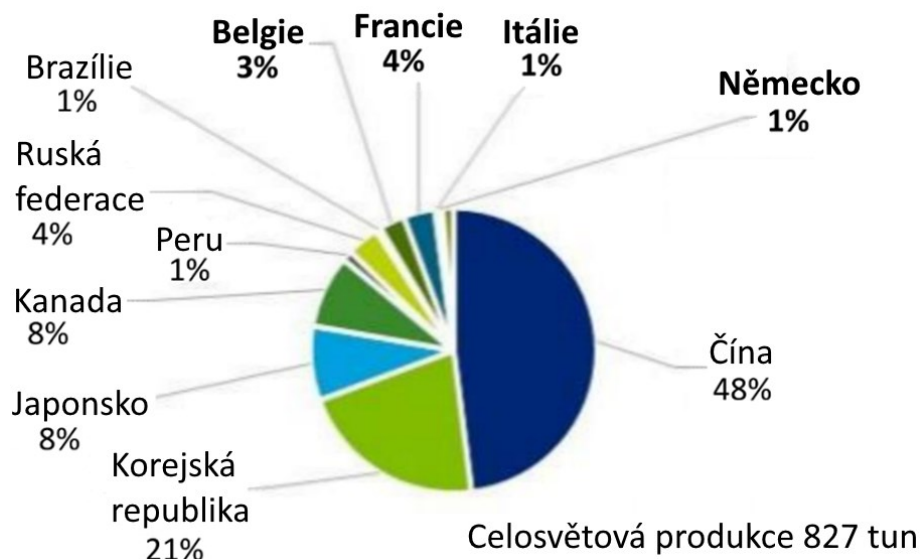
Evropské společnosti se prozatím věnovali spíše výzkumu a dodávání výrobních zařízení což, ale na druhou stranu vede k jejich bezkonkurenční odborné znalosti v oblasti nástrojů pro CIGS a klíčových výrobních procesů. Mnohé z těchto společností v současné době dodávají a profitují z výrobního cyklu CIGS, který dnes probíhá v Číně. Tito evropští technologové vyvíjejí procesy, které lze označit jako výrobní procesy nové generace CIGS pro nanášení a zpracování polovodičové vrstvy, které jsou příslibem budoucího snižování nákladů. V zemích, jako je Německo, Francie, Švýcarsko, Nizozemsko, Švédsko a Španělsko, existuje bezkonkurenční síť výzkumných ústavů a snah v oblasti CIGS, což z Evropy činí přední mezinárodní centrum vývoje technologie CIGS. Když se tyto základní odborné znalosti spojí se zavedenou sítí dodavatelů vyspělých výrobních zařízení, vznikne v Evropě ideální ekosystém pro vývoj technologie CIGS a tento laboratorní vývoj je pak snadno přenositelný do strojů a řešení pro velkovýrobu. Zpětná vazba od místních výrobců s obousměrným sdílením znalostí mezi laboratoří a výrobním závodem by mohla dále posílit vedoucí postavení Evropy v oblasti technologie CIGS. Evropa je připravena zaujmout vedoucí postavení v zavádění decentralizované, konkurenceschopné a energeticky účinné výroby CIGS a dodávek strojů pro nové globální energetické hospodářství.[121][122]

Stěžejní prvek potřebný pro výrobu CIGS panelů je indium (obr.19). Indium se na nákladech CIGS panelů podílí v 7 %, avšak inovační cesty ke snížení potřeby india na jednotku výkonu jsou k dispozici.[123]



Obrázek 19: Zobrazení zastoupení india v CIGS solárních panelech [123]

V současné době je světová produkce india koncentrována skoro z 50 % v Číně, zatímco v EU se nachází přibližně 10% produkce viz. Obrázek 20. Produkce india v Evropě je dostatečná pro výrobu více než 100 GW fotovoltaických panelů ročně s potenciálem řešit výzvy v podobě až TW roční výroby nákladově efektivním způsobem.[123]



Obrázek 20: Zobrazení světové produkce india [123]

Dalším důležitým prvkem pro výrobu CIGS panelů je selen, které má také největší produkci v Číně těsně následovanou Japonskem. Třetí největší produkce selenu se však už nachází v Evropě a to v Německu a spolu s Belgií, Finskem, Švédskem, Polskem a Tureckem obsazují šest příček v deseti největších světových produkcích selenu na světě.[124][125]

Galium je v porovnání z předchozími prvky zapotřebí méně ale stále se jedná o nezbytný prvek, který má opět největší produkci v Číně. V Evropě se nachází dva ze čtyř hlavních producentů galia, a to Německo a Ukrajina. Mezi další evropské producenty patří také Maďarsko a Slovensko. [126]

Pro CIGS panely také nezbytná měď. Mezi přední producenty mědi se řadí pouze jedna evropská země, a to Polsko s dalšími producenty například ve Španělsku nebo Švédsku. V součtu by se pak evropská produkce rovnala přibližně 5 % té světové. [127]

7. Závěr

Rešeršní část práce se zabývá využitím a výzkumem nanotechnologií v celém energetickém sektoru. Nejprve bylo uvedeno využití nanotechnologií v získávání energie s hlavním důrazem na obnovitelné zdroje. Dále byly popsány využití nanotechnologií pro skladování (akumulaci) elektrické energie. Práce pokračuje využitím nanotechnologií pro distribuci energie. Nakonec byly popsány některé metody využití nanotechnologií pro snížení spotřeby energie.

Nanotechnologie jsou stále v rané fázi vývoje, stejně jako jejich integrace do energetického sektoru, proto je v jednotlivých kapitolách většina přístupů a aplikací stále ve fázi výzkumu. Z tohoto důvodu, spolu s neexistující sériovou výrobou jednotlivých nanomateriálů, je komerční ohodnocení také velmi problematické, některé oblasti však vypadají velmi slibně.

V krátkodobém horizontu budou mít nanotechnologie pravděpodobně největší dopad v oblastech fotovoltaiky a skladování energie, kde se nanotechnologie již používají k vylepšení stávajících a podílejí se na vývoji mnoha nových druhů panelů a baterií. Co se týče výroby elektřiny tak za zmínku také stojí použití uhlíkových nanotrubiček k výrobě lopatek větrných elektráren, které jsou delší, pevnější a lehčí než ostatní lopatky. Dalším odvětvím, ve kterém se nabízí slibné uplatnění nanotechnologií, je ukládání energie do vodíku a jeho následná přeměna na elektřinu. Významným přínosem pro energetiku se zdá být také využití uhlíkových nanotrubiček při výrobě vodičů a kabelů, které budou mít mnohem nižší odpor než vysokonapěťové vodiče používané v současnosti v elektrické síti, a sníží tak energetické i ekonomické ztráty při přenosu energie.

Přes všechny benefity je však třeba brát v úvahu recyklaci a dopad na životní prostředí, které není plně prozkoumáno a nepříznivé výsledky by mohli adopci nanotechnologií v energetice zkomplikovat.

Praktická část se zaměřila na nanotechnologie ve fotovoltaice, konkrétně na tři druhy panelů vyrobených nanotechnologickými přístupy. Konkrétně se jedná o panely z perovskitu, z kombinace mědi, india, galia a selenu (CIGS) a barvivem senzitivované panely (DSSC). Tyto panely byly porovnávány na základě několika parametrů (účinnost, životnost, ...) s klasickými zavedenými panely ve dvou výpočtových modelových lokalitách. Z výsledků je zřejmé, že tyto nové technologie stále nemohou konkurovat klasickým ve vyrobené energii za životnost, a to i navzdory tomu že se účinnosti začínají pohybovat v podobných hodnotách. Tento nedostatek je hlavně zapříčiněn stále krátkými životnostmi. Další porovnání bylo provedeno v ceně za kWh. Zde se opět jeví DSSC panely velmi špatně, což jednoznačně podtrhuje nepřipravenost této technologie ke komerčnímu využití. Avšak zbylé dvě technologie se naopak v této kategorii jeví velmi slibně a ekonomicky překonávají jakékoliv klasické technologie v obou lokalitách.

Na konec došlo k zhodnocení výroby těchto panelů v prostředí Evropy. Realizovatelnost výroby perovskitových panelů byla potvrzena už roku 2021 první světovou výrobou v Polsku. Co se týče výroby CIGS panelů, tak i ta již probíhá ve světě, a to na strojích, které často pocházejí z Evropy. Výroba v Evropě je tedy pouze brzděná přístupností nerostných surovin, které oproti státům jako Čína není příliš přívětivé, avšak výroba v řádu desítek GW ročně je v tuto chvíli proveditelná s možnostmi budoucího nárůstu až na stovky GW ročně.

8. Zdroje

- [1] Nanotechnology as a Tool for Enhanced Renewable Energy Application in Developing Countries n.d. <https://www.longdom.org/open-access/nanotechnology-as-a-tool-for-enhanced-renewable-energy-application-in-developing-countries-2090-4541-1000e113.pdf> (accessed April 5, 2022).
- [2] Nikolaidou K, Sarang S, Ghosh S. Nanostructured photovoltaics. *Nano Futur* 2019;3:012002. <https://doi.org/10.1088/2399-1984/AB02B5>.
- [3] Solar Cells | Nanotechnology in Solar Cells n.d. <https://www.understandingnano.com/solarcells.html> (accessed November 28, 2021).
- [4] Application of Nanotechnologies in the Energy Sector n.d. https://redaktion.hessen-agentur.de/publication/2019/NanoEnergy_2015_E_WEB.pdf (accessed October 15, 2021).
- [5] Tahir MB, Sohaib M, Sagir M, Rafique M. Role of Nanotechnology in Photocatalysis. *Ref Modul Mater Sci Mater Eng* 2020:578–89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00006-1>.
- [6] Ghasemzadeh F, Shayan ME. Nanotechnology in the Service of Solar Energy Systems. *Nanotechnol Environ* 2020. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.93014>.
- [7] CIGS Thin-Film Photovoltaics – The time to invest is now! n.d. <https://cigs-pv.net/> (accessed April 7, 2022).
- [8] Perovskite Solar Cells: The Future of Energy | by Sabeeh Hassany | Medium n.d. <https://medium.com/@sabeehhassany/perovskite-solar-cells-the-future-of-energy-75e8c1f9488a> (accessed April 7, 2022).
- [9] Semi-transparent dye-sensitized solar module with 8.7% efficiency – pv magazine International n.d. <https://www.pv-magazine.com/2020/12/11/semi-transparent-dye-sensitized-solar-module-with-8-7-efficiency/> (accessed April 7, 2022).
- [10] Chamsa-ard W, Brundavanam S, Fung CC, Fawcett D, Poinern G. Nanofluid Types, Their Synthesis, Properties and Incorporation in Direct Solar Thermal Collectors: A Review. *Nanomater* 2017, Vol 7, Page 131 2017;7:131. <https://doi.org/10.3390/NANO7060131>.
- [11] Arulmozhi P, Professor A. Experimental Analysis of Flat Plate Solar Water Heater using Cerium Oxide / Water Nano Fluid Under Forced Convection n.d. <https://www.ijert.org/research/experimental-analysis-of-flat-plate-solar-water-heater-using-cerium-oxide-water-nano-fluid-under-forced-convection-IJERTV6ISO60190.pdf> (accessed November 28, 2021).
- [12] Tiwari A, Ghosh P, Sarkar J. SOLAR WATER HEATING USING NANOFUIDS-A COMPREHENSIVE OVERVIEW AND ENVIRONMENTAL IMPACT ANALYSIS. Undefined 2013. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.414.4739&rep=rep1&type=pdf> (accessed November 28, 2021).
- [13] Nagarajan PK, Subramani J, Suyambazhahan S, Sathyamurthy R. Nanofluids for solar collector applications: A review. *Energy Procedia* 2014;61:2416–34. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2014.12.017>.
- [14] Nanotechnology in Thermoelectric Devices n.d. <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3148> (accessed December 5, 2021).

- [15] Nanotube Thermocells Hold Promise as Energy Source n.d. <https://www.understandingnano.com/nanotube-thermocells.html> (accessed December 5, 2021).
- [16] Nugraha MI, Kim H, Sun B, Haque MA, de Arquer FPG, Villalva DR, et al. Low-Temperature-Processed Colloidal Quantum Dots as Building Blocks for Thermoelectrics. *Adv Energy Mater* 2019;9. <https://doi.org/10.1002/AENM.201803049>.
- [17] Hussein AK. Applications of nanotechnology in renewable energies—A comprehensive overview and understanding. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;42:460–76. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.10.027>.
- [18] Abdalla AM, Hossain S, Azad AT, Petra PMI, Begum F, Eriksson SG, et al. Nanomaterials for solid oxide fuel cells: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;82:353–68. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.046>.
- [19] Nanoengineering of New Generation Small Fuel Cells n.d. http://nanohour.beckman.illinois.edu/Nanohour/Announcements_files/flyer 2-10-2010.pdf (accessed December 5, 2021).
- [20] Nanotechnology in Fuel Cells n.d. <https://www.understandingnano.com/fuel-cells.html> (accessed December 5, 2021).
- [21] UnderstandingNano n.d. <https://www.understandingnano.com/platinum-nanoparticles-catalysis.html> (accessed December 5, 2021).
- [22] Scientists Boost Catalytic Activity for Key Chemical Reaction in Fuel Cells n.d. <https://www.understandingnano.com/nanoplate-catalyst-fuel-cells.html> (accessed December 5, 2021).
- [23] Improved catalyst for fuel cells demonstrated using platinum-cobalt nanoparticles in ordered array n.d. <https://www.understandingnano.com/fuel-cell-catalyst-platinum-cobalt-nanoparticles.html> (accessed December 5, 2021).
- [24] Particle Proximity Effect on Platinum-Catalyst n.d. <https://www.understandingnano.com/particle-proximity-effect-platinum-catalyst.html> (accessed December 5, 2021).
- [25] Can cobalt-graphene catalyst beat platinum? n.d. https://www.understandingnano.com/cobalt-graphene_catalyst.html (accessed December 5, 2021).
- [26] Jeon I-Y, Choi H-J, Choi M, Seo J-M, Jung S-M, Kim M-J, et al. Facile, scalable synthesis of edge-halogenated graphene nanoplatelets as efficient metal-free electrocatalysts for oxygen reduction reaction. *Sci Rep* 2013;3:1810. <https://doi.org/10.1038/SREP01810>.
- [27] Ahmadi MH, Ghazvini M, Nazari MA, Ahmadi MA, Pourfayaz F, Lorenzini G, et al. Renewable energy harvesting with the application of nanotechnology: A review. *Int J Energy Res* 2019;43:1387–410. <https://doi.org/10.1002/ER.4282>.
- [28] Kim J, Lim D. Reduction of radar interference - Stealth wind blade structure with carbon nanocomposite sheets. *Wind Energy* 2014;17:451–60. <https://doi.org/10.1002/WE.1587>.
- [29] Gao L, Hu H. Wind turbine icing characteristics and icing-induced power losses to utility-scale wind turbines. *Proc Natl Acad Sci* 2021;118:e2111461118. <https://doi.org/10.1073/PNAS.2111461118>.

- [30] Nano-thermal Coatings Enhance the Efficiency of Wind Farms by 25% | STATNANO n.d. <https://statnano.com/news/66386/Nano-thermal-Coatings-Enhance-the-Efficiency-of-Wind-Farms-by-25-> (accessed October 30, 2021).
- [31] Panduranga R, Alamoudi Y, Ferrah A. Nanoengineered Composite Materials for Wind Turbine Blades. 2019 Adv Sci Eng Technol Int Conf ASET 2019 2019. <https://doi.org/10.1109/ICASET.2019.8714217>.
- [32] Abdalla AM, Elnaghi BE, Hossain S, Dawood D, Abdelrehim O, Azad AK. Nanotechnology Utilization in Energy Conversion, Storage and Efficiency: a Perspective Review. Adv Energy Convers Mater 2020;30–54. <https://doi.org/10.37256/AECM.11202075>.
- [33] Bhanja P, Bhaumik A. Porous nanomaterials as green catalyst for the conversion of biomass to bioenergy. Fuel 2016;185:432–41. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2016.08.004>.
- [34] Xue J, Dou G, Ziade E, Goldfarb JL. Integrating sustainable biofuel and silver nanomaterial production for in situ upgrading of cellulosic biomass pyrolysis. Energy Convers Manag 2017;142:143–52. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.03.001>.
- [35] Bharati R, Suresh S. A Review on Nano-catalyst from Waste for Production of Biofuel-Via-Bioenergy 2017:25–32. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47257-7_3.
- [36] Sajith V, Sobhan CB, Peterson GP. Experimental Investigations on the Effects of Cerium Oxide Nanoparticle Fuel Additives on Biodiesel: [Http://DxDoiOrg/101155/2010/581407](http://DxDoiOrg/101155/2010/581407) 2010;2010. <https://doi.org/10.1155/2010/581407>.
- [37] Wen L, Wang Y, Lu D, Hu S, Han H. Preparation of KF/CaO nanocatalyst and its application in biodiesel production from Chinese tallow seed oil. Fuel 2010;9:2267–71. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2010.01.028>.
- [38] Tilala H, Savaliya H, Kotadia D, Dharaskar S, Shah M. Developments and Future Insights of Using Nanofluids for Heat Transfer Enhancements in Geothermal Systems. PROCEEDINGS n.d.;46. <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2021/Tilala.pdf> (accessed September 5, 2021).
- [39] Mohammed Bin Rashid Initiative for Global Prosperity n.d. <https://makingprosperity.com/solutions-details/geothermal-energy-and-nanotechnology> (accessed September 2, 2021).
- [40] Bhattacharjee I, Enhanced DM-NT and D for, 2021 U. Nanotools and nanodevices in geothermal energy. Elsevier n.d. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128217092000220> (accessed September 5, 2021).
- [41] Nanotech Could Boost Geothermal Power and Reduce Earthquake Risk n.d. <https://www.popsci.com/scitech/article/2009-07/nanotech-could-boost-geothermal-power/> (accessed March 6, 2022).
- [42] Khanal LR, Sundararajan JA, Qiang Y. Advanced Nanomaterials for Nuclear Energy and Nanotechnology. Energy Technol 2020;8:1901070. <https://doi.org/10.1002/ENTE.201901070>.
- [43] Nuclear Power and Nanomaterials: Big Potential for Small Particles – Federation Of American Scientists n.d. <https://fas.org/pir-pubs/nuclear-power-nanomaterials-big-potential-small-particles/> (accessed December 28, 2021).

- [44] Power Research Institute E. STRATEGIC DRIVERS Water Resource Management Long-Term Operations INNOVATION TARGETS • Reduce freshwater withdrawal and consumption • Minimize cost-performance penalties associated with current water-conserving technologies 2012. <http://mydocs.epri.com/docs/publicmeetingmaterials/6-11-2012/Nanocooling-Fact-Sheet.pdf> (accessed December 28, 2021).
- [45] Nanotech + nuclear = more electricity | MIT Energy Initiative n.d. <https://energy.mit.edu/news/nanotech-nuclear-more-electricity/> (accessed December 28, 2021).
- [46] How does nanotechnology address problems in the environment? | Innovationsgesellschaft mbH n.d. <https://innovationsgesellschaft.ch/en/how-does-nanotechnology-address-problems-in-the-environment/> (accessed December 28, 2021).
- [47] Carbon Dioxide n.d. <https://www.understandingnano.com/nanotechnology-carbon-dioxide.html> (accessed December 28, 2021).
- [48] Fuel - Nanotechnology n.d. <https://www.understandingnano.com/fuel.html> (accessed December 28, 2021).
- [49] Rice U. formula could make fuel manufacturing better, greener n.d. <https://www.understandingnano.com/nanocatalyst-tunsten-oxide.html> (accessed December 28, 2021).
- [50] Zeng XX, Xu YT, Yin YX, Wu XW, Yue J, Guo YG. Recent advances in nanostructured electrode-electrolyte design for safe and next-generation electrochemical energy storage. *Mater Today Nano* 2019;8:100057. <https://doi.org/10.1016/J.MTNANO.2019.100057>.
- [51] Lu J, Chen Z, Ma Z, Pan F, Curtiss LA, Amine K. The role of nanotechnology in the development of battery materials for electric vehicles 2016. <https://doi.org/10.1038/NNANO.2010.207>.
- [52] Bhatnagar A, Tripathi M, Shalu, Prajapati A. Nanotechnology for Batteries 2022:29–48. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6022-1_2.
- [53] Nanotechnology in Batteries (Nano Battery) n.d. <https://www.understandingnano.com/batteries.html> (accessed October 16, 2021).
- [54] TruSpin Announces Breakthrough in Battery Technology n.d. <https://www.understandingnano.com/li-ion-silicon-nanofiber-anode.html> (accessed October 16, 2021).
- [55] Spontaneous Formation of Nanoscale Hollow Structures Could Boost Battery Storage n.d. <https://www.understandingnano.com/nanoscale-hollow-structures.html> (accessed October 16, 2021).
- [56] High-performance Anode for All-solid-state Li Batteries is Made of Si Nanoparticles n.d. <https://www.understandingnano.com/solid-state-battery-si-nanoparticles.html> (accessed October 16, 2021).
- [57] UnderstandingNano n.d. <https://www.understandingnano.com/antimony-nanochain-battery.html> (accessed October 16, 2021).
- [58] Nanotubes may give the world better batteries n.d. <https://www.understandingnano.com/carbon-nanotubes-lithium-metal-battery.html> (accessed October 16, 2021).

- [59] Roselin LS, Juang RS, Hsieh C Te, Sagadevan S, Umar A, Selvin R, et al. Recent Advances and Perspectives of Carbon-Based Nanostructures as Anode Materials for Li-ion Batteries. *Materials (Basel)* 2019;12. <https://doi.org/10.3390/MA12081229>.
- [60] Wong K, Dia S. Nanotechnology in Batteries. *J Energy Resour Technol Trans ASME* 2017;139. <https://doi.org/10.1115/1.4034860/384996>.
- [61] Nanotechnology Solves Flow Batteries' Sticky Problem n.d. <https://blog.teamtrade.cz/nanotechnology-solves-flow-batteries-sticky-problem/> (accessed October 16, 2021).
- [62] Xu Z, Xiao W, Zhang K, Zhang D, Wei H, Zhang X, et al. An advanced integrated electrode with micron- and nano-scale structures for vanadium redox flow battery. *J Power Sources* 2020;450:227686. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2019.227686>.
- [63] Enhancing hybrid flow batteries with graphene n.d. <https://www.nanowerk.com/nanotechnology-news2/newsid=57100.php> (accessed October 17, 2021).
- [64] González A, Goikolea E, Barrena JA, Mysyk R. Review on supercapacitors: Technologies and materials. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;58:1189–206. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.12.249>.
- [65] Demming A. Supercapacitors empower sustainable energy storage. *Nanotechnology* 2016;27:250201. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/25/250201>.
- [66] Dubey R, Guruviah V. Review of carbon-based electrode materials for supercapacitor energy storage. *Ionics* 2019 254 2019;25:1419–45. <https://doi.org/10.1007/S11581-019-02874-0>.
- [67] Munkholt J, Vang P, Degn A. Chemical energy storage 2013:47–52. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/60269108/DTU_International_Energy_Report_2013.pdf (accessed October 23, 2021).
- [68] Niemann MU, Srinivasan SS, Phani AR, Kumar A, Goswami DY, Stefanakos EK. Nanomaterials for hydrogen storage applications: A review. *J Nanomater* 2008;2008. <https://doi.org/10.1155/2008/950967>.
- [69] Improvement of Hydrogen Storage with Nanomaterials - Nanografi Nano Technology n.d. <https://nanografi.com/blog/improvement-of-hydrogen-storage-with-nanomaterials-ed328c/> (accessed January 31, 2022).
- [70] Nanomaterials for Hydrogen Storage n.d. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12045-007-0047-9> (accessed January 31, 2022).
- [71] Zhevago NK. Other methods for the physical storage of hydrogen. *Compend Hydrog Energy* 2016:189–218. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00008-0>.
- [72] Yousif E. Recent Development Issues in Nanotechnology for Gas Storage. *Arch Nanomedicine Open Access J* 2018;1. <https://doi.org/10.32474/ANOAJ.2018.01.000121>.
- [73] Gold nanoparticles shown to be very efficient at photocatalytic hydrogen generation n.d. <https://www.understandingnano.com/gold-nanoparticles-photocatalytic-hydrogen-production.html> (accessed October 23, 2021).

- [74] Abdalla AM, Elnaghi BE, Hossain S, Dawood D, Abdelrehim O, Azad AK. Nanotechnology Utilization in Energy Conversion, Storage and Efficiency: a Perspective Review. *Adv Energy Convers Mater* 2020;30–54. <https://doi.org/10.37256/AECM.11202075>.
- [75] Rimpel A, Krueger K, Wang Z, Li X, Palazzolo A, Kavosi J, et al. Mechanical energy storage. *Therm Mech Hybrid Chem Energy Storage Syst* 2021;139–247. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819892-6.00004-6>.
- [76] Ertz G, Twiefel J, Krack M. Feasibility Study for Small Scaling Flywheel-Energy-Storage Systems in Energy Harvesting Systems. *Energy Harvest Syst* 2014;1:233–41. <https://doi.org/10.1515/EHS-2013-0010>.
- [77] CNT bundle material for flywheels 40 times better than batteries | NextBigFuture.com n.d. <https://www.nextbigfuture.com/2018/10/cnt-bundle-material-for-flywheels-40-times-better-than-batteries.html> (accessed January 30, 2022).
- [78] Yousefi R, Mahmoudian MR. The use of nanotechnology in preventing corrosion of metal pipe and equipment of Shahid Abbaspour Dam . *J Dam Hydroelectr Powerpl* 2019;6:31–7. <http://journal.hydropower.org.ir/article-1-306-en.html> (accessed October 24, 2021).
- [79] Havel TF. A MODULAR , THERMALLY CLOSED , ADSORPTION-ENHANCED COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE SYSTEM 2013. <https://briefs.techconnect.org/papers/adsorption-enhanced-compressed-air-energy-storage-2/> (accessed January 30, 2022).
- [80] Kalaiselvam S, Parameshwaran R. Nanotechnology in Thermal Energy Storage. *Therm Energy Storage Technol Sustain* 2014;163–202. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417291-3.00008-6>.
- [81] A review of nanomaterial incorporated phase change materials for solar thermal energy storage - ScienceDirect n.d. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X2100712X> (accessed January 29, 2022).
- [82] Echiegu EA. Nanotechnology as a Tool for Enhanced Renewable Energy Application in Developing Countries 2016. <https://doi.org/10.4172/2090-4541.1000e113>.
- [83] Anl. Potential Impacts of Nanotechnology on Energy Transmission Applications and Needs Environmental Science Division n.d. https://corridoreis.anl.gov/documents/docs/technical/APT_60861_EVS_TM_08_3.pdf (accessed December 4, 2021).
- [84] Mitigation of Power Problems through Nanotechnology | Electrical India Magazine on Power & Electrical products, Renewable Energy, Transformers, Switchgear & Cables n.d. <https://www.electricalindia.in/mitigation-of-power-problems-through-nanotechnology/> (accessed December 4, 2021).
- [85] Deshmukh SS Katariya PG. Nanotechnology Applications In The Energy Sector. *Int J Adv Res Technol* 2013;2. <http://www.ijoart.org/docs/Nanotechnology-Applications-In-The-Energy-Sector.pdf> (accessed December 4, 2021).
- [86] Khan D, Ali M, Muddassir Khan A, Ali M. Significances, possibilities and challenges of developing power transmission line conductors from carbon nanotubes. *Mater Today Proc* 2022;56:1478–83. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.12.358>.

- [87] Ephraim Sd, Satish N. Use of Nanotechnology in Reduction of Friction and Wear. *Int J Innov Res Adv Eng* 2014;1. <http://www.ijirae.com/volumes/vol1/issue8/SPNT10080.01.pdf> (accessed December 28, 2021).
- [88] (PDF) Application of Nanomaterials in Lubricants n.d. https://www.researchgate.net/publication/343648334_Application_of_Nanomaterials_in_Lubricants (accessed December 28, 2021).
- [89] Nanomaterials Enable Passive Dual-Mode Heating and Cooling Device n.d. <https://www.understandingnano.com/nanoparticles-dual-mode-heating-cooling.html> (accessed December 28, 2021).
- [90] Nanotechnology as a Tool for Enhanced Renewable Energy Application in Developing Countries n.d. <https://www.longdom.org/open-access/nanotechnology-as-a-tool-for-enhanced-renewable-energy-application-in-developing-countries-2090-4541-1000e113.pdf> (accessed December 28, 2021).
- [91] Nanotechnology: Major Manufacturing Advances at a Very Small Scale | Department of Energy n.d. <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/nanotechnology-major-manufacturing-advances-very-small-scale> (accessed December 28, 2021).
- [92] JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission n.d. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ (accessed March 24, 2022).
- [93] Účinnost FV panelu jaká je roční účinnost FV systému ? n.d. http://users.fs.cvut.cz/tomas.matuska/wordpress/wp-content/uploads/2020/04/AZE2-P7_FV_produkce_FVT_panely.pdf (accessed April 20, 2022).
- [94] Zjednodušený bilanční výpočet ročních přínosů fotovoltaických instalací - TZB-info n.d. <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/13878-zjednoduseney-bilancni-vypocet-rocnich-prinosu-fotovoltaickych-instalaci> (accessed April 20, 2022).
- [95] Standard test conditions - wiki.openmod-initiative.org n.d. https://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Standard_test_conditions (accessed March 24, 2022).
- [96] Cornaro C, Renzi L, Pierro M, Di Carlo A, Guglielmotti A. Thermal and Electrical Characterization of a Semi-Transparent Dye-Sensitized Photovoltaic Module under Real Operating Conditions. *Energies* 2018, Vol 11, Page 155 2018;11:155. <https://doi.org/10.3390/EN11010155>.
- [97] Sharma K, Sharma V, Sharma SS. Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status. *Nanoscale Res Lett* 2018 131 2018;13:1–46. <https://doi.org/10.1186/S11671-018-2760-6>.
- [98] Kim JH, Moon KJ, Kim JM, Lee D, Kim SH. Effects of various light-intensity and temperature environments on the photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells. *Sol Energy* 2015;113:251–7. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.01.012>.
- [99] Pharma D, Aboulouard A, Jouaiti A, Elhadadi B. ISSN 0975-413X CODEN (USA): PCHHAX Modelling and Simulation of the Temperature Effect in Dye Sensitized Solar Cells 2017;9:94–9. <https://www.derpharmachemica.com/pharma-chemica/modelling-and-simulation-of-the-temperature-effect-in-dye-sensitized-solar-cells.pdf> (accessed April 27, 2022).

- [100] Produkt UlicaSolar 275Wp - polykrystalický solární panel - solarsun.cz n.d. <https://www.solarsun.cz/ulicasolar-285wp-polykrystalicky-solarni-panel/> (accessed March 11, 2022).
- [101] Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels | American Solar Energy Society n.d. <https://ases.org/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/> (accessed March 11, 2022).
- [102] What Is The Average Cost Of Solar Panels – Forbes Advisor n.d. <https://www.forbes.com/advisor/home-improvement/average-cost-of-solar-panels/> (accessed March 12, 2022).
- [103] 450W High Power Mono Facial Mono Perc Module Canadian Solar Hiku - China Monofacial, Solar Panel | Made-in-China.com n.d. <https://m.made-in-china.com/product/450W-High-Power-Mono-Facial-Mono-Perc-Module-Canadian-Solar-Hiku-1951259845.html> (accessed March 11, 2022).
- [104] Solar CoLtd C. CS3W-430|435|440|445|450P n.d. www.csisolar.com, (accessed March 11, 2022).
- [105] Fotovoltaický solární panel Yingli YL 265C, 265 Wp / Fotovoltaické panely / Katalog produktů / Solární-Panely.CZ n.d. <http://solarni-panely.cz/katalog-produktu/fotovoltaicke-panely/fotovoltaicky-solarni-panel-yingli-yl-265c-265-wp> (accessed March 11, 2022).
- [106] SUNPOWER Solar panel MAXEON MAX3 400W | Alma Solar® Nr. 1 of online solar panels n.d. <https://www.alma-solarshop.com/solar-panels/1278-sunpower-solar-panel-maxeon-max3-400w.html> (accessed March 11, 2022).
- [107] SunPower 400 W MAXEON 3 | SunPower | Panely | Memodo n.d. <https://www.memodo.cz/sunpower-maxeon-3-400-watt> (accessed March 11, 2022).
- [108] Cai M, Wu Y, Chen H, Yang X, Qiang Y, Han L, et al. Cost-Performance Analysis of Perovskite Solar Modules. *Adv Sci* 2017;4:1600269. <https://doi.org/10.1002/ADVS.201600269>.
- [109] Jošt M, Lipovšek B, Glažar B, Al-Ashouri A, Brecl K, Matič G, et al. Perovskite Solar Cells go Outdoors: Field Testing and Temperature Effects on Energy Yield. *Adv Energy Mater* 2020;10:2000454. <https://doi.org/10.1002/AENM.202000454>.
- [110] Kobayashi E, Tsuji R, Martineau D, Hinsch A, Ito S. Light-induced performance increase of carbon-based perovskite solar module for 20-year stability. *Cell Reports Phys Sci* 2021;2:100648. <https://doi.org/10.1016/J.XCRP.2021.100648>.
- [111] Mobarak MH, Kleiman RN, Bauman J. Solar-Charged Electric Vehicles: A Comprehensive Analysis of Grid, Driver, and Environmental Benefits. *IEEE Trans Transp Electrif* 2021;7:579–603. <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.2996363>.
- [112] Amato A, Beolchini F. End-of-life CIGS photovoltaic panel: A source of secondary indium and gallium. *Prog Photovoltaics Res Appl* 2019;27:229–36. <https://doi.org/10.1002/PIP.3082>.
- [113] Prolonging the Lifetimes of Dye-Sensitized Solar Cells by Positioning Dyes – Chemical Science Blog n.d. https://blogs.rsc.org/sc/2020/05/19/prolonging-the-lifetimes-of-dye-sensitized-solar-cells-by-positioning-dyes/?doing_wp_cron=1647084694.5071671009063720703125 (accessed March 12, 2022).

- [114] Hug H, Bader M, Mair P, Glatzel T. Biophotovoltaics: Natural pigments in dye-sensitized solar cells. *Appl Energy* 2014;115:216–25.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.10.055>.
- [115] Solar Panel Degradation and The Lifespan of Solar Panels n.d.
<http://www.paradisolarenergy.com/blog/solar-panel-degradation-and-the-lifespan-of-solar-panels> (accessed March 24, 2022).
- [116] Dvůr Králové Sill, Nové Lesy, Bílá Třemešná, Trutnov District, Hradec Králové Region, Czech Republic n.d. <https://www.mindat.org/loc-345035.html> (accessed March 30, 2022).
- [117] Perovskite: Mineral information, data and localities. n.d. <https://www.mindat.org/min-3166.html> (accessed March 30, 2022).
- [118] Solar 3.0: This New Technology Could Change Everything - YouTube n.d.
https://www.youtube.com/watch?v=tQmFVcD-Mbo&ab_channel=ElectricFuture (accessed March 30, 2022).
- [119] Scientists Use Silicon-Perovskite to Boost Solar-Cell Efficiency | Electronic Design n.d.
<https://www.electronicdesign.com/technologies/alternative-energy/article/21199567/scientists-use-siliconperovskite-to-boost-solarcell-efficiency> (accessed March 30, 2022).
- [120] Technology – Saule Technologies n.d. <https://sauletech.com/technology/> (accessed March 30, 2022).
- [121] Solar Cell Technology - CIGS Solar Cells - Advancing Materials n.d.
<https://www.thermofisher.com/blog/materials/analyzing-a-fast-growing-solar-cell-technology-cigs-solar-cells/> (accessed March 30, 2022).
- [122] Download – CIGS Thin-Film Photovoltaics n.d. <https://cigs-pv.net/download/> (accessed March 31, 2022).
- [123] Indium Availability for CIGS thin-film solar cells in Europe – CIGS Thin-Film Photovoltaics n.d. <https://cigs-pv.net/indium-availability-for-cigs-thin-film-solar-cells-in-europe/> (accessed March 31, 2022).
- [124] Top 10 Selenium Producing Countries in the World - Insider Monkey n.d.
<https://www.insidermonkey.com/blog/top-10-selenium-producing-countries-in-the-world-850360/> (accessed March 31, 2022).
- [125] National Minerals Information Center U. SELENIUM (Data in metric tons of selenium content unless otherwise noted) n.d.
<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-selenium.pdf> (accessed March 31, 2022).
- [126] Gallium - MMTA n.d. <https://mmta.co.uk/metals/ga/> (accessed March 31, 2022).
- [127] Copper production in Europe | TheGlobalEconomy.com n.d.
https://www.theglobaleconomy.com/rankings/copper_production/Europe/ (accessed March 31, 2022).

Seznam obrázků

Obrázek 1: Ukázka skleněné keramiky dopované kovy vzácných zemin pro vzestupnou a sestupnou konverzi [4]	4
Obrázek 2: Důsledek samočisticí a antireflexní nanovrstvy [6]	5
Obrázek 3: Zobrazení dvou článků 3A: CIGS solární článek [7] 3B: Perovskite solární článek [8]	6
Obrázek 4: DSSC při ukázce průhlednosti [9]	7
Obrázek 5: Ukázka přijímacích trubic s nanovrstvou pro fototermální elektrárny.[4]	8
Obrázek 6: Ukázka nového energeticky účinného topného systému, který dokáže během několika sekund rozpustit led na větrných turbínách. Povlak z uhlíkových nanotrubiček zahřívá definované oblasti lopatek rotoru, jakmile integrované senzory zjistí námrazu.[4]	13
Obrázek 7: Ukázka struktury generátoru s podporou elektrizace kapalina-pevná látka. (A) Schematické znázornění nábojové vrstvy se dvěma vývody na zadní straně. (B) snímek polymerních nanodrátků na elektrifikační vrstvě. Měřítko je 1 μm . (C) Schematické zobrazení substrátem vyztuženého zařízení ve vodních vlnách [27].....	15
Obrázek 8: Graf pro srovnávající hustoty energie [60].....	22
Obrázek 9: Ukázka nanovrstvy, která vytváří samomazný povrch [61]	22
Obrázek 10: Energetické hustoty různých chemických látek pro skladování (na bázi nižší výhřevnosti) a bateriových technologií. (2013) [67].....	24
Obrázek 11: Ukázka rostoucího teplotního koeficientu DSSC panelů 11A Závislost teploty na výkonu [96] 11B Závislost teploty na procentuálním navýšení výkonu [97]	35
Obrázek 12: Ukázka nejdelšího dne roku 2020 v České republice.....	38
Obrázek 13: Ukázka nejkratšího dne roku 2020 v České republice.....	38
Obrázek 14: Ukázka nejdelšího dne roku 2020 v Tunisku	39
Obrázek 15: Ukázka nejkratšího dne roku 2020 v Tunisku	40
Obrázek 16: Porovnání vyrobené energie za životnost mezi dvěma lokacemi.....	40
Obrázek 17: Porovnání cen za kWh mezi dvěma lokacemi	41
Obrázek 18 Porovnání zvýšení výroby v teplejší lokaci	41
Obrázek 19: Zobrazení zastoupení india v CIGS solárních panelech [123]	43
Obrázek 20: Zobrazení světové produkce india [123]	44

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání panelů s daty převedenými na 1 m ²	36
Tabulka 2: Porovnání panelů s daty převedenými na 1 m ²	37
Tabulka 3: Porovnání výsledků v České republice	37
Tabulka 4: Porovnání výsledků v Tunisku.....	39

Seznam rovnic

Rovnice 1: Modifikovaná van't Hoffova rovnice.....	33
Rovnice 2: Rovnice pro konvekci vlivem větru.....	42
Rovnice 3: Rovnice pro výpočet teploty panelu.....	42
Rovnice 4: Rovnice pro výpočet aktuální účinnosti.....	43
Rovnice 5: Rovnice pro výpočet vyrobené energie.....	43