

Environmentální a ekonomické hodnocení nanomateriálů

(Environmental and Economic Assessment of Nanomaterials)

Marie Tichá¹ | Miroslav Žilka¹ | Barbora Stieberová¹ | Miroslav Prajer¹ | František Freiberg¹

INFORMACE O ČLÁNKU

DOI

10.3260/ENTECHO.2017.12.001

HISTORIE

Datum doručení: 25. 9. 2017

Datum revize: 23. 11. 2017

Datum akceptace: 1. 12. 2017

AFILACE

¹ ČVUT v Praze

Fakulta strojní

Obor ekonomie a management

Karlovo náměstí 13

CZ-112 35 Praha 2

KLÍČOVÁ SLOVA

LCA, LCC, fotokatalýza, nanomateriály, samočisticí nátěr

KEYWORDS

LCA, LCC, photocatalysis, nanomaterials, self cleaning coating

ABSTRAKT

Cílem tohoto článku je představit úkoly a hlavní výsledky řešení části mezinárodního projektu, který byl zaměřen na rozvoj udržitelné technologie výroby nanomateriálů prostřednictvím hydrotermální syntézy. Projekt byl podpořen v rámci 7. rámcového programu Evropskou komisí a řízen Univerzitou v Nottinghamu, na projektu se podílela univerzitní pracoviště a průmyslové subjekty napříč Evropou. Úlohou našeho týmu z Fakulty strojní ČVUT v Praze bylo posoudit environmentální a ekonomické aspekty nové technologie. V tomto článku jsou především charakterizovány dvě studie: LCA – posuzování životního cyklu a LCC – náklady životního cyklu, které umožňují vyhodnotit přínosy nové technologie v celém životním cyklu vybraných produktových aplikací nanočástic. Jedna studie je zaměřena na srovnání environmentálních a ekonomických dopadů fotokatalytických nátěrů s nanočásticemi TiO₂ a čističky vzduchu, druhá studie potom hodnotí přínosy aplikace ZnO nanočástic v samočisticích nátěrech.

ABSTRACT

This paper endeavors to present tasks and major findings from one part of an international project aimed at the development of sustainable technology for manufacturing nanomaterials through hydrothermal synthesis. The project, conducted under the European Commission's Seventh Framework Programme, was led by the University of Nottingham with the participation of university teams and industrial partners from across Europe. Our team from the Faculty of Mechanical Engineering at Czech Technical University in Prague assessed environmental and economic aspects of the new technology. This paper looks at two Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing studies that provide a basis for assessing the benefits of the new technology throughout the life cycle of the selected nanoparticle product applications. One study compares the environmental and economic impacts of a photocatalytic coating containing TiO₂ nanoparticles with those of a mechanical air purifier; the second evaluates benefits of applying ZnO nanoparticles in self-cleaning coatings.

1 Úvod

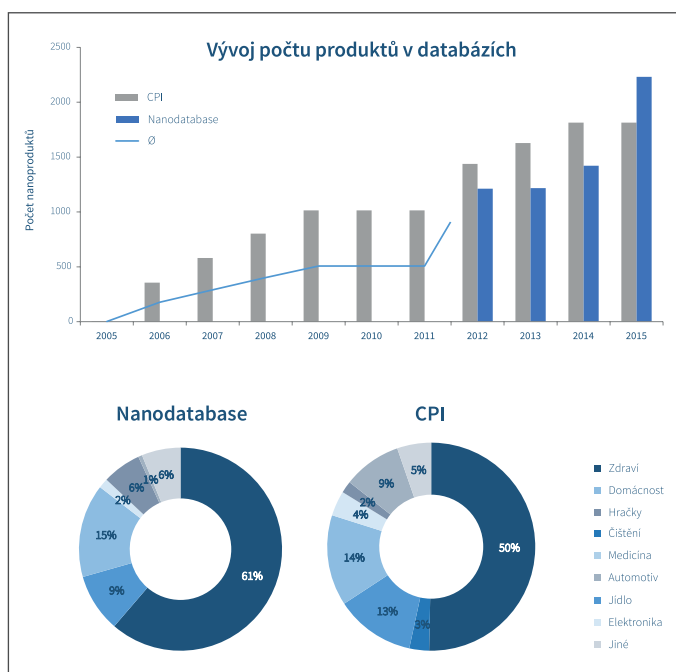
Když v roce 1959 vystoupil Richard Feynman na půdě kalifornské techniky se svou dnes již slavnou přednáškou Tam dole je hodně místa (Feynman, 1960), změnil se vědecký pohled na hmotu kolem nás. Do popředí zájmu mnoha vědců se dostaly nanočástice, struktury o velikosti od 1 do 100 nm, mezi něž lze řadit například elementární atomy, molekuly a biopolymery. Přestože jsou tyto částice běžnou součástí přírody, až přednáška Richarda Feynmana stála za vznikem multioborové vědní disciplíny zvané nanotechnologie, která propojuje oblasti fyziky pevných částic, chemie, molekulární biologie a inženýrství. Pokroky v technologiích posledních 30 let umožnily zobrazování a manipulaci s nanočásticemi a pomohly k objevení nových nanostruktur, které vynikají díky svým specifickým vlastnostem. Na částice velikosti nanorozsahu nepůsobí běžné fyzikální síly, nýbrž tyto fungují na principu kvantové mechaniky („Quantum size effect“). Projevuje se i růst povrchové plochy na jednotku hmotnosti („Surface effect“). Díky tomu se vlastnosti nanočástic mohou výrazně odlišovat od makrostruktur stejného prvku. Změny vlastností se projevují jak v tepelné či elektrické vodivosti, tak v optických a fyzikálních vlastnostech. Specifické vlastnosti nanočástic nacházejí stále častěji uplatnění v nejrůznějších aplikacích a produktech (Obr. 1).

Za účelem evidence produktů na bázi nanočástic vznikají databáze jako CPI – Consumer Products Inventory (<http://www.nanotechproject.org/cpi/>) a NANODATABASE (<http://nanodb.dk/>). V těchto databázích jsou evidovány finální produkty obsahující nanočástice (do statistik databází nepatří samotné nanostruktury nebo nanočásticové semiproducty). Meziroční průměrný růst počtu produktů v databázích (Obr. 2) je 18 %, kdy databáze CPI v současné době eviduje 1 827 a NANODATABASE 3 005 nanoproduktů. Nejčteněji zastoupené produkty v databázích jsou z oblasti zdraví (50 %, 62 %), domácností (14 %, 15 %) a čištění (12 %, 9 %).

Rozvoj udržitelné technologie výroby nanočástic byl jedním z hlavních témat projektu Sustainable Hydrothermal Manufacturing of Nanomaterials – SHYMAN financovaného EK v rámci 7. rámcového programu (FP7/2007–2013). V článku bude nejprve charakterizována nová technologie výroby nanočástic hydrotermální syntézy, hlavní jádro pak bude tvořit analýza environmentálních a ekonomických dopadů dvou produktových aplikací syntetizovaných nanočástic – aplikace TiO₂-nanočástic ve fotokatalytických nátěrech v porovnání s čističkou vzduchu a aplikace ZnO-nanočástic v samočisticích nátěrech.

Medicínské aplikace	Jídlo a zemědělství	Průmyslové aplikace	Životní prostředí
Transport léků	Potravinová aditiva	Nanokomposity	Senzory znečištění
Léčba rakoviny	Balení potravin	Průmyslové katalyzátory	Čištění vody
Antibakteriální působení	Redukce pesticidů	Zpevnění plastů	UV ochrana
Zobrazovací metody	Transport živin	Nanopigmenty	Biodegradující polymery
Agragace protejnů	Rozvoj textury	Keramické materiály	Odstraňování znečištění

Obr. 1: Hlavní oblasti aplikací nanočástic



Obr. 2: Vývoj počtu nano-produktů v databázích a hlavní zaměření databázových nanoprojektů (www.nanotechproject.org/cpi, <http://nanodb.dk/>)

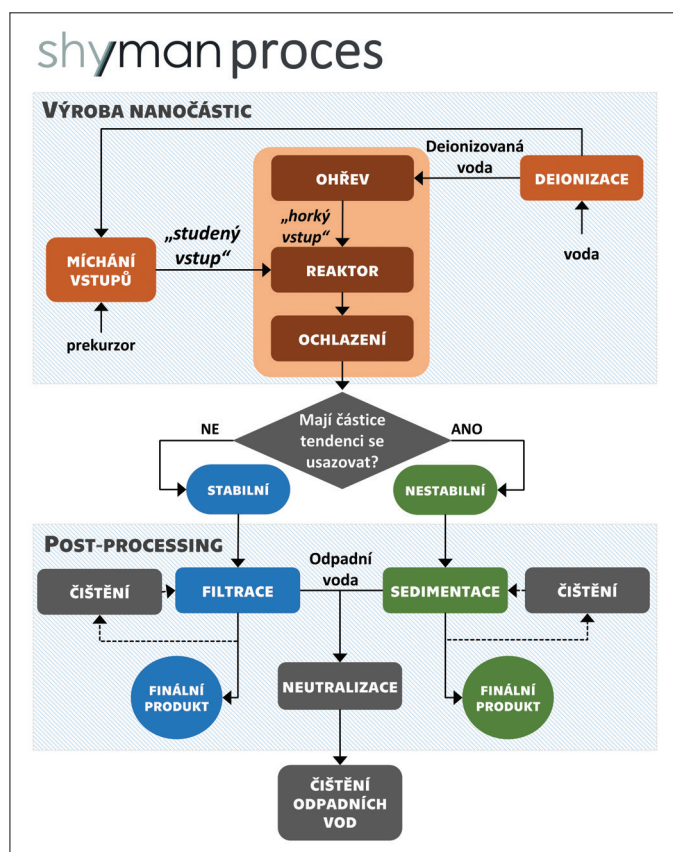
2 Projekt SHYMAN a úloha týmu ČVUT v Praze

Hlavním cílem projektu SHYMAN byl vývoj nové technologie velkoobjemové kontinuální výroby nanomateriálů. Z chemického pohledu jednoduchý princip výroby nanomateriálů tzv. „mokrou metodou“ otestovaný v laboratorních podmínkách byl v rámci projektu transformován na komerční průmyslovou výrobu produkující ročně řádově až stovky tun vysoce kvalitních nanočástic rozptýlených ve vodě.

Nanočástice se utváří prostřednictvím hydrotermální syntézy, která probíhá ve speciálně tvarovaném reaktoru, v němž se za vysokých tlaků mísí horký proud deionizované vody se studeným proudem roztoku prekursoru a vody. Disperze nanočástic je následně schlazena a podstupuje tzv. post-processing, při němž se zvyšuje její koncentrace a odstraňují se nečistoty (viz Obr. 3).

Technologie je schopná produkovat nanočástice oxidů (TiO₂, CeO₂, ZrO₂, SiO₂, ...), sulfidů, nitridů, ale i komplexních sloučenin, jako jsou např. LiFePO₄ či Metal Organic Frameworks (Dunne et al., 2014, 2015). Tyto nanočástice nachází široké uplatnění v elektrotechnickém, farmaceutickém a kosmetickém průmyslu a v řadě dalších odvětví.

Tím, jak se postupně přesouvají nanočástice z laboratoří do reálných produktových aplikací, vzrůstá i důležitost analýzy ekonomické a environmentální udržitelnosti těchto inovací. Proto hlavním úkolem týmu ČVUT v Praze v rámci projektu bylo posoudit dopady na životní prostředí a náklady spojené jak s vyvíjenou výrobní technologií, tak



Obr. 3: Schéma procesu SHYMAN

s vybranými produktovými aplikacemi nanomateriálů, a to v průběhu jejich celého životního cyklu (tzv. Life Cycle Assessment a Life Cycle Costing). Naší úlohou bylo prověřit, zda jsou výrobní technologie a produkty obsahující nanočástice jednak šetrné k životnímu prostředí, a jednak cenově konkurenceschopné ve srovnání s jinými výrobními technologiemi a alternativními produkty. Řešení tohoto úkolu jsme prováděli s využitím pokročilých softwarových nástrojů a rozsáhlých elektronických databází.

3 Použité metody

Ekonomické hodnocení

Ekonomická udržitelnost byla posuzována na dvou úrovních. Pro samotnou technologii výroby nanočástic byl vytvořen komplexní full-cost model, který sumarizoval veškeré relevantní náklady a následně je alokoval na zvolenou kalkulační jednotku – 1 kg nanočástic rozptýlených ve vodě. Jako klíčové variabilní náklady byly identifikovány náklady na chemikálie, vodu, zemní plyn (ohřev), elektrickou energii (deionizace, řízení procesu, pumpy a čerpadla), vodu a její čištění. Hodnoty

objemu spotřeby byly odhadovány na základě laboratorního měření a na základě simulací v softwaru Aspen Hysys. Fixní náklady pak tvořily především náklady na prostory a vybavení (odpisy, údržba), osobní náklady, pojištění a další služby. Tyto náklady byly alokovány pomocí hodinových nákladových sazeb. Ve druhé úrovni ekonomického hodnocení byly rozšířeny hranice hodnoceného systému a byl posuzován celý životní cyklus vybraných produktových aplikací pomocí metody Life Cycle Costing (LCC).

Environmentální hodnocení

Dopady na životní prostředí byly posouzeny metodou LCA (Guinée et al., 2002) v souladu s normami ISO 14040 (ISO, 2006a) a 14044 (ISO, 2006b) v rozsahu od těžby surovin přes všechny fáze životního cyklu až po odpad. Pro výpočet výsledků inventarizační analýzy a kategorií dopadu byl využit softwarový nástroj SimaPro 8.0.4 spolu s databází Ecoinvent 3. Pomocí tohoto softwaru byl proveden výpočet výsledků indikátorů kategorie dopadu na úrovni midpoint, výpočet celkové spotřeby energie životního cyklu nanoproductů CED (Cumulative Energy Demand) a byla posouzena toxicita a ekotoxicita nanoproductů pomocí modelu USEtox (www.usetox.org/model).

Dopady na životní prostředí byly stejně jako ekonomické dopady vyhodnocovány ve dvou úrovních – nejprve dopady 1 kg různých nanočástic rozptýlených ve vodě, poté dopady jednotlivých produktových aplikací v celém životním cyklu.

4 Porovnání environmentálních a ekonomických dopadů fotokatalytického nátěru a čističky vzduchu

Jednou z možností uplatnění nano TiO₂ v praxi je využití jeho fotokatalytických účinků k čištění vzduchu. Fotokatalýza je proces chemické dekompozice materiálů za přítomnosti fotokatalyzátoru, v tomto pří-

padě TiO₂ a světla. Fotokatalytický nátěr na bázi nano TiO₂ tak za přítomnosti UV záření slouží k odstranění nežádoucích mikroorganismů, vzdušných polutantů a pachu z vnitřního prostředí nemocnic, školních zařízení a dalších uzavřených prostor s větší koncentrací lidí, ale i pro čištění vzduchu v domácnostech. Obdobné účinky má i čistička vzduchu. Oba produkty jsou schopny v průběhu fáze užití odstranit ze vzduchu viry a bakterie, vzdušné polutanty, např. NO_x, SO₂, CO, VOC (těžké organické látky), plísně a nepříjemné pachy.

Pro posouzení environmentálních dopadů životního cyklu fotokatalytického nátěru metodou LCA byl zvolen produkt firmy Advanced Materials – JTJ, s. r. o., konkrétně fotokatalytický nátěr FN2 s nano TiO₂ vyrobeného pomocí hydrotermální syntézy v rámci projektu SHYMAN. V případě čističky vzduchu se jednalo o produkt dostupný na trhu (www.catalyticpureair.com).

Vzhledem k tomu, že neexistují normalizované postupy, které by umožnily porovnání efektivity fotokatalytického nátěru a čističky vzduchu, vycházeli jsme z testů na odbourávání VOC pomocí fotokatalytických nátěrů FN2 prováděných Vysokou školou chemicko-technologickou v Praze 13. 6. 2014. Podle výsledků testů je efektivita odbourávání VOC 51%. Efektivita odbourávání VOC pomocí různých čističek vzduchu se podle Evropské fotokatalytické federace pohybuje od 0 do 98% (Costarramone et al., 2014). Pro potřeby studie byl proto vytvořen předpoklad, že efektivita obou produktů je 50%.

Parametry týkající se objemu vycištěného prostoru byly převzaty z údajů uváděných výrobcí obou analyzovaných produktů. Funkční jednotka byla stanovena jako „čištění 100 m³ vzduchu v uzavřeném prostoru po období jednoho roku“. Hranice systému byly zvoleny tak, aby zahrnovaly všechny fáze života výrobků od těžby surovin, přes výrobu produktů, fázi užití, včetně údržby a nakládání s produkty po skončení jejich životnosti.

Tabulka 1: Scénáře uživatelské fáze fotokatalytického nátěru a čističky vzduchu během jednoho roku

Fotokatalytický nátěr	Spotřeba energie	Jednotka
Scénář I: doba osvětlení – 12 h denně	70,08	kWh
Scénář II: doba osvětlení – 24 h denně	140,16	kWh
Scénář III: doba osvětlení – 24 h denně, zvýšená intenzita	315,36	kWh
Čistička vzduchu	Spotřeba energie	Jednotka
Scénář I: 8 h mírný provoz, 8 h 70% intenzita provozu (noční provoz)	487,64	kWh
Scénář II: 8 h mírný provoz, 8 h intenzivní provoz	584	kWh
Scénář III: 8 h mírný provoz, 8 h intenzivní provoz, 8 h 70% intenzita	808,84	kWh

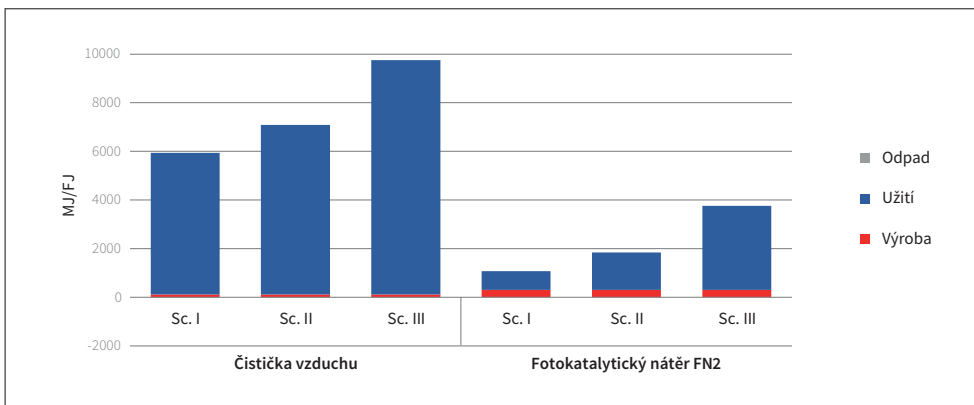


Obr. 4: Schéma životního cyklu fotokatalytického nátěru FN2 – výrobce Advanced Materials – JTJ, s. r. o.

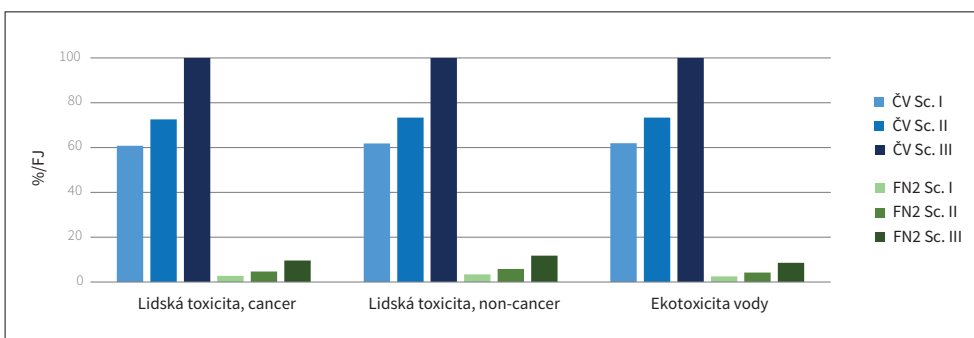
Primární údaje týkající se výroby FN2 poskytla společnost Advanced Materials – JTJ, s. r. o. Údaje týkající se large scale výroby nano TiO₂ byly získány z projektu SHYMAN transformací údajů small scale výroby nano TiO₂. Jako prekurzor pro výrobu nano TiO₂ byl použit TiOS (Titanium(IV) oxysulfate), výrobní teplota 250 °C. V případě čističky vzduchu byly použity údaje výrobce.

Fáze užití byla kalkulována ve třech variantách, které se v případě fotokatalytického nátěru lišily délkou a intenzitou dosvětlování prostoru pro zvýšení účinků fotokatalýzy, a v případě čističky vzduchu intenzitou jejího provozu definovanou výrobcem.

Po skončení životnosti (životnost nátěru 5 let) je fotokatalytický nátěr odstraněn a uložen na skládku. Stejný scénář je kalkulován i pro čističku vzduchu (životnost čističky vzduchu 10 let).



Obr. 5: Celková spotřeba energie životního cyklu fotokatalytického nátěru FN2 a čističky vzduchu

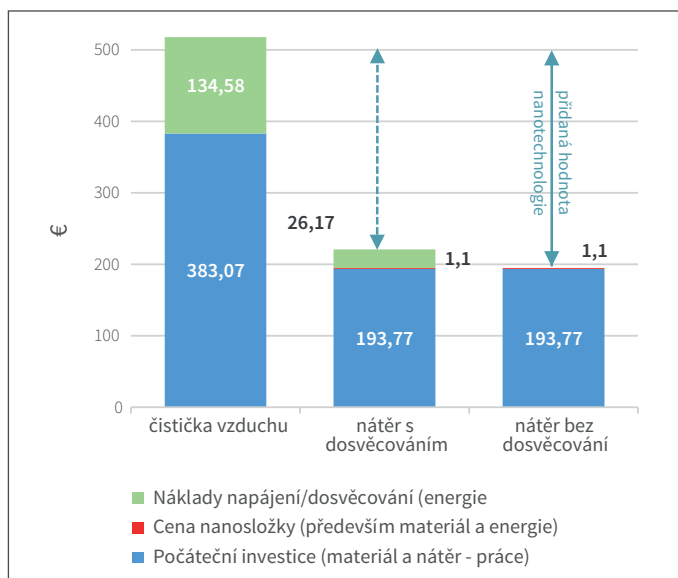


Obr. 6: Posouzení toxicity životního cyklu čističky vzduchu a fotokatalytického nátěru FN2 metodou USEtox

4.1 Porovnání výsledků LCA fotokatalytického nátěru a čističky vzduchu

Výsledky posuzování dopadů životního cyklu fotokatalytického nátěru FN2 a čističky vzduchu v kategorii dopadu Celková spotřeba energie (CED) ukázaly výrazné rozdíly jak v jednotlivých scénářích, tak ve vzájemném porovnání obou produktů.

Z Obr. 5 vyplývá, že celková spotřeba energie čističky vzduchu je ve všech třech scénářích výrazně vyšší než celková spotřeba energie fotokatalytického nátěru. Nejvíce se na celkové spotřebě energie obou



Obr. 7: Náklady životního cyklu čističky vzduchu a fotokatalytického nátěru FN2

produktů podílí fáze užití. Fáze výroby je zvláště u čističky vzduchu zanedbatelná, stejně jako fáze odpad. Obdobné výsledky vyplynuly i z dalších posuzovaných kategorií dopadu, které uvádí Tichá et al. (2016). Výsledky vyplývající z posouzení toxicity životního cyklu obou produktů metodou USEtox rovněž ukazují, že fotokatalytický nátěr má výrazně nižší dopady na zdraví člověka než čistička vzduchu (Obr. 6).

Posouzení životního cyklu metodou LCA bylo doplněno i o metodu LCC – náklady životního cyklu ve scénáři II. U fotokatalytického nátěru byl scénář doplněn o variantu bez dosvícování. Výsledky jsou uvedeny v Obr. 7.

Klíčovými faktory LCC pro fotokatalytický nátěr jsou **životnost porovnávaných řešení** (podobně jako u LCA), tržní **cena čističky vzduchu** nebo jiného alternativního řešení (odlišný faktor než u LCA) a **cena práce** při nátěru (v LCA nefiguruje); LCC ovlivňuje i zvolená **diskontní míra** (v LCA nefiguruje).

Výrobní technologie nanosložky (tzn. cena) je nepodstatná.

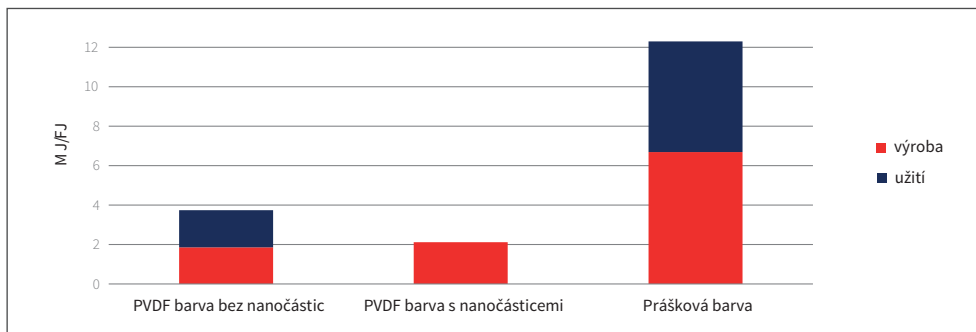
Fotokatalytický nátěr je perspektivní technologie tam, kde jsou přínosy čištění vzduchu vyšší než jeho náklady (jakoukoliv technologií), tzn., pokud není výhodnější **varianta vzduch nečistit**.

5 Porovnání environmentálních a ekonomických dopadů samočisticího nátěru s nanočásticemi ZnO a nátěru bez nanočástic

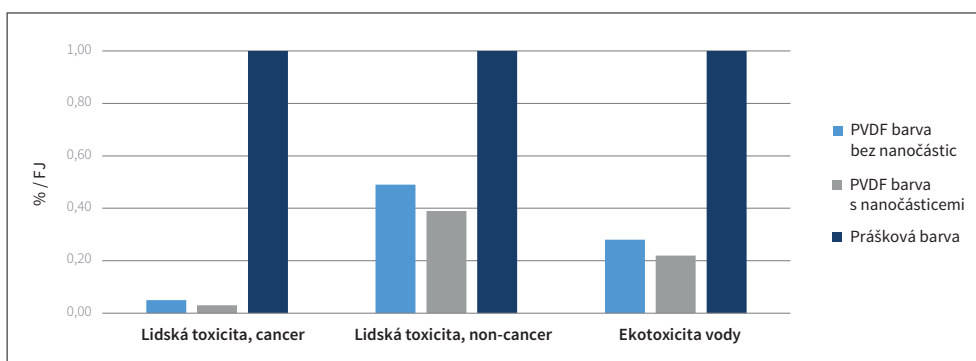
Analýza environmentálních a ekonomických benefitů aplikace nanočástic v samočisticích nátěrech určených pro povrchy kovových panelů byla další studií realizovanou v rámci projektu SHYMAN. Cílem bylo najít odpověď na otázku, zda v celém životním cyklu má samočisticí nátěr s nanočásticemi nižší environmentální dopady a nižší náklady než nátěr bez nanočástic.



Obr. 8: LCA schéma nátěru s nanočásticemi



Obr. 9: Celková spotřeba energie životního cyklu jednotlivých barev

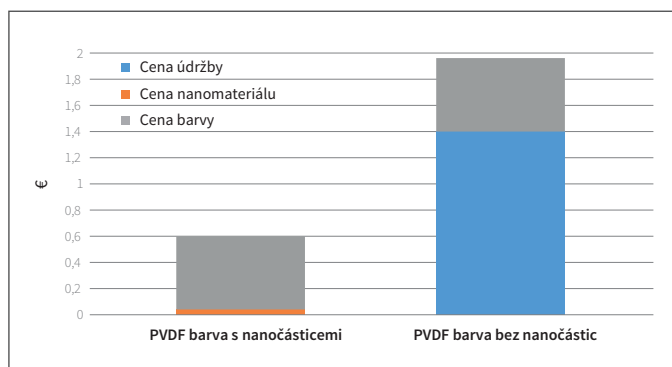


Obr. 10: Posouzení toxicity životního cyklu nátěru na bázi PVDF s nátěrem s nanočásticemi metodou USEtox

Prémiový nátěr s označením Hylar® 5000 na bázi PVDF představuje nátěr bez nanočástic. Aby se zvýšily samočisticí schopnosti tohoto nátěru, byla část PVDF (polyvinylidenfluorid) nahrazena nanočásticemi ZnO. Jako funkční jednotka byl stanoven 1 m² ochráněného hliníkového panelu v průběhu jednoho roku. Hranice systému byly postaveny tak, aby zahrnovaly celý životní cyklus produktů a zejména rozdily v uživatelské fázi jednotlivých nátěrů.

Životnost obou nátěrů byla výrobcem stanovena na 35 let. Povrch na bázi PVDF bez nanočástic se udržuje 1x ročně mytím vodou a detergentem, povrch s nátěrem s nanočásticemi se předpokládá bezúdržbový. Do LCA nebylo zahrnuto balení, doprava (kromě balení a dopravy nanočástic), dále pak úprava panelu před natřením, fáze konce života a ochranné pomůcky, protože je vše pro oba nátěry totožné. Data byla poskytnuta výrobcem nátěrů – Univerzitou v Nottinghamu (výroba ZnO), data pro fázi užití byla odhadnuta (Raibeck et al., 2008) a odsouhlasena výrobcem barev, pro vysokotlaký čistič byla odhadnuta na základě technických informací o čističi Kärcher. Ostatní data pocházela z databáze Ecoinvent 3. Pro srovnání byl do hodnocení přidán ještě běžný nátěr na bázi polyesteru s předpokládanou životností 10 let (www.ruukki.com) a frekvencí mytí 3krát ročně. Data k fázi výroby a aplikace nátěru jsou obsaženy v databázi SimaPro: Powder coating, aluminum sheet/RER U.

Z výsledků LCA vyplývá, že ve všech kategoriích dopadu má lepší výsledky nátěr s nanočásticemi než nátěr bez nanočástic na bázi PVDF. Je to díky uživatelské fázi, kdy není potřeba žádná údržba a tím jsou převáženy nepatrně vyšší nároky na výrobu nanočástic. Obr. 9 znázorňuje energetickou náročnost jednotlivých fází životního cyklu jednotlivých barev.



Obr. 11: Náklady životního cyklu samočisticího nátěru s nanočásticemi ZnO a bez nanočástic

Podrobné výsledky LCA studie uvádí Stieberová et al., 2017. Metoda USEtox (Obr. 10) rovněž potvrzuje nejnízší dopady nátěru s nanočásticemi.

Co se týká ekonomického zhodnocení, tam největší roli hraje cena mytí 1 m², což zvýhodňuje bezúdržbový nátěr s nanočásticemi ve srovnání s nátěrem na bázi PVDF bez nanočástic (Obr. 11). Náklady na nanočástice na funkční jednotku jsou zanedbatelné v porovnání s velikostí úspory za čisticí služby.

6 Diskuze

Environmentální a ekonomické hodnocení obou posuzovaných produktů, fotokatalytického i samočisticího nátěru, resp. jejich produktových systémů, které využívají ke zlepšení funkčních vlastností nanočástice, vykazují výrazně nižší dopady na životní prostředí než klasické produkty plnící stejnou funkci.

Případová studie, která porovnává účinky fotokatalytického nátěru a čističky vzduchu však zároveň ukazuje, že způsob užívání obou produktů může značnou měrou ovlivnit jejich efektivitu a následně i dopady na životní prostředí. U obou produktů je to především fáze užití, která má zároveň v porovnání s ostatními fázemi životního cyklu i největší dopady na životní prostředí. V případě fotokatalytického nátěru je dopad této fáze spojený s intenzitou osvětlování místnosti (využívání denního světla k nasvícení fotokatalytického nátěru může dopady snížit) a s údržbou svítidel. V případě čističky vzduchu se jedná především o intenzitu využívání čističky, tedy zvolený provozní režim a průběžnou výměnu filtrů. Nedostatečná výměna filtrů může efektivitu čističky vzduchu podstatně snížit. Lidský faktor je tedy velmi významným prvkem, který může dopady obou produktů na životní prostředí výrazně ovlivnit. Obdobné závěry vyplývají i z ekonomického posuzování.

V případě samočisticího nátěru je to rovněž fáze užití, která hraje z hlediska environmentálních a ekonomických dopadů největší roli. Dopady jsou ovlivněny především frekvencí čištění, při nižší frekvenci čištění povrchů ošetřených barvami bez nanočástic se budou jejich environmentální a ekonomické dopady snižovat, ale estetická a ochranná funkce, a tím i doba životnosti, také poklesne.

7 Závěr

Výsledky projektu SHYMAN prokázaly vysoký přínos nanoproduktů pro snížení dopadů na životní prostředí. Zároveň upozornily na význam fáze užití, resp. na to, že chování uživatele může environmentální dopady životního cyklu produktů zásadním způsobem ovlivnit, a to jak v pozitivním, tak v negativním smyslu. Určitou, dosud ne zcela zodpovězenou otázkou, však zůstává problematika dopadu nanočástic uvolňovaných do životního prostředí na zdraví člověka a ekosystémy. Výroba nanočástic pomocí hydrotermální syntézy zaručuje jejich minimální únik do životního prostředí ve fázi výroby. K uvolnění nanočástic však může docházet v průběhu fáze užití, a především ve fázi nakládání s produktem po skončení jeho životnosti. S recyklací nebo uložením nanoproduktů na skládku stále ještě není dostatek zkušeností. Obecně nízká znalost osudu nanočástic uvolněných do životního prostředí proto neumožňuje komplexní posouzení nanoproduktů především z hlediska jejich toxicity a dalších negativních dopadů. Tento nedostatek znalostí vyžaduje další výzkum zaměřený na chování nanočástic vůči životnímu prostředí, zvláště pak na posouzení jejich dopadů na lidské zdraví a ekosystémy.

8 Poděkování

Tento projekt byl podpořen Evropskou komisí v rámci 7. rámcového programu, smlouva č. FP7-NMP4-LA-2012-280983, SHYMAN

9 Literatura

- Costarramone, N.; Kartheuser, B.; Pecheyran, C.; Pigot, T.; Lacombe, S., 2014. *Efficiency of commercial photocatalytic air purifiers*.
- Dunne, P. W.; Munn, A. S.; Starkey, C. L.; Huddle, T. A.; Lester, E. H., 2015. *Continuous-flow hydrothermal synthesis for the production of inorganic nanomaterials*. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* 373(2057). <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0015>
- Dunne, P. W.; Starkey, C. L.; Gimeno-Fabra, M.; Lester, E. H., 2014. *The rapid size- and shape-controlled continuous hydrothermal synthesis of metal sulphide nanomaterials*. *Nanoscale* 6(4), 2406–2418. <https://doi.org/10.1039/C3NR05749F>
- Feynman, R. P., 1960. There's Plenty of Room at the Bottom. *Engineering and Science* (23), 22–36.
- Guinée, J.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; de Koning, A.; van Oers, L.; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H. A.; de Bruijn, H.; van Duin, R.; Huijbregts, M. A. J., 2002. *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background, Eco-efficiency in industry and science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- ISO, 2006a. Environmental management–Life cycle assessment–Principles and Framework (No. ISO 14040:2006). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO, 2006b. Environmental management–Life cycle assessment–Requirements and guidelines (No. ISO 14044:2006). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Raibeck, L.; Reap, J.; Bras, B., 2008. *Investigating Environmental Benefits of Biologically Inspired Self-Cleaning Surfaces*. Prezentováno v 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, s. 640–645.
- Stieberova, B.; Zilka, M.; Ticha, M.; Freiberg, F.; Caramazana-González, P.; McKechnie, J.; Lester, E., 2017. *Application of ZnO Nanoparticles in a Self-cleaning Coating on a Metal Panel: An Assessment of Environmental Benefits*. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 5(3), 2493–2500. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02848>
- Tichá, M.; Žilka, M.; Stieberová, B.; Freiberg, F., 2016. *Life cycle assessment comparison of photocatalytic coating and air purifier: LCA Comparison of Photocatalytic Coating and Air Purifier*. *Integrated Environmental Assessment and Management* 12(3), 478–485. <https://doi.org/10.1002/ieam.1786>