Strategická výzkumná agenda České technologické platformy pro udržitelnou chemii (SusChem CZ)

Aktualizace provedena v rámci projektu Suschem V (registrační číslo projektu CZ.01.01.01/07/24_052/0005274).

Strategická výzkumná agenda (SVA) byla zpracována kolektivem autorů České technologické platformy pro udržitelnou chemii.

V Neratovicích, říjen 2026

PROJEKT

SUSCHEM V

je spolufinancován **Evropskou unií.**

Udržet konkurenceschopnost českého chemického průmyslu, a to i v podmínkách současného zpomalování české ekonomiky, rostoucí zahraniční konkurence a existence nových hrozeb

Spolufinancováno Evropskou unií

MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU

SUSCHEM CZ

Více projektů podpořených Evropskou unií na **www.mapaprojektu.cz**

Obsah

Souhrn **6**
Úvod **7**
3. Cestovní mapa jako výchozí strategie **9**
4. Charakterizace vědecko-výzkumné základny českého chemického průmyslu **12**
5. Hlavní projekty českého chemického výzkumu **16**
5.1. Zelená dohoda pro Evropu (GND) 16
5.2. Konverze a skladování energií 17
5.2.1. Solární články 18
5.2.2. Tepelná čerpadla 25
5.3. Ukládání energie 26
5.3.1. Baterie 26
5.3.2. Úložiště energie 34
5.3.3 Palivové články 43
5.3.4. Akumulace tepelné energie 46
6. Vodíková strategie České republiky **48**
7. CO_2 jako surovina **66**
7.1 Zachycování a využití CO_2 66
7.1.1 Zachycování CO_2 z atmosféry 67
7.1.2. Využití metod zachycování a využití CO_2 (CCU) 68
7.1.3. Využití CO_2 k výrobě pohonných hmot 69
7.2. Další možnosti využití CO2 jako chemické suroviny 71
7.2.1 Výroba metanolu 71
7.2.2 Metanol po pyrolýze metanu 72
7.2.3 Metanol z biomasy 73
7.2.4 Přeměna oxidu uhličitého na palivo pomocí sluneční energie 74
7.2.5 Využití CO_2 pro akumulaci energie z obnovitelných zdrojů 75
8. Strategie udržitelnosti chemických látek **78**
8.1. Nahrazení nebezpečných chemických látek 79
8.1.1 Příklady substitucí nebezpečných chem. látek z ČR: 82
8.2. Recyklovatelnost 82
8.2.1 Per – a polyfluoroalkylované látky (PFAS) 83
8.2.2 Olovo 84
8.2.3 Mikroplasty 84

8.3. Optimalizace procesů 85
8.3.1 Substituce nebezpečných procesů 85
9. Modernizace rafinérsko-petrochemického průmyslu 87
9.1. Optimalizace technologických procesů 89
9.2. Transformace rafinérsko-petrochemického sektoru na potenciální nástup neuhlovodíkové mobility – trendy ve výrobě paliv 89
9.2.1 Biopaliva 92
9.2.2 Syntetická paliva 92
9.2.3 Zelený etylen 5) 95
9.3. Využití zeleného vodíku v petrochemii 7), 8) 97
9.4 Recyklace plastových a dalších odpadů 98
9.5 Zelený amoniak 7), 8) 99
9.6 Elektrifikace chemického průmyslu 7) 99
10. Udržitelné zemědělství 101
10.1. Využití biologického oběhového hospodářství 101
10.2. Omezení používání chemických pesticidů v zemědělství 101
10.3. Racionálnější využívání živin. 102
10.4. Snížení emisí skleníkových plynů. Transformace živočišné výroby jako významného zdroje emisí methanu 102
10.5. Výroba syntetických minerálních hnojiv 4) 104
10.6. Organická hnojiva 106
10.7. Problém emisí metanu 107
10.8. Přípravky na ošetření rostlin – pesticidy 108
11. Jaderná energetika 113
11.1. Malé jaderné reaktory (SMR) 113
11.2. Jaderné reaktory čtvrté generace 4) 113
11.3. Nové palivo pro jaderné elektrárny 5), 6) 114
11.4. Jaderná fúze 7) 116
12. Průmyslové biotechnologie – nezastupitelná alternativa nových možností a udržitelnosti v chemickém průmyslu 117
12.1. Role biotechnologie v chemickém průmyslu 120
12.2. Příspěvek mikroorganizmů v průmyslové biotechnologii a chemii 121
12.3. Biosuroviny pro výrobu motorových paliv 126
13. Cirkulární ekonomika 128
13.1. Recyklace solárních článků 2) 128
13.2. Recyklace lithiových baterií 3) 129

13.3. Recyklace lopatek větrných turbín 4) 130
13.4. Recyklace elektroniky 5) 130
13.5. Lithium 131
14. Průmysl 4.0 133
14.1. Pokročilé procesy a zařízení 135
14.2. Optimalizace procesů 135
14.3. Pokročilá zařízení a aparáty 137
14.4. Malé jaderné reaktory 137
14.4.1. Srovnání SMR a velkých jaderných reaktorů 137
14.4.2. Vyvíjené SMR 4, 5) 138
14.4.3. Rozdělení SMR 6) 7) 140
14.4.4. Vývoj SMR v ČR 141
14.5. Jaderné reaktory čtvrté generace 141
14.6. Elektricky vyhřívaný katalyzovaný reaktor 9) 144
15. Předpokládané výdaje a zdroje 147
15.1. Výdaje na modernizaci stávající výrobní základny chemického průmyslu ČR 148
16. Horizontální témata 151
17. Závěr 155
Seznam vybraných použitých zkratek 157

Souhrn

Strategická výzkumná agenda vymezuje prioritní směry výzkumu, vývoje a inovací pro transformaci českého chemického průmyslu do roku 2050. Zaměřuje se zejména na dekarbonizaci a energetickou účinnost, nízkouhlíkové zdroje energie, vodík, využití CO_2, oběhové hospodářství, pokročilé materiály, digitalizaci a přenos výsledků výzkumu do průmyslové praxe. Současně identifikuje technologické, ekonomické, infrastrukturní a regulatorní bariéry a navrhuje oblasti, v nichž má Česká republika vhodné výzkumné a průmyslové kapacity pro národní i mezinárodní projekty.

Úvod

Prioritní oblasti SVA jsou hodnoceny podle jejich významu pro dekarbonizaci, surovinovou a energetickou bezpečnost, konkurenceschopnost chemického průmyslu a využitelnost českých výzkumných a průmyslových kapacit. U každé oblasti jsou proto vymezeny technologické potřeby, hlavní bariéry, očekávaný časový horizont a náměty pro výzkumné a inovační projekty.
Evropská zelená dohoda, balíček Fit for 55, rostoucí význam bezpečnosti dodávek energie a kritických surovin, geopolitické napětí a tlak na konkurenceschopnost evropského průmyslu zásadně mění podmínky pro výzkum, vývoj a inovace. Chemický průmysl musí současně snižovat emise skleníkových plynů, spotřebu energie a primárních surovin, posilovat oběhové hospodářství a bezpečnost chemických látek a zavádět digitální a nízkouhlíkové technologie. Strategická výzkumná agenda proto vymezuje prioritní oblasti, v nichž mohou české výzkumné organizace a podniky přispět k technologické transformaci, odolnosti hodnotových řetězců a dlouhodobé konkurenceschopnosti českého chemického průmyslu.

Investice do účinného využívání energie, recyklace a hospodaření s vodou patří mezi klíčové oblasti rozvoje českých firem. Udržitelnost pro ně představuje jak nákladovou a regulatorní výzvu, tak příležitost k inovacím a rozšíření zákaznické základny. Vedle tradičních finančních ukazatelů proto roste význam environmentálních, sociálních a správních kritérií ESG. EU taxonomie v tomto rámci slouží jako klasifikační systém, který vymezuje podmínky, za nichž lze hospodářské činnosti považovat za environmentálně udržitelné, a navazuje na ni povinnost zveřejňovat stanovené informace.
Chemické látky jsou základem strategických hodnotových řetězců Evropy, takže opatření spojená se zelenou a digitální transformací mají dominový efekt napříč navazujícími odvětvími. Odolnost a rozvoj strategických hodnotových řetězců proto závisejí na inovativním a konkurenceschopném chemickém průmyslu, předvídatelném regulatorním prostředí a nových modelech spolupráce mezi chemickým průmyslem a ostatními odvětvími. Chemický průmysl je současně energeticky a kapitálově náročný a čelí vysokým cenám energií a surovin, globální konkurenci, požadavkům na účinnější využívání zdrojů včetně vody a na rozvoj oběhového hospodářství. Podniky se musí vyrovnat s cíli nulového znečištění, s požadavky Strategie pro udržitelnost chemických látek a s rozsáhlou novou legislativou EU. Trvalé investice do výzkumu a inovací proto musí být provázeny jasným stanovením priorit, realistickým pořadím opatření a posouzením dopadů na konkurenceschopnost, investice a zaměstnanost.
Některé chemické látky, které jsou nezbytné pro strategické hodnotové řetězce, se již v EU nevyrábějí, protože jejich výroba nebyla konkurenceschopná. Chemický průmysl vkládá velké naděje do inovací v hodnotových řetězcích surovin, což je oblast, která zůstává nevyužita navzdory svému velkému potenciálu. Společný nákup strategických surovin pro EU je správná cesta, pokud se však zabrání tomu, aby vedl k nepředvídatelnému zvyšování cen, jak jsme toho svědky u vývoje cen elektřiny nebo emisních povolenek.
Cestovní mapa průmyslové modernizace a zavádění pokročilých technologií v chemickém průmyslu ČR vymezuje dlouhodobý strategický rámec transformace odvětví. Tato SVA na něj navazuje konkretizací prioritních výzkumných úkolů potřebných k zachování udržitelnosti a konkurenceschopnosti rozhodujících segmentů českého chemického průmyslu. Současně odhaduje rozsah finančních prostředků potřebných pro realizaci navržených programů,

analyzuje dostupné zdroje financování a navrhuje způsoby odstranění hlavních překážek jejich realizace. V souladu se strategií ČR pro udržitelnou energetiku rozšiřuje okruh výzkumných záměrů o jadernou energetiku, rafinérsko-petrochemický komplex a udržitelné zemědělství.
Některé otázky dále rozvedené ve Strategické výzkumné agendě (SVA) jsou řešeny v základním výzkumu, výzkumníci přicházeli s novými pokročilými materiály a procesy, ale zásadní otázkou je urychlení přenosu do průmyslové praxe a vyřešení základních ekonomických a ekologických otázek spojených s těmito inovacemi.
SVA vznikala za širokého konsenzu předních odborníků českého chemického průmyslu a respektuje hlavní záměry EU, možnosti zapojení se do Evropského výzkumného prostoru a další rozvoj mezinárodní spolupráce v oblasti výzkumu a inovací. Zdrojem pro zpracování SVA byly i strategie významných českých firem pro transformaci na bezemisní ekonomiku a digitalizaci (např. Orlen Unipetrol, Spolchemie, ČEZ, BASF, Škoda Auto).
Potenciál tuzemských podniků a výzkumných organizací lze dále rozvíjet cíleným zaměřením na technologické trendy s očekávaným dopadem na chemický průmysl, zejména umělou inteligenci, automatizaci, pokročilé materiály, nanotechnologie, biotechnologie a digitální modelování. Cílem strategie je orientovat podporu na tyto směry a vytvořit vzájemně provázaný systém financování od základního výzkumu přes aplikovaný výzkum až po průmyslové zavádění výsledků.
Každá významná inovace začíná výzkumem. Proto o sobě musí vědci a inovátoři vědět, a proto je nutné podporovat invenci a kreativitu. Od základního výzkumu až po inovace, přinášející ekonomický profit a zpětné reinvestice do výzkumu. V ČR máme velké množství vynikajících výzkumných organizací, a ještě více dynamických a inovativních firem. To vyžaduje významně posílit financování výzkumu, vývoje a inovací z 1,82 % HDP v roce 2024 směrem k cíli 3 % HDP, který je stanoven na úrovni EU.

Dosavadní návrhy v SVA bylo třeba aktualizovat s ohledem na nové, často velmi ambiciózní požadavky GND, Strategie udržitelnosti chemikálií a dalších iniciativ EU. Základním požadavkem úspěšné realizace v SVA popsaných inovací je však především zajištění dostatečných zdrojů levné obnovitelné energie. Schopnost ČR ovlivnit vývoj globálních megatrendů je omezená, dopad globálních megatrendů na budoucí vývoj ČR je však mimořádně významný.

3. Cestovní mapa jako výchozí strategie

Cestovní mapa průmyslové modernizace a zavádění pokročilých technologií v chemickém průmyslu ČR (CM) představuje strategický rámec pro rozvoj všech složek výzkumu, vývoje a inovací. Vychází z analýzy požadavků vyplývající z hlavních megatrendů budoucího vývoje, zejména GND, Strategie pro udržitelnost chemických látek, Průmysl 4.0 a Cirkulární hospodářství. Identifikuje potřeby k vytváření udržitelného, inovativního a konkurenceschopného rozvoje a role českého chemického průmyslu v realizaci výzev jako jsou GND, Vodíková strategie ČR, Národní výzkumná a inovační strategie pro inteligentní specializaci ČR 2021+, Inovační strategie České republiky 2019–2030, Národní politiky výzkumu, vývoje a inovací ČR 2021+, Průmyslu 4.0 a Cirkulárního hospodaření. Válka na Ukrajině zcela principiálně ovlivnila nejenom obchodní řetězce, ale i dodávky základních surovin a výrobků (nejenom plynu a ropy, ale také např. čipů a dalších výrobků). Vyvolala mimořádnou vlnu zbrojení, oslabila ekonomiku a může oddálit i realizaci zásadních opatření k ochraně klimatu.

CM popisuje dlouhodobější inovativní prvky, požadavky na výzkum nad rámec současného stavu techniky (tedy na vyšší technologické úrovni), bariéry žádoucího vývoje a cesty dalšího rozvoje mezioborové spolupráce.
Požadavky na chemický průmysl se zvyšují s pokračující digitalizací a přechodem k udržitelnému hospodářství. Produkty jsou doplňovány digitálními funkcemi, lineární dodavatelské řetězce se mění ve složité ekonomické sítě a roste význam recyklace materiálů i pokročilých metod syntézy. Chemické odvětví proto vstupuje do nové fáze označované jako Chemistry 4.0, která vyžaduje nejen další rozvoj digitalizace, ale také nové obchodní modely. Jde o koordinovaný a integrovaný rámec propojující výzkum s podnikáním prostřednictvím krátkodobých, střednědobých a dlouhodobých cílů a přínosů. Poskytuje tak strategický a časově vymezený základ pro řízení a investice do konkrétních inovačních oblastí a technologických řešení, která přispívají k udržitelnému růstu. Současně zdůrazňuje potřebu zvýšit připravenost malých a středních podniků (MSP) na zavádění pokročilých technologií, které zpravidla vyžadují kombinaci různých kompetencí a vznik nových meziodvětvových hodnotových řetězců.

SVA reaguje na vybrané cíle CM, které mají přispět ke splnění globálních cílů (např. 20–50% snížení spotřeby energie v průmyslových procesech, zvýšení účinnosti fotovoltaických článků o 10 %, vývoj baterií s energetickou hustotou až 10x vyšší, než je u současných Li-ion baterií, vývoj zařízení s účinností generování solárního vodíku cca o 20 % vyšší, než je účinnost současné fotovoltaické technologie a další).

Energetická účinnost a využívání obnovitelných i dalších nízkoemisních zdrojů energie jsou klíčové pro snižování emisí. Pojem obnovitelná energie označuje energii z obnovitelných zdrojů, zatímco nízkoemisní energie zahrnuje širší skupinu zdrojů a technologií s nízkými emisemi skleníkových plynů v průběhu životního cyklu. Součástí řešení mohou být také alternativní produkty a nové obchodní modely, které propojí ekonomické a environmentální přínosy.

SVA se zaměřuje převážně na výzkumná řešení přesahující současný stav techniky. Jde zejména o náměty, které jsou nyní řešeny na úrovni základního nebo raného aplikovaného výzkumu a jejichž širší průmyslové využití lze očekávat přibližně v období 2030–2040.
Představuje vhodné náměty pro společné projekty v rámci Evropského výzkumného prostoru, ale také například pro inovace a podnikatelské záměry v MSP. Výzvou pro chemický průmysl v ČR bude zajistit potřebné investice do jeho rozvoje tak, aby uspěl v globální konkurenci.
Na základě identifikace globálních trendů techniky a budoucích potřeb ekonomiky s ohledem na potenciál české vědeckovýzkumné základny a inovační potenciál českých firem byly vytipovány základní strategické oblasti, pro které existuje nebo je vytvářen v ČR dostatečný vědeckotechnický potenciál, záměry jsou realizovatelné a mohou významně přispět k řešení potřeb české společnosti

Mezi hlavní oblasti doporučovaného zaměření výzkumu a vývoje byly vytipovány:

- Usnadnění výroby a skladování obnovitelné energie
  Technologie výroby a skladování energie jsou zásadní pro úspěšný přechod na nový mix energií a nízkouhlíkové hospodářství. Chemický průmysl hraje významnou roli, pokud jde o umožnění řešení pro skladování energie – od využití amoniaku a skladování vodíku až po výrobu vodíku z bioplynu. Kromě toho může chemický průmysl přispět k alternativní generaci energie prostřednictvím nových solárních článků, pokročilých kotvících materiálů a super hydrofobních povlaků pro větrné turbíny, nových izolačních materiálů pro domy a mnoha dalších řešení.
- Recyklace emisí CO_2 na chemické suroviny (např. methanol)
- Recyklace odpadů
  Na konci svého životního cyklu, kdy je výrobek již po době své životnosti nebo již není potřeba, může být recyklován. Obsažené komponenty mohou nahradit primární materiály a zabránit tak dalším emisím CO_2. To vyžaduje recyklační technologie ideálně založené na uhlíkově neutrální energii.
- Minimalizace emisí CO_2 musí také hrát ústřední roli při používání produktu – a proto již musí být zahrnuta ve fázi vývoje produktu.
- Nové průmyslové technologie – např. obnovitelný vodík, lithium, grafen, biopesticidy
- Biotechnologie – nezastupitelná alternativa nových možností a udržitelnosti v chemickém průmyslu a zemědělství.

Vzhledem k tomu, že 96 % vyrobeného zboží závisí na chemikáliích, je evropský chemický průmysl jádrem téměř všech hodnotových řetězců a poskytuje klíč k řešením, která přinesou naplnění cílů GND, od solárních panelů přes baterie, větrné turbíny a vodík až po izolaci budov, průmyslu povrchových úprav, výrobu léčiv a výkonnější elektroniky. Chemický průmysl také potřebuje transformovat své vlastní výrobní procesy, aby do roku 2050 dosáhl klimatické neutrality. Přechod bude úspěšný pouze tehdy, pokud se chemická strategie pro udržitelnost promění ve skutečnou růstovou strategii pro čtvrtý největší evropský průmysl. Zatímco tato strategie navrhuje dlouhý a podrobný seznam legislativních opatření s odpovídajícím načasováním pro lepší ochranu občanů, což je cíl, postrádá konkrétnost a jasno v tom, jak bude splněn druhý cíl: podpora inovací pro bezpečné a udržitelné chemické látky.

Světová věda nabízí zejména v základním výzkumu řadu variant řešení. Teprve čas prověří, které inovace budou úspěšné v průmyslu a přinesou tolik žádoucí posun v řešení řady výzev současné doby k zajištění udržitelnosti života na Zemi. Některé velké projekty se řeší již desítky let (např. jaderná fúze) a přesto se jejich komercionalizace očekává až po roce 2050. Urychlení aplikace výsledků VaV je jedním ze základních požadavků současné doby.

4. Charakterizace vědecko-výzkumné základny českého chemického průmyslu

Výzkumné aktivity v ČR pokrývají široké spektrum klíčových technologií a znalostních domén, zejména pokročilé materiály, nanotechnologie, mikroelektroniku a nanoelektroniku, fotoniku, pokročilé výrobní technologie a průmyslové biotechnologie. Česká výzkumná základna je v řadě těchto oblastí schopna vytvářet mezinárodně relevantní výsledky a spolupracovat s aplikační sférou na identifikaci nových technologických řešení.

Mezi přední výzkumné obory patří především přístrojová technika (přístroje a přístrojová technika a mikroskopie), fyzika a materiálové vědy a energetika (zejména jaderná fyzika, jaderné vědy a technologie), některé podobory chemie a chemického inženýrství (spektroskopie, elektrochemie, textilní materiály, aplikovaná chemie), počítačové vědy (počítačové vědy a softwarové inženýrství), obory elektrického inženýrství a telekomunikací (automatizace a kontrolní systémy, telekomunikace), strojírenské obory (strojírenství a letecké strojírenství, všeobecné strojírenství) a biomedicínské obory (medicinální chemie, toxikologie, lékařské laboratorní technologie). V těchto oborech existují v ČR jednak silné výzkumné týmy, jednak existují potenciálně komplementární firmy v hospodářských odvětvích, která vykazují pozitivní dynamiku v exportu a investicích do VaV a lze u nich předpokládat zájem o využití výsledků výzkumných organizací. Přímé vazby mezi znalostními doménami a uvedenými výzkumnými obory a podobory lze předpokládat v odvětvích výroba dopravních prostředků, strojírenství, elektrotechniky a elektroniky, jakož i ve výrobě léčiv, ale také v některých užších tržních nikách jako je výroba vědeckých a analytických přístrojů, speciálních textilií, chemické inženýrství apod.

Dosavadní výzkumná specializace byla v nedávném období ovlivněna poměrně masivními investicemi do veřejného výzkumu díky využití strukturálních fondů EU, a to především z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (OP VaVpI). Tato VaV centra se měla stát klíčovými stavebními bloky výzkumné specializace ČR, ale následně bylo třeba řešit jejich financování. Bude nezbytné využít v maximální míře jejich znalostního potenciálu pro řešení společenských výzev, i pro řešení výzkumných problémů definovaných ve spolupráci s aplikační sférou. Díky těmto investicím vzniklo v ČR celkem 8 center excelence a 40 regionálních VaV center, která představují značné posílení kritické masy ve vybraných oborech. Na VaV centra je také navázána podstatná část investičních nákladů české účasti v projektech celoevropských výzkumných infrastruktur.

ČR má silnou průmyslovou i výzkumnou základnu a moderní výzkumné infrastruktury, ale potřeby podnikatelské a výzkumné sféry se ne vždy potkávají, což se odráží v doposud stále nízké míře spolupráce těchto dvou sfér.

Souhrnně lze konstatovat, že v ČR existují výzkumné kapacity v šesti zde sledovaných znalostních doménách: v materiálovém výzkumu, nanotechnologiích, mikroelektronice a nanoelektronice, fotonice, pokročilých výrobních technologiích a průmyslových biotechnologiích. Jejich kvalita a kapacita se mezi jednotlivými obory liší; společně však vytvářejí předpoklady pro absorpci zahraničních poznatků, zapojení do mezinárodních projektů a rozvoj vlastních technologických řešení.

Systém velkých výzkumných infrastruktur ČR je průběžně aktualizován prostřednictvím aktuální cestovní mapy a navazujících rozhodnutí vlády o jejich financování. Aktuální 5. vydání Cestovní mapy velkých výzkumných infrastruktur ČR na léta 2023–2026 (vzato vládou

na vědomí 14. 6. 2023, aktualizace 2024) zahrnuje 43 velkých výzkumných infrastruktur v šesti vědních oblastech.
V rámci ČR se mezi špičkové výzkumníky a jejich týmy řadí Univerzita Karlova, Masarykova univerzita, Biologické centrum AV ČR, v. v. i., České vysoké učení technické v Praze a další.
Z hlediska spolupráce s podnikatelskou sférou má významné postavení VŠCHT Praha, včetně Technoparku Kralupy a výzkumného centra CirkTech zaměřeného na pokročilé mechanické a chemické procesy pro oběhové hospodářství. Mezi další relevantní pracoviště patří VŠB – Technická univerzita Ostrava.
Na Univerzitě Palackého v Olomouci vznikl Český institut výzkumu a pokročilých technologií CATRIN zaměřený na nové možnosti získání a ukládání „zelené“ energie, na rozvoj udržitelného zemědělství, ochranu životního prostředí nebo prevenci a léčbu civilizačních chorob.
Z hlediska zařazení kapitoly Jaderný výzkum je třeba zmínit Ústav jaderné fyziky AV ČR a Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Významnou oblastí je rozvoj výzkumné základny v podnikatelské sféře. Z podnikatelské sféry lze zmínit:

- ORLEN Unipetrol RPA a.s. (dříve Unipetrol výzkumně vzdělávací centrum), Litvínov, Ústí nad Labem
- SYNPO, a.s. Pardubice (součást výzkumné základny Spolchemie)
- Výzkumný ústav organických syntéz a.s. Rybitví (VUOS) a jeho dceřiná firma Centrum Organické Chemie (COC)

Spolchemie provádí výzkum a vývoj ve třech výzkumných centrech. Významnou část české základny VaV jsou výzkumná a vývojová pracoviště ve výrobních podnicích, která řeší zejména otázky aplikovaného výzkumu, zlepšování kvality výrobků, modernizací výrobní základny, přípravy inovačních investic, ochrany životního prostředí, úspor energií a další praktické otázky. Jako příklad lze uvést BorsodChem MCHZ, Precheza, Synthomer, Bochemie a řadu dalších.

Jako příklady úspěšné průmyslové realizace lze uvést zavedení výroby:

- Dicyklopentadienu v Orlen Unipetrol Litvínov využitím vedlejších produktů ethylenové jednotky
- Adiabatické nitrace v BorsodChem MCHZ Ostrava
- Intensifikace výroby TiO_2 a nano TiO_2 v Precheza a.s. Přerov

Vzhledem k mimořádné náročnosti potřebných opatření pro dosažení cílových parametrů GND, Strategie udržitelnosti chemikálií a dalších opatření EU vznikla jak na mezinárodní, tak domácí scéně řada organizací jako:

- Evropská aliance pro čistý vodík
- Asociace CO_2 Value Europe
- CO_2 Czech Solution Group
- Česká asociace oběhového hospodářství
- Česká technologická platforma pro užití biosložek v dopravě a chemickém průmyslu

- Česká technologická platforma Plasty

Nedílnou součástí struktury VaV v ČR jsou četné technologické platformy, s řadou z nich SusChem CZ aktivně dlouhodobě spolupracuje. Díky zastoupení firemní sféry, výzkumných organizací i veřejného sektoru je možné zpřesnit a prioritizovat aplikační témata inteligentní specializace a další výzkumná témata.
V roce 2024 se výzkumu a vývoji v ČR věnovalo přibližně 123 tisíc osob (fyzické osoby), což odpovídá 86,9 tisíce přepočtených pracovníků (FTE); ženy tvořily zhruba 30 %. Celkové výdaje na VaV dosáhly 146,9 mld. Kč (1,82 % HDP), z toho 41 % bylo vynaloženo v Praze. **3)**

Zdroje :
1) *Cestovní mapa velkých výzkumných infrastruktur ČR pro léta 2023–2026, MŠMT 2023 (aktualizace 2024)*
2) *Analýza stavu výzkumu, vývoje a inovací v České republice a jejich srovnání se zahraničím v roce 2020, RVVI 2021*
3) *Český statistický úřad: Výdaje na výzkum a vývoj ve vztahu k HDP stagnují, 2025 (údaje za rok 2024)*

5. Hlavní projekty českého chemického výzkumu

Struktura evropské energetiky a její vysoká dovozní závislost představují významný faktor konkurenceschopnosti chemického průmyslu. Podle Eurostatu byla EU v roce 2024 z 57 % závislá na čistém dovozu energie. Od roku 2026 navíc EU postupně ukončuje dovoz ruského plynu (dovoz LNG do konce roku 2026, plynovodního plynu do podzimu 2027).
Moderní chemie a související technologické procesy nabízejí řadu řešení aktuálních společenských výzev, jako je například udržitelnost ekonomického růstu ve spojení s ochranou životního prostředí. I proto je potřeba hledat cesty, jak tyto inovativní technologie podpořit (např. na bázi chemicko-termických procesů), v oblasti nakládání s odpady, v energetickém sektoru nebo recyklačním průmyslu.
Návrh SVA zde vychází z CM, Národní RIS3 strategie a reaguje na strategii inteligentní specializace ČR.

5.1. Zelená dohoda pro Evropu (GND)

- Hlavním cílem Zelené dohody pro Evropu je snížit čisté emise skleníkových plynů v EU do roku 2030 nejméně o 55 % oproti roku 1990 a dosáhnout klimatické neutrality do roku 2050. Mezi související cíle patří mimo jiné zvýšení podílu obnovitelných zdrojů, zlepšení energetické účinnosti, rozvoj oběhového hospodářství a snížení závislosti na fosilních palivech. Novelou evropského klimatického zákona (definitivně schválena Radou 5. 3. 2026) byl stanoven i závazný průběžný cíl snížit čisté emise do roku 2040 o 90 % oproti roku 1990 (od roku 2036 lze započíst až 5 % prostřednictvím mezinárodních uhlíkových kreditů). Dílčí cíle stanovují jednotlivé předpisy balíčku Fit for 55, např. směrnice RED III (podíl OZE v EU nejméně 42,5 % v roce 2030).
- EU si stanovila ambiciózní cíl do roku 2035 recyklovat 65 % komunálních odpadů
- Postupně nahradit ropu (fosilní paliva) s rozdílnými specifickými cíly: např. RED III: 29 % OZE v dopravě nebo snížení emisní náročnosti paliv o 14,5 % do roku 2030.

Hlavními opatřeními pro dosažení cílových parametrů je dekarbonizace energetiky, rozšíření využívání obnovitelných zdrojů energie, zelený vodík, využívání CO_2 jako suroviny, využití biomasy, elektrifikace chemického průmyslu, recyklace, ale také úspory spotřeby energií a surovin, hlavně kritických, a vody.

Tato opatření si však vyžádají zásadní změny nejenom v chemickém průmyslu, ale zejména v mobilitě, hutnictví, zemědělství, stavebnictví a v dalších odvětvích. Řada těchto změn již postupně nastává (např. programy postupného útlumu těžby uhlí, rozvoj elektromobility, omezování skládkování odpadů, zvyšování podílu biometanu nebo vodíku v plynu, nové emisní limity pro motorová vozidla a další.)

Proti tomu však velmi negativně působí výrazné zdražování energií, které významně dopadá nejenom na životní úroveň obyvatel, ale i na řadu průmyslových odvětví, včetně chemického průmyslu, a ohrožuje ekonomickou stabilitu a konkurenceschopnost nejen českého průmyslu.

Investice do efektivního využití energie, recyklace a využití vody patří v českých firmách mezi klíčové oblasti řešení dopadů GND. Udržitelnost je podle šéfů tuzemských firem zčásti zátěž, ale také příležitost pro rozšíření zákaznické základny.**1) 2)**

Jednou z firem, která má propracovanou strategii pro transformaci na bezemisní ekonomiku je ČEZ, a. s. **3)** Ve své Vizi 2030 společnost rozpracovala detailní projekt, jak proměnit vnitřní procesy i proměnit portfolio služeb. V segmentu Environmental plánují výstavbu obnovitelných zdrojů a připravují snížit podíl energie vyrobené z uhlí. Podle Vize 2030 to v roce 2019 bylo 39 procent, pro rok 2025 bylo plánováno 25 procent a v roce 2030 by to mělo být 12,5 procenta.**3)**

Další strategie transformace podniků skupiny Orlen Unipetrol plánuje produkci části petrochemie realizovat z 15 % na bázi recyklovaných odpadů. **4)**

Ve strategii BASF je uvedeno, že do roku 2030 sníží emise CO2 o 25 % proti roku 2018 a budou usilovat o klimatickou neutralitu do roku 2050. Do roku 2025 chtějí zpracovat 250 kt recyklovaných surovin a surovin založených na odpadech.

Ve strategii Spolchemie uvažují do roku 2030 snížit uhlíkovou stopu o 40 %. Chtějí také snižovat znečištění – do roku 2030 mají cíl snížit specifickou produkci odpadu o 20 % a snížit specifické znečištění odpadních vod o 15 %.

Zdroj:

***1)** Studie proveditelnosti a dopadu Zelené dohody pro Evropu a dekarbonizace průmyslu do chemického sektoru ČR s akcentem na zaměstnanost, SCHP ČR 2020*
***2)** Opportunities and Challenges Brought by Fit for 55 to the Chemical Industry – the Czech Example. SCHP ČR 23. 2. 2021*
***3)** Čistá energie zítřka, Vize 2030 ČEZ, červenec 2021*
***4)** T. Herink: Development trends of the Orlen Unipetrol Group, ICCT konference Mikulov, 2022*

5.2. Konverze a skladování energií

Rozvoj intermitentních zdrojů (zdrojů s kolísavou výrobou) *a* probíhající dekarbonizace samozřejmě kladou na provozovatele nové výzvy, zejména v oblasti řízení (regulovatelnosti) soustavy. Změny ve zdrojové základně však probíhají postupně a plánovaně a jednotliví provozovatelé se na ně dlouhodobě připravují. Elektřina vyráběná ze slunce a větru v sobě skrývá zmíněné riziko výkyvů dodávek v síti; na možnostech ukládání takto získané energie – například do velkých bateriových systémů, či do přeměny na vodík, se ale intenzivně pracuje. Elektřinu zatím nelze dlouhodobě a ve velkém skladovat. V současnosti se hovoří hodně o zeleném vodíku a biometanu. Výroba biometanu rychle roste – v roce 2025 dosáhla 179 GWh (meziročně +130 %). Evropská komise zařadila jadernou energetiku v rámci taxonomie EU mezi přechodné udržitelné činnosti, doprovodila to ale řadou podmínek (například

připraveností úložišť použitého jaderného paliva), jež nebude snadné splnit. Původní strategie postupného odstavení uhelných zdrojů a rekonstrukce vybraných uhelných elektráren na plynové elektrárny se v důsledku války na Ukrajině mění. Roste význam úspor energií a potřeba alternativní, obnovitelné energie. Vzestup solárních a větrných technologií a požadavky snižovat emise z výroby klade na chemický průmysl velké nároky. To také dává chemickému průmyslu příležitost vyvinout správné materiály pro překonání technologických výzev v této oblasti. V současné době se zkoumá celá řada materiálů a sloučenin, které nutně vytvoří značnou poptávku po surovinách a chemikáliích. Kromě toho poroste také role chemického průmyslu v úvahách o konci životnosti výrobků a jejich recyklaci.

5.2.1. Solární články

Rozvoj fotovoltaiky vyžaduje posuzování celého životního cyklu technologií, včetně výroby materiálů, spotřeby energie, dopravy, provozu a recyklace. Významnými výzkumnými tématy jsou snižování materiálové náročnosti, náhrada kritických surovin, prodlužování životnosti panelů a zvyšování účinnosti recyklace skla, hliníku, křemíku a dalších složek.
Solární energie je nejrychleji rostoucí ze všech obnovitelných zdrojů.

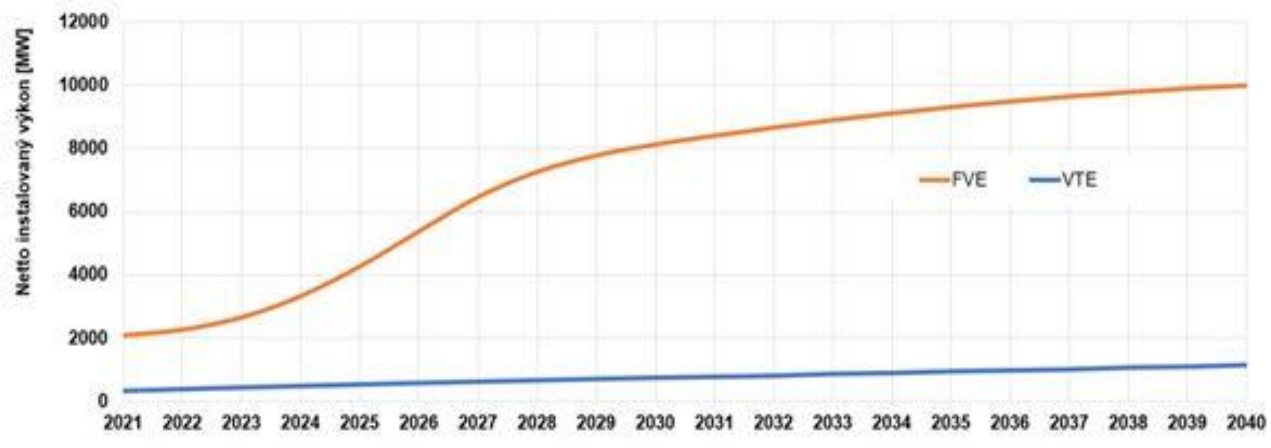
Česká fotovoltaika rostla i během pandemie. Dopady války na Ukrajině a nebezpečí zastavení dodávek zemního plynu z Ruska zvýšily v letech 2022–2023 zájem veřejnosti o fotovoltaiku, tepelná čerpadla nebo další zdroje získávání tepla.
Na konci roku 2025 bylo v ČR v provozu přibližně 239 tisíc fotovoltaických elektráren o celkovém výkonu 5,16 GWp. V roce 2025 přibylo 696 MWp, tj. o 271 MWp méně než v roce 2024; nejvíce se propadl segment domácností.
Samotná přeměna sluneční energie na elektřinu probíhá bez vzniku škodlivých emisí, ale totéž se nedá říct o ostatních procesech, které se s fotovoltaikou spojují. Do celkové uhlíkové stopy solárních panelů se promítá jejich výroba, přeprava, montáž, údržba, demontáž a likvidace, tedy celý poměrně dlouhý životní cyklus.
Odhaduje se přitom, že v přepočtu na vyprodukovanou kilowatthodinu elektrického proudu vzniká u fotovoltaiky zanedbatelná uhlíková stopa odpovídající 0,03 – 0,08 kg CO_2. Solární panely svou uhlíkovou stopu „splatí“ zhruba za 3 roky práce. V zahraniční literatuře se často udává pojem carbon debt neboli „uhlíkový dluh“. Jedná se o metriku vyjadřující rozdíl mezi množstvím vyprodukovaného oxidu uhličitého při výrobě daného zařízení vs. množství, které je samotnou činností uspořen.
Čína má rozhodující podíl na světové výrobě fotovoltaických modulů i na nově instalovaném výkonu solárních a větrných zdrojů. Původní cíl dosáhnout do roku 2030 celkové instalované kapacity 1 200 GW větrných a solárních zdrojů překonala již v roce 2024. Na konci roku 2025 dosáhl instalovaný výkon fotovoltaiky v Číně 1 200 GW (za rok 2025 přibylo 315 GW). Celosvětově bylo v roce 2025 instalováno rekordních 664 GW fotovoltaiky, z toho 57 % v Číně, a celková světová kapacita na počátku roku 2026 překročila 3 TW.
Fotovoltaika zažívá obrovský boom hlavně díky klimatickým cílům jednotlivých států. V Austrálii využívá střešní solární panely každá třetí domácnost, v USA do konce roku 2025 znásobila instalovanou kapacitu slunečních elektráren na cca 279 GW, a tak bude tento zdroj

energie stále dostupnější a výhodnější. Největší fotovoltaickou elektrárnou na světě je Gonghe Talatan Solar Park v Číně s instalovaným výkonem 15-16 GW. Celková kapacita čínských fotovoltaických elektráren dosáhla na konci roku 2025 přibližně 1 200 GW, což z Číny činí jednoznačně největšího světového uživatele fotovoltaiky.

Indie chce být světovou jedničkou v oblasti solární energetiky do roku 2050. S cílem produkovat nulové emise skleníkových plynů nejpozději v roce 2070 se Indie pouští do intenzivního využívání obnovitelných zdrojů energie, které by nahradily spalování fosilních paliv ve starých elektrárnách. V květnu 2026 dosáhl instalovaný výkon solárních elektráren v Indii přibližně 157 GW; v roce 2025 Indie instalovala 45,7 GW a stala se druhým největším solárním trhem světa. Dále plánuje tato země i podporu decentralizovaných energetických zdrojů, jako jsou střešní solární panely pro domácnost.

Pořizovací cena solárních panelů v posledním desetiletí výrazně klesala. Po přechodném zdražení v letech 2021–2022, způsobeném pandemií covidu-19, válkou na Ukrajině a růstem cen energií a dopravy, ceny modulů v letech 2023–2025 v důsledku čínských nadkapacit prudce klesly na historická minima. To urychluje instalace, zároveň však výrazně oslabilo evropské výrobce fotovoltaických komponent. Prudké zdražování energií pak negativně ovlivňuje výrobu hliníku v EU.
Počet fotovoltaických elektráren v ČR překročil v roce 2025 hranici 239 tisíc, velkou část tvoří střešní instalace na rodinných domech podporované z programu Nová zelená úsporám a Modernizačního fondu. ČR přitom patří k zemím EU s nadprůměrnou energetickou náročností na jednotku HDP. Cíl Evropské unie snížit emise o 55 procent se tak nemusí plnit jen zvyšováním výroby z obnovitelných zdrojů, ale hlavně snížením spotřeby energie.

Podle realistického scénáře studie ČEPS z roku 2022 měl instalovaný výkon fotovoltaických elektráren v ČR do roku 2030 vzrůst na 8 000 MWp, v progresivním scénáři na 12 000 MWp (viz obr. č. 1). Aktualizovaný Vnitrostátní plán ČR v oblasti energetiky a klimatu (prosinec 2024) počítá pro rok 2030 s 10,1 GWp. Skutečný instalovaný výkon činil na konci roku 2025 5,16 GWp a v polovině roku 2026 5,36 GWp. Po rekordních letech 2023–2024 tempo výstavby výrazně zpomalilo (2025: +696 MWp, 1. pololetí 2026: +295 MWp), a dosažení cíle pro rok 2030 proto bude vyžadovat výrazné zrychlení.



Zdroj : **1)**

Základní požadavky na vývoj solárních článků:

- Zvýšení účinnosti min. o 10 % (zvýšit účinnost přeměny energie)
- Snížení spotřeby stříbra, india a dalších kritických surovin
- Zvýšení bezpečnosti
- Vyrábět ze slunečního záření energii za srovnatelné náklady s konvenčními elektrárnami
- Snížit výrobní náklady na instalaci fotovoltaických článků.

Dalším významným parametrem z hlediska ekonomiky je životnost solárních panelů. Zatímco první panely měly životnost kolem 10 let, což vyvolalo vášnivé diskuse, kdo ponese náklady na likvidaci a recyklaci starých panelů, dnes se VaV zaměřuje na cíl dosáhnout životnosti fotovoltaické elektrárny až 40 let. Limitujícím faktorem pro dlouhé roky provozu se tak u fotovoltaických elektráren stává spíše kvalita nosné konstrukce pod samotnými panely a trvanlivost dalších potřebných částí, které jsou nutné k provozování fotovoltaické elektrárny.

V dnešní době VaV řeší řadu koncepcí modernizace solárních panelů. Vzhledem k rostoucí poptávce po zdrojích čisté energie se pozornost odborného světa zaměřuje např. na organické FV články s využitím TiO_2 a metalo-organického aktivního prvku. Výrobní náklady na tyto články jsou asi třikrát nižší ve srovnání s křemíkovými. Slabinou TiO_2 článků je dosud menší citlivost na světelné záření než u křemíku a nižší životnost. Organické a polymerní solární články představují v budoucnu zajímavý směr zelené energie.
Další nadějnou cestou jsou nanovlákna, která budou schopna nahradit jak klasické křemíkové články, tak i novou generaci článků s nanokompozity. Nabízí možnost fungování i za snížených světelných podmínek, tedy bez slunečního svitu. Fullerenové akceptory elektronů byly široce používány v organických polymerních solárních článcích, stejně jako v perovskitových solárních článcích. Fotovoltaická účinnost může být ovlivněna fullerenovým stereomerem, pokud byl nový derivát fullerenu navržen jako elektronový akceptor.

Perspektivně se v ČR vyvíjí i technologie založená na uchování sluneční energie v solárních panelech schopných chemické vazby. Elektrony se ukládají přímo do molekul, které umí do své struktury zabudovat vždycky dva elektrony a vytvoří chemickou vazbu. Ta, když se

rozruší, elektrony uvolní, takže tyto molekuly tedy fungují jako baterie. Jde o organické látky, tedy takové, které neobsahují žádné atomy kovů. Díky tomu vědci předpokládají, že můžou mít nižší ekologický dopad než např. systémy obsahující těžké kovy. Zkoumané látky dokážou chemicky reagovat se světlem. Současné řešení je kombinace solárních panelů a nabíjecích baterií. Takové zařízení by všechno kombinovalo do jednoho materiálu, tedy solárního panelu, který bude vyrábět elektrický proud a zároveň se nabíjet. Už tedy nebude potřeba ho kombinovat s nějakou baterií, s tím, že díky tomu nebude potřeba elektrickou energii nikam přenášet. Takové solární články by zároveň byly výrazně levnější a mohly by se snadno vyrábět ve velkém množství. Nebudou vypadat tak, jak je dnes známe ze střech nebo z polí, ale budou to tenké fólie vytištěné na běžné tiskárně.
Tento projekt řeší tým Tomáše Slaniny z Ústavu organické chemie a biochemie Akademie věd ČR. O tom, že se jedná o velice zajímavý projekt, svědčí to, že ho svým grantem podpořila Evropská výzkumná rada. Jejich výzkumný projekt patří do tzv. kategorie high risk / high gain. Komerční využití lze předpokládat nejdříve po roce 2030. Nová metoda by mohla způsobit revoluci ve výrobě a uchovávání elektrické energie. Vědci vidí v obnovitelných zdrojích cestu dopředu v decentralizaci výroby, tedy malých elektrárnách a lidé tak budou méně závislí na externí elektrické síti.

Perovskity pro efektivní nízkonákladovou fotovoltaiku **2), 3), 4)**
Chemický výzkum zkoumá a vyvíjí nové typy materiálů, aby byly solární články účinnější. V této oblasti jsou perovskitové solární články (PSC) považovány za velmi slibnou technologii solární energie. Perovskity jsou třídou minerálů se specifickou strukturou vykazující nespočet zajímavých vlastností, jako je supravodivost, magnetorezistence a symetrie materiálu. Jejich výrazná krystalická struktura, kterou umožňují chemické složky methylamonium trihalogenidu olovnatého, je činí ideálními pro efektivní, nízkonákladovou fotovoltaiku.
PSC zahrnují sloučeninu se strukturou perovskitu, obvykle hybridní organicko-anorganický materiál na bázi halogenidu olova nebo cínu, jako svou aktivní vrstvu pohlcující světlo. Články dokážou absorbovat velkou část viditelného slunečního spektra, což vede k relativně vysokému výnosu. V laboratorních podmínkách bylo u jednopřechodových perovskitových článků dosaženo certifikované účinnosti téměř 27 %, což převyšuje účinnost běžných komerčních křemíkových modulů (přibližně 21–23 %). Mezi další velké výhody PSC patří jejich relativně nízké výrobní náklady, flexibilita a nižší hmotnost. Protože nejvíce prozkoumaným typem PSC materiálu je methylamoniumtrihalogenid olovnatý, tento typ technologie se stále potýká s velkými problémy se stabilitou, které brání jeho komerčnímu využití. Materiál je citlivý na vlhkost a v běžných venkovních podmínkách degraduje. To nepříznivě ovlivňuje výkon i životnost, a co je důležitější, může vést k toxickému znečištění jodidem olovnatým z článků. To je také důvod, proč se výzkumné a vývojové úsilí nezaměřuje pouze na zlepšení účinnosti technologie, ale také na zvýšení její vodoodpudivosti díky zapouzdření materiálu. Zkoumají se také další alternativy, jako je bezolovnatý jodid cesno-zlatný ($Cs_2Au_2I_6$), pokud jde o nahrazení olova v materiálu, aby se čelilo dopadu znečištění. Jedna z možných aplikací PSC spočívá v jejich kombinaci s tradiční technologií křemíkových solárních článků. Tandemové perovskit-křemíkové články dosáhly v laboratorních podmínkách certifikované účinnosti 34,85 % (LONGi, 2025). Tato kombinace by mohla využít široké využití a stávající kapacitu běžných solárních článků, které tvoří asi 90 % podílu na trhu fotovoltaiky. První perovskitové a tandemové moduly se již vyrábějí v pilotních a malosériových linkách (např. Oxford PV, čínští výrobci), dlouhodobá stabilita v reálném

provozu však zůstává hlavní otázkou. Jakmile bude nalezeno řešení problémů se stabilitou, PSC by mohly potenciálně posunout zelenou solární elektřinu na novou úroveň z hlediska účinnosti, flexibility a výroby.
Cena by měla být oproti dnešním křemíkovým panelům o 30 až 50 procent nižší. Klíčové je, že ve výsledku jsou solární panely z perovskitu lehké, flexibilní, mají vyšší účinnost a oproti těm běžným křemíkovým je lze vyrábět za nižších teplot, a tedy i levněji, a to běžným sítotiskem. Firmy je mohou tisknout třeba na ohebné pásky a potahovat se jimi dají i okna. Jeden metr čtvereční křemíkového panelu zvládne nahradit zhruba 0,6 až 0,7 metru čtverečního perovskitových fotovoltaických článků.
Perovskitové solární články nabízejí zajímavou alternativu; lze je tisknout z inkoustů, díky čemuž jsou levné, vysoce účinné, tenké, lehké a flexibilní. Nicméně zaostávají za křemíkovými solárními články ve stabilitě.
S těmito problémy by mohly pomoci nové materiály obsahující kovy zvané ferroceny. Ferroceny jsou sloučeniny se železem ve svém středu obklopené sendvičovými kruhy uhlíku. Výzkumníci z City University of Hong Kong přidali do perovskitových solárních článků ferroceny, čímž výrazně zlepšili jejich účinnost a stabilitu. Jednou z vlastností vyplývající ze struktury ferrocenů je, že umožňují elektronům snadněji se pohybovat z perovskitové vrstvy do následujících vrstev, čímž se zlepšuje účinnost přeměny sluneční energie na elektřinu.
Křemíkové FV panely jsou dnes účinné i levné, jejich účinnost se však blíží teoretickému limitu; pro další zrychlení přechodu na obnovitelnou energii jsou proto potřeba nové typy solárních článků. Stabilní a účinné perovskitové články tak mohou v důsledku podstatně rozšířit využití sluneční energie.
Vývoj poloprůhledných solárních článků, které přemění okna na aktivní generátory energie, se nedávno dočkal významného pokroku. Tým australských vědců vyrobil perovskitové články nové generace s účinností konverze 15,5 % a zároveň s průchodem více přirozeného světla. Pro srovnání – klasické neprůhledné střešní články na bázi křemíku pracují s účinností přibližně 21–23 %.
Profesor Jasieniak se svým týmem díky kombinaci cesia a formamidinia v minerální struktuře perovskitu vytvořil hned několik prototypů solárních článků s různými vlastnostmi. Za zmínku stojí hlavně modely, u nichž bylo dosaženo účinnosti přeměny energie 15,5 % a 4,1 % s průměrnou propustností viditelného záření 20,7 % a 52,4 %. I když konverze energie je u nich nižší, množství procházejícího viditelného světla je už řadí k materiálům vhodným pro zasklení oken a skleněných fasád. Realizace vysoce účinných a stabilních perovskitových zařízení, jako solární okna, by zaplnila momentálně z velké části nevyužitou tržní příležitost. Cesium a formamidinium v perovskitových článcích také prokázaly vynikající dlouhodobou stabilitu, když byly testovány při nepřetržitém osvětlení a zahřívání. Výsledky výzkumu ukazují, že ST-PeSC panely (Poloprůhledné perovskitové solární články) si udržely 85 % své počáteční účinnosti přeměny energie i po 1000 hodinách nepřetržitého osvětlení. Sklo již nebude jen stavebním materiálem, ale také obnovitelným zdrojem energie a klíčovým prvkem v úsilí o dekarbonizaci stavebnictví.
Japonský výzkumný tým Toshiakiho Kata vyrobil vysoce průhledný solární článek s 2D atomární vrstvou**.** Tyto téměř neviditelné solární články dosahují průměrné průhlednosti 79 %, což znamená, že je lze teoreticky umístit kamkoli – na okna budov, čelní skla automobilů, a dokonce i na lidskou kůži. **5)**
Pro výrobu solárního článku tým testoval kontaktní bariéry mezi oxidem india a cínu (ITO), jedním z nejpoužívanějších transparentních vodivých oxidů, a jednovrstvým disulfidem

wolframu. Na ITO nanesli různé tenké vrstvy kovu a mezi ITO a disulfid wolframu vložili tenkou vrstvu oxidu wolframu. Způsob, jakým byl solární článek vytvořen, vedl k více než tisíckrát vyšší účinnosti přeměny energie ve srovnání se zařízením využívajícím konvenční ITO elektrodu. Vědci také zkoumali, jak by se jejich solární článek dal zvětšit pro použití ve skutečném solárním panelu. Před výzkumníky ještě stojí řešení technických otázek jako je zvětšení panelu na průmyslovou velikost a konstrukční úpravy potřebné k tomu, aby nedocházelo k neočekávanému poklesu napětí, který je spojen se zvětšením plochy zařízení.

Další náměty z VaV v této oblasti:

- Termofotovoltaické články (TPV), které přeměňují teplo na elektřinu.

Termofotovoltaické články přeměňují na elektřinu tepelné záření silně zahřátého emitoru: fotony s dostatečnou energií překonají tzv. „pásmovou mezeru“ polovodiče a vyrábějí elektřinu. Dříve dosahovaly články TPV nejvýše kolem 32% účinnosti; v roce 2022 však tým MIT a NREL dosáhl účinnosti přes 40 % (41,1 % při teplotě emitoru přes 2 000 °C), což je výkon srovnatelný s elektrárnami s parní turbínou.
Někteří odborníci stále chovají naději, že se může podařit najít dostatečně levné, a přitom účinné materiály, díky kterým by se termoelektrické generátory mohly dočkat výrazně většího rozšíření. Nejspíše by samozřejmě mohly sloužit k výrobě elektřiny z tepla, které je „zadarmo“, tedy tepla odpadního. Přesně to je případ i jejich využití ve fotovoltaických panelech. Ty se během dne na slunci pochopitelně zahřívají. To nejen snižuje jejich účinnost, ale teoreticky také dává příležitost termoelektrickým systémům, aby svou měrou přispěly k výrobě elektřiny. Panely jsou totiž teplejší než okolí, a tohoto rozdílu teplot dokáže termoelektrický generátor využít.

- Tandemové solární články

Nový solární článek je založen na architektuře známé jako invertované metamorfní vícepřechodové články (IMM – inverted metamorphic multijunction) a obsahuje tři “přechody”, tedy součásti, které v reakci na světlo vyrábějí elektrický proud. Každý z těchto přechodů je vyroben z jiného materiálu – v tomto případě je to fosfid galia a india (GaInP) v horní vrstvě, arsenid galia (GaAs) uprostřed a arsenid galia a india (GaInAs) ve spodní vrstvě. Tyto tři materiály se specializují na různé vlnové délky světla, což umožňuje solárnímu článku jako celku získávat více energie z celého světelného spektra. Dalším pokrokem, který přispěl k nové rekordní účinnosti, bylo vytvoření střední vrstvy s kvantovými studnami. V podstatě jde o to, že vložením vodivé vrstvy mezi dva další materiály s širší pásmovou mezerou se elektrony omezí na dva rozměry, což materiálu umožní zachytit více světla. Střední vrstva tohoto solárního článku obsahovala až 300 kvantových studen, což zvýšilo celkovou účinnost na novou úroveň. Tým vědců z Národní laboratoře pro obnovitelnou energii (National Renewable Energy Laboratory, NREL; od prosince 2025 přejmenována na National Laboratory of the Rockies) amerického ministerstva energetiky vytvořil takový solární článek s rekordní účinností 39,5 % při běžném slunečním osvětlení, čímž překonal světový rekord v účinnosti solárních článků.
Tento průlom může být důležitý pro technologii solárních článků, ale výroba tohoto typu článku je stále poměrně nákladná. Bude zapotřebí další výzkum, aby se tyto náklady snížily a tato technologie byla dostupnější.

Na konci roku 2025 dosáhl instalovaný výkon fotovoltaiky v EU 406 GW (DC); v roce 2025 přibylo 65,1 GW, poprvé o něco méně než v předchozím roce. Cílem strategie EU pro solární energii je 750 GW (DC), resp. 600 GW (AC) do roku 2030, podle SolarPower Europe však EU tento cíl pravděpodobně nesplní. Naprostá většina dovážených panelů i klíčových komponent (polysilikon, ingoty, wafery, články) pochází z Číny, která má ve výrobě fotovoltaiky téměř monopolní postavení; ve světě se v roce 2025 instalovalo 664 GW nového výkonu. Jedním z hlavních nástrojů nové energetické strategie EU (REPowerEU) má být masivní rozšíření solárních elektráren například na všech vhodných střechách veřejných a komerčních budov od roku 2025 a pro nové obytné budovy od roku 2029. K problematice energetické bezpečnosti se Evropská komise postavila v květnu 2022 plánem REPowerEU. Naplnění strategie REPowerEU má Evropu zbavit závislosti na ruském plynu. Komise navrhovala zvýšení podílu energie z OZE na 45 % do roku 2030; schválená směrnice RED III (EU) 2023/2413 stanovila závazný cíl 42,5 % s ambicí 45 %. **6)**

V SVA 4 z roku 2019 **7)** jsme se v dlouhodobém horizontu zabývali i dalšími náměty jako např.

- koncentrační fotovoltaika budoucí generace fotovoltaické architektury, která bude využívat nanotechnologie a další pokročilé technologie, např. nanodrátky nebo polovodičové kvantové tečky;
- vývoj solárních článků třetí generace (např. DYE sensitized solar cells, DSSC);
- vývoj vícevrstvých solárních článků (z tenkých vrstev) a solárních článků s vícenásobnými pásy

Výzvy pro chemický průmysl v oblasti modernizace solárních článků:

- Vývoj pokročilých materiálů pro tenkovrstvé anorganické solární panely a nižší výrobní náklady se zaměřením na různé polovodičové materiály (včetně absorpčních materiálů, které se neopírají o kritické kovy, jako je Cu, Zn, Sn sulfid technologie), nové materiály pro zpětné a vyrovnávací vrstvy, nákladově efektivní multifunkční nátěry, funkční (nano) materiály pro nanášení bez vakuového absorpčního procesu a / nebo řízení světla pomocí plasmonových efektů nebo rozptylu a ultra tenkých (monokrystalických) křemíkových vrstev (pod 50 mikronů) k nahrazení současných nejmodernějších křemíkových destiček (pod 200 mikronů).
- Vývoj pokročilých materiálů pro tenkovrstvé organické fotovoltaické panely s důrazem na optimalizaci pro zvýšenou účinnost s širší spektrální odezvou pro jednoduché a vícenásobné spojení. Trvanlivost těchto materiálů je také klíčovým bodem, který je třeba řešit. Procesy s vysokou propustností potřebují pokročilé materiály přizpůsobené formulacím inkoustu. Zvýšení efektivity řízením světla plazmonickými účinky a rozptylu v aktivních vrstvách i na různých dalších rozhraních bude vyžadovat funkční nanomateriály s řízeným a škálovatelným výrobním procesem.

- Vývoj pokročilých materiálů pro zlepšené uzavírací vrstvy a lepidla na bariérové vrstvy, které zahrnují nové pružné, lehké, průhledné bariérové materiály (případně včetně kompozitních materiálů) s odpovídajícími rychlostí přenosu vodních par.
- Pokročilé materiály pro alternativní vodiče nebo materiály, které se nespoléhají na potenciálně vzácné kovy a jsou výrazně levnější než současné materiály jako oxid india a cínu (ITO) pro materiály s velkým povrchem, ale poskytují přinejmenším podobný výkon.
- Pokročilé materiály pro řízení světla zajišťují nízký náklad na zlepšení světelné vazby a absorpce na fotoaktivní vrstvy pomocí optických povlaků, nano imprinting / nano structuring, fotonických struktur, vícevrstvé optiky, plazmoniky / nanočástic a reflexních vrstev s vysokým zákalem pro ultratenké křemíkové solární články.
- Pokročilé materiály pro fotovoltaické panely integrované do budov (BIPV) pro vývoj speciálních substrátů (sklo nebo jiné materiály), které lze snadno integrovat do budov
- Vývoj technologie založená na uchování sluneční energie v chemických vazbách – nabíjecí solární panely.
- Termofotovoltaické články (TPV), které přeměňují teplo na elektřinu.
- Zlepšení v současnosti omezené chemické stability PSC kvůli jejich citlivosti na vlhké podmínky, nahrazení olova netoxickými složkami
- Pokračovat ve vývoji nabíjecích solárních panelů
- Efektivní recyklaci starých fotovoltaických článků (zejména zpětné získávání Si, Ag, Cu, Al a skla)

5.2.2. Tepelná čerpadla

Tepelná čerpadla získávají zejména v důsledku války na Ukrajině a hledání nových zdrojů energií stále více na významu. Tepelné čerpadlo je zařízení, které čerpá teplo z jednoho místa na jiné s vynaložením vnější práce. Nejčastějším typem je kompresorové tepelné čerpadlo. Pracuje na principu obráceného Carnotova cyklu. Jednou z charakteristik práce tepelného čerpadla je topný faktor. Ten udává efektivitu práce tepelného čerpadla jako poměr vyrobeného tepla a spotřebované energie.
Přístup k energii, kterou využívají tepelná čerpadla, máme všichni. A užívat ji můžeme bez následků na životním prostředí. Díky tepelným čerpadlům lze ušetřit až 60 % nákladů na vytápění domu a ohřev vody. Existuje řada typů tepelných čerpadel podle toho odkud se odebírá teplo a do jakého média ho převádí (země-voda, vzduch-voda, voda-voda, vzduch – vzduch). Topný provoz omezí jednak mrazy cca od −15 °C do −28 °C a také vysoké teploty nad 45 °C.
Tepelné čerpadlo s nulovými emisemi oxidu uhličitého a vysokou účinností vytvořené odborníky ze španělské univerzity by mohlo být efektivní náhradou za plynové kotle nejen v tuzemských domácnostech. Dokáže vyrábět vodu pro vytápění o teplotě až 75 °C. V souvislosti s energetickou krizí ale i problémy, které potenciálně mohou čekat dodávky zemního plynu z Ruska do Evropy se stále rychleji pracuje na hledání řešení, které by spalování zemního plynu v plynových kotlích nahradily. Jedním z nich by mohlo být i první tepelné čerpadlo pro domácnosti, které neprodukuje žádné emise oxidu uhličitého, a navíc

dokáže vyrábět vodu pro vytápění o teplotě až 75 °C. Výhodou nového typu tepelných čerpadel je i vyšší teplota, kterou používají k vytápění. Ta se vyrábí s velmi vysokou energetickou účinností, což u běžných tepelných čerpadel nebylo možné. Čerpadlo je pak možné snadno nainstalovat jak do novostaveb, tak i do současných budov jako náhradu za plynové kotle.

V oblasti tepelných čerpadel REPowerEU vychází z již dříve avizovaných ambiciózních cílů stanovených v březnu 2022 6). Tyto cíle vyžadují, aby:

- Do konce roku 2026 by mělo být v EU instalováno 20 milionů tepelných čerpadel
- Do konce roku 2030 by mělo být v EU instalováno 60 milionů tepelných čerpadel, přičemž do tohoto cíle navrhuje přidání 10 milionů tepelných čerpadel s hydronickým vyvažováním v příštích pěti letech a celkem 30 milionů tepelných čerpadel s hydronickým vyvažováním do roku 2030.

Společnost Panasonic otevřela v srpnu 2025 v Plzni nový závod na výrobu tepelných čerpadel vzduch-voda s investicí přibližně 8 mld. Kč (a dalšími více než 600 mil. Kč do vývojového centra). Roční výrobní kapacita má do roku 2030 dosáhnout 1,4 milionu vnitřních a venkovních jednotek.

Zdroje:

1) *Studie ČEPS „Hodnocení zdrojové přiměřenosti výrobních kapacit elektrizační soustavy ČR do roku 2040“, ČEPS únor 2022*

2) *Německá CM Roadmap Chemie 2050, Eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI.2019*

3) *Cheaper solar cells could be on the way thanks to new materials, ScienceDaily April 21, 2022*

4) *Jae Choul Yu a kol.: High-Performance and Stable Semi-Transparent Perovskite Solar Cells through Composition Engineering Advanced Science, 2019*

5) *Kato T.: P*Průhledný solární článek s 2 D atomární vrstvou**.** *nature.com, thebrighterside.news, srpen 2022*

6) *Plán REPowerEU, COM (202**2)** 230 final, Brusel 18. 5. 2022*

7) *SVA 4 SUSCHEM CZ 2019*

5.3. Ukládání energie

5.3.1. Baterie

Obnovitelné zdroje žádají mnohem výkonnější baterie. Díky rozmachu obnovitelných zdrojů energie není v současné době ani tak limitujícím faktorem energetické revoluce dodávka energie, jako její skladování. K delšímu nabíjení automobilů, elektrokol a zařízení jsou zapotřebí čistší a ekologičtější baterie. Problém je, že i ty nejlepší baterie mají své limity. Jedním z nich je, že lithium-iontové články používají jako klíčovou součást lithium. Evropa je stále závislá na dovozu této strategické suroviny. Lithiové baterie jsou také drahé, mají

omezenou kapacitu a po opakovaném nabíjení ztrácejí výkon. Navíc Li-iontové baterie jsou nebezpečné a mohou v případě poškození vybuchovat nebo hořet.

Evropská komise zdůraznila dlouhodobé skladování energie jako klíčové pro přechod k uhlíkově neutrální ekonomice. Tomu odpovídá zájem o vývoj nových druhů baterií a dalších systémů pro ukládání energie (včetně vodíku nebo metanolu). Mnohé však mají zásadní nevýhody. Baterie se potýkají s omezenou kapacitou a životností, vodík jako palivo je zase těžko skladovatelný. Také proto probíhá intenzivní vývoj nových typů baterií.

Základní požadavky na vývoj nových koncepcí baterií:

- Zvýšení výkonu, delší výdrž než jejich předchůdci
- Vyvinout baterie s energetickou hustotou až 10x vyšší, než je u současných Li-ion baterií
- Kratší doba nabíjení.
- Bezpečnost
- Delší životnost
- Naplnění požadavků nových regulačních předpisů EU pro baterie

Ideální představa: Dobitý elektromobil během pár minut a kardiostimulátor s výdrží půl století.

Trh s bateriemi v roce 2040 je celosvětově predikován přes 5 000 GWh. Významnou roli dnes hrají lithium-iontové baterie. Očekává se, že poptávka po bateriovém skladování energie v nadcházejících desetiletích výrazně vzroste, protože svět se odklání od fosilních paliv k ekologičtějším zdrojům energie. Trh elektrických vozidel představuje téměř 80 % poptávky po lithium-iontových bateriích. Vysoké ceny ropy a dopady války na Ukrajině podporují další trhy, aby zavedly dopravní politiku s nulovými emisemi, což způsobuje, že poptávka po lithium-iontových bateriích raketově vzroste a do roku 2030 překročí 3 000 GWh. Aby výrobci baterií vyhověli této rostoucí potřebě, hledají způsoby, jak zvýšit jejich kapacitu. Je to i otázka strategické bezpečnosti EU, protože Asijsko-pacifický region v čele s Čínou představoval v roce 2021 90 % světové výroby baterií. Rostoucí spotřeba těchto baterií zvyšuje spotřebu Li, ale i kobaltu, a to žene jejich ceny prudce vzhůru. Např. cena kobaltu v roce 2021 vzrostla o 120 %, ještě vyšší nárůst byl zaznamenán u lithia; po roce 2022 však ceny lithia výrazně klesly (průměrná cena bateriového uhličitanu lithného v roce 2025 činila cca 9 000 USD/t, o 31 % méně než v roce 2024). V důsledku tohoto vývoje dochází ke změně strategie výrobců baterií, kteří na situaci reagují tím, že snižují podíl kobaltu v akumulátorech a nahrazují jej levnějším a dostupnějším niklem. Odborníci upozorňují, že těžba surovin na výrobu akumulátorů je omezená, a navíc výrazně zasahuje do životního prostředí. Nejšetrnějším způsobem, jak vzácné kovy získávat, je proto recyklace. Z použitých baterií lze jednoduše separovat například železo a mangan. Další suroviny, jako jsou zinek, nikl či kadmium, se opětovně získávají převážně chemickými procesy. Podle statistik amerického Úřadu pro energetickou účinnost a obnovitelnou energii (EERE USA) pocházelo přibližně 91 % veškerého lithia pro výrobu lithiových baterií pouze ze tří zemí světa, a to z Austrálie (44 %), Chile (34 %) a Argentiny (13 %). Podle USGS se v roce 2025 na světové těžbě lithia (290 tis. t Li) podílely hlavně Austrálie (cca 32 %), Čína (21 %), Chile (19 %), Zimbabwe (10 %) a

Argentina (8 %). Další klíčové suroviny, které jsou využívány na produkci akumulátorů, jsou dováženy z velké části z jediné země. Například zhruba tři čtvrtiny světové těžby kobaltu připadají na Konžskou demokratickou republiku a přibližně 80 % těžby přírodního grafitu na Čínu (USGS, údaje za rok 2024).
Li-iontové baterie založené na materiálu s nejvyšší známou kapacitou mají však řadu nevýhod. Problémy s přehříváním, samovznícením nebo s vybuchováním baterií má mnoho světových technologických firem. Tím, co stojí za častým problémem lithiových baterií, jsou takzvané dendrity vyrůstající z anody. Dokážou totiž prorazit jejich části a zkratovat článek, což u lithium-iontové baterie s tekutým elektrolytem může zapříčinit požár (kapalný elektrolyt je hořlavé rozpouštědlo, které v podstatě jen čeká na vznícení). Dále je často zmiňována vysoká cena, životnost, dobíjecí čas, ale také problematická recyklovatelnost. Tento dynamicky se rozvíjející obor naráží na nedostatek kritických surovin, a proto je důležitý rozvoj recyklace starých baterií.
Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2023/1542 o bateriích a odpadních bateriích stanoví požadavky na udržitelnost, bezpečnost, výkonnost, označování, náležitou péči v dodavatelském řetězci, sběr, recyklaci a využití materiálů. Požadavky se zavádějí postupně podle jednotlivých kategorií baterií a podle účinnosti prováděcích aktů a aktů v přenesené pravomoci. Nařízení rozlišuje tři typy ukazatelů: (1) recyklační účinnost pro lithiové baterie nejméně 65 % do konce roku 2025 a 70 % do konce roku 2030; (2) materiálové využití lithia 50 % do konce roku 2027 a 80 % do konce roku 2031, kobaltu, niklu a mědi 90 % do konce roku 2027 a 95 % do konce roku 2031; (3) minimální podíl recyklovaného obsahu v průmyslových a trakčních bateriích od roku 2031 (16 % kobaltu, 6 % lithia, 6 % niklu, 85 % olova), od roku 2036 pak 26 % kobaltu, 12 % lithia a 15 % niklu.
To otvírá řadu výzev jak pro výzkum, tak pro podnikatele. Řeší se řada velkých projektů budování nových továren na baterie, ale i možnosti vlastní výroby Li v EU. Investice jsou nutné ve všech segmentech dodavatelského řetězce. Podrobně jsme problematiku výzkumu nových baterií řešili v SVA 4 **2)**.

Tradiční lithium-iontové baterie mají grafitovou anodu, katodu z oxidů kovů a kapalinu zvanou elektrolyt. Jednoduše řečeno při vybíjení baterie proudí v elektrolytu elektrony z anody do katody a napájejí zařízení, ke kterému je připojena. Při nabíjení baterie probíhá tento proces opačně. Celý proces je vratnou elektrochemickou reakcí. Existuje mnoho variant tohoto základního procesu s různými druhy zapojených chemických látek a iontů. Konkrétní možností, kterou zkoumají vědci, je odstranění kapalného elektrolytu a jeho nahrazení pevnou látkou nebo gelem. Teoreticky mají tyto baterie v pevné fázi vyšší hustotu energie, což znamená, že mohou napájet zařízení po delší dobu. Měly by být také bezpečnější a rychlejší na výrobu, protože na rozdíl od typických lithium-iontových baterií nepoužívají hořlavý tekutý elektrolyt.

Ve světě se tedy hledají další alternativy vhodných baterií pro různé aplikace. Rozvíjí se řada moderních koncepcí baterií jako např. průtokové (flow) baterie, samoopravné (self-healing) baterie, vanadové redoxní baterie, pevnolátkové baterie, sodíkové baterie, snadno recyklovatelné „cukrové baterie“, polovodičové baterie, baterie na bázi grafenu a další. Světový VaV nabízí další „převratné“ alternativy baterií jako např. baterie železo-vzduch, výzkumníci spojili uhlíkové nanotrubice a nanoporézní celulózu, aby vyrobili lithium-iontové baterie a superkondenzátory, které jsou lehčí a pružnější než stávající zařízení. Zejména

nanomateriály poskytují jedinečné vlastnosti nebo kombinace vlastností pro elektrody a elektrolyty v řadě energetických zařízení. Začíná se rozvíjet i technologie výroby baterií 3D tiskem. Budoucnost teprve prokáže, které nové generace baterií se na trhu prosadí.

Vhodnými a nejčastěji používanými látkami pro zápornou elektrodu jsou zinek, lithium, kadmium a hydridy různých kovů, pro kladnou elektrodu oxid manganičitý (MnO2, burel), oxid-hydroxid niklitý (NiO(OH)) a oxid stříbrný (Ag2O). Jako elektrolyt se používají vodné roztoky alkalických hydroxidů (nejčastěji hydroxid draselný), silných kyselin nebo jejich solí. Kromě toho se používají také bezvodé elektrolyty, které obsahují vhodnou sůl rozpuštěnou v organickém rozpouštědle. Případné další látky v galvanických článcích mají za úkol regulovat chemické reakce tak, aby se např. prodloužila životnost článku a snížila možnost úniku nebezpečných látek.

- Lithium-iontové baterie

Lithium-iontové baterie se dodávají v řadě typů a mají různé použití. To znamená, že některé současné lithium-iontové baterie jsou pro konkrétní aplikace vhodnější než jiné. Nejdůležitější je vybrat baterii, která se nejlépe hodí pro daný úkol. Existuje více než jen jeden druh lithium-iontových baterií, a ne všechny jsou si rovny. Zde je pohled na šest typů lithium-iontových baterií. **3)**.

- Lithium-kobalt oxidové baterie (LCO)

Lithium-kobalt oxidové baterie jsou vyrobeny z uhličitanu lithného a kobaltu. Vzhledem k jejich velmi vysoké měrné energii se tyto baterie používají pro mobilní telefony, notebooky a elektronické fotoaparáty. Mají katodu z oxidu kobaltu a jako materiál anody používají grafit. Během vybíjení se ionty lithia pohybují z anody na katodu, přičemž se tok během nabíjení obrátí. Tento typ baterie má některé nevýhody, včetně relativně krátké životnosti baterie a omezeného specifického výkonu. Tyto baterie nejsou tak bezpečné jako jiné typy.

- Lithium-manganové oxidové baterie

Běžně se nazývají lithium-manganátové nebo lithium-iont manganové baterie a někdy jsou označovány jako Li-manganové nebo spinel - manganové. Lithium-mangan oxidové baterie se vyznačují vysokou teplotní stabilitou a jsou také bezpečnější než jiné typy lithium-iontových baterií. Z tohoto důvodu se často používají ve zdravotnických zařízeních, ale mohou být také použity v elektrickém nářadí, elektrokolech a dalších. Je také možné je použít pro napájení notebooků a elektrických vozidel.

- Lithium-železo fosfátové baterie

Lithium-železo fosfátové baterie, také známé jako Li-fosfátové baterie, používají jako katodu fosforečnan lithno-železnatý ($LiFePO_4$). Těží z nízkých odporových vlastností, které zvyšují jejich bezpečnost a tepelnou stabilitu. Mezi další výhody patří odolnost a dlouhá životnost – plně nabité baterie lze skladovat s malou změnou celkové životnosti nabití baterie. Li-fosfátové baterie jsou často cenově nejvýhodnější volbou, pokud vezmeme v úvahu jejich dlouhou životnost. Nižší napětí Li-fosfátové baterie však znamená, že má méně energie než jiné typy lithiových baterií.

V souladu s tím se tyto baterie často používají v elektrických motocyklech a také v jiných aplikacích, které vyžadují dlouhou životnost a významnou bezpečnost. Díky nízké ceně a

bezpečnosti se LFP baterie staly nejrozšířenějším typem baterií pro elektromobily v Číně a rychle se prosazují i v Evropě a ve stacionárních úložištích.

- Lithium-nikl-mangan-kobalt oxidové baterie

známé také jako lithium-mangan-kobalt oxidové nebo NMC baterie, jsou vyrobeny z několika materiálů běžných u typů lithium-iontových baterií. Jejich součástí je katoda vyrobená z kombinace niklu, manganu a kobaltu. Stejně jako ostatní typy lithium-iontových baterií mohou mít baterie NMC buď vysokou specifickou hustotu energie, nebo vysoký specifický výkon. Nemohou však mít obě vlastnosti. Tento typ baterie je nejběžnější v elektrickém nářadí a v hnacích ústrojích pro vozidla. Kombinační poměr katody byl dříve obvykle 60 procent niklu, 20 procent manganu a 20 procent kobaltu (NMC 622); dnes převažují vysokoniklové katody (např. NMC 811). To znamená, že náklady na suroviny jsou nižší než u jiných variant lithium-iontových baterií, protože kobalt je stále dražší. Ceny těchto baterií mohou v budoucnu dále klesat, protože někteří výrobci baterií plánují změnit chemické složení baterií na vyšší procento niklu, aby mohli používat méně kobaltu. Tento typ baterie je běžně preferován pro elektromobily kvůli velmi nízké rychlosti samozahřívání.

- Lithium-nikl-kobalt-hliník oxidové baterie (NCA)

Tyto baterie se nazývají baterie NCA a stávají se stále důležitějšími v elektrických pohonných jednotkách a při skladování energie v síti. Baterie NCA nejsou běžné ve spotřebním průmyslu, ale jsou perspektivní pro automobilový sektor. Poskytují vysoce energetickou možnost s dobrou životností, ale jsou méně bezpečné. Baterie NCA musí být doprovázeny monitorovacími zařízeními, aby byla zajištěna bezpečnost řidiče. Zatím jsou poměrně drahé. Vzhledem k důslednému používání baterií NCA v elektrických vozidlech je možné, že poptávka po těchto bateriích poroste s tím, jak se elektrická vozidla stanou běžnějšími.

- Li-titanát baterie

Je to třída baterií, která umožňuje stále se rozšiřující aplikace. Hlavní výhodou li-titanátové baterie je její pozoruhodně rychlá doba nabíjení díky pokročilé nanotechnologii.
V současné době výrobci elektrických vozidel a jízdních kol používají lithium-titanátové baterie a existuje potenciál pro použití v elektrických autobusech pro veřejnou dopravu. Tyto baterie však mají nižší vlastní napětí nebo nižší hustotu energie než jiné typy lithium-iontových baterií, což může představovat problémy s efektivním napájením vozidel. I tak je hustota lithium-titanátových baterií stále vyšší než u jiných ne-lithium-iontových baterií, což je plus. Aplikace pro tyto baterie mohou zahrnovat vojenské a letecké použití a mohou být také použity pro skladování větrné a solární energie a vytváření inteligentních sítí. Tyto baterie by mohly být také použity v systémově kritických zálohách pro napájecí systémy.

Průmysl lithium-iontových baterií se neustále mění. Společnosti a vědci po celém světě vytvářejí nové baterie, které buď fungují vedle lithium-iontových baterií, nebo je nahrazují (**4)**

Běžné baterie pro elektrická zařízení využívají energii tzv. redoxních chemických reakcí. V nich se elektrony přenášejí z jedné elektrody na druhou prostřednictvím elektrolytu. Tím vzniká rozdíl potenciálů mezi elektrodami. Pokud se pak oba póly baterie propojí vodičem,

začnou proudit elektrony, které tento rozdíl potenciálů odstraní, a vznikne elektrický proud. Chemické baterie, známé také jako galvanické články, se vyznačují vysokou hustotou výkonu – tj. poměrem mezi výkonem generovaného proudu a objemem baterie. Chemické články se však vybíjejí za relativně krátkou dobu, což omezuje jejich použití v autonomních zařízeních. Některé z těchto baterií jsou dobíjecí, ale i ty je třeba pro nabíjení vyměnit. To může být nebezpečné, jako v případě kardiostimulátoru, nebo dokonce nemožné, pokud baterie napájí přístroje na kosmické lodi. Chemické reakce jsou naštěstí jen jedním z možných zdrojů elektrické energie.

Relativně novou skupinou jsou jaderné baterie, které generují energii z beta rozpadu radioaktivního izotopu niklu-63 nebo radioaktivní baterie Nano Diamond. Nanodiamantové baterie jsou alfa, beta a neutronové voltaické baterie a mají několik nových vlastností jako je trvanlivost a bezpečnost. Byly vyvíjeny zejména pro kosmický výzkum. Bohužel hustota výkonu betavoltaických článků je výrazně nižší než u jejich galvanických protějšků.

Další skupinu tvoří radioizotopové termoelektrické generátory, kterým se také říká jaderné baterie, ale fungují na jiném principu. Termoelektrické články převádějí teplo uvolněné radioaktivním rozpadem na elektřinu pomocí termočlánků. Účinnost je však pouze několik procent a závisí na teplotě. Díky své dlouhé životnosti a relativně jednoduché konstrukci se však termoelektrické zdroje energie hojně využívají k napájení kosmických lodí. **6)**

Jednou z hlavních připomínek odpůrců elektromobilů je dlouhá doba nabíjení. Řešení v současné době nabízí americká firma Enovix, která vyvinula novou baterii, která se dokáže nabít na 80 % během 5 minut. Jedná se o křemíkové lithium-iontové baterie, které jsou založené na speciální 3D architektuře a obsahují silikonovou anodu. Právě tato technologie by podle firmy měla umožnit uložení více jak dvojnásobku lithia, než je tomu v případě standardní grafitové anody, která je dnes součástí většiny Li-ion baterií. Nové bateriové články si navíc podle výrobce dokázaly udržet 93 % své kapacity i po překonání tisícovky nabíjecích cyklů, přičemž dalším vývojem lze očekávat prodloužení výdrže.

Mezi tyto nové směry, kterým se věnují vědci i v ČR lze uvést:

- Solid-state battery neboli baterie s pevným elektrolytem

Jedná se o nadějnou technologii považovanou za další vývojový stupeň v oblasti akumulace energie. Do roku 2026 se předpokládala implementace pokrokového projektu Trinity (založený na tzv. „solidstate“ bateriích, tedy bateriích s tuhým elektrolytem), které jsou označované za přelomového nástupce současných Li-Ion baterií. Spuštění projektu bylo aktuálně odsunuto do roku 2032. Komerčně se tyto baterie však zatím neprosadily, byť se v poslední době jejich komercionalizace připravuje (spolupráce Volkswagen a QuantumScape).

Využívají pevné elektrolyty namísto tekutých nebo gelových, které najdeme v lithium-iontových bateriích. Vyznačují se vyšší energetickou hustotou. Pevný elektrolyt napomáhá rychlému pohybu iontů lithia. Tento typ baterie však vyžaduje o více než třetinu více lithia použitého v anodě než současné technologie. Zároveň se sníží potřeba grafitu a kobaltu.

Mezi výhody tohoto typu baterií patří vyšší energetická hustota (tedy více uložené energie), nižší celková spotřeba materiálů znamená snížení uhlíkové stopy z jejich výroby o 24 až 39 % v závislosti na materiálech použitých pro jejich výrobu.

Jedním z technických problémů však je, že zatímco ionty lithia se mohou rychle pohybovat v pevném elektrolytu, dělá jim potíže pohyb z pevného elektrolytu k elektrodám a naopak.

Baterie s pevným elektrolytem, které se v současnosti používají v malých elektronických zařízeních, jako jsou chytré hodinky, mají potenciál být bezpečnější a výkonnější než lithium-iontové baterie, a to i v elektromobilech nebo při ukládání energie ze solárních panelů. Stále však nejsou vyřešeny technické problémy, které jim brání v takovémto rozvoji. Jedním ze zkoumaných řešení je přidání malého množství kapalného elektrolytu pro zlepšení výkonu. Jiný problém je však v tom, že současné kapalné elektrolyty jsou hořlavé a mohou způsobit výbuch nebo požár baterie, zejména když je baterie poškozená. Z posuzování životního cyklu pevných baterií vyplývá, že uhlíková stopa pevných baterií je o 24 až 39 % nižší již od začátku životního cyklu, tedy od samotné výroby baterie.

Jiné řešení pro zvýšení výkonu baterie navrhují vědci ze Singapuru, a to vývoj správného složení keramického materiálu schopného poskytovat výkon, který konkuruje hořlavým kapalným elektrolytům komerčních lithium-iontových baterií. Nové složení v pevné fázi využívá třídu pevných elektrolytů známých jako NASICON (nebo Natrium Super Ionic Conductors). Kromě toho, že je bezpečnější, má baterie díky použití sodíku další výhodu v tom, že je levnější a snadněji se vyrábí.

O polovodičových akumulátorech se hovoří jako o bateriích budoucnosti a celá řada velkých automobilek už buď na technologiích pracuje, nebo to alespoň plánuje. Mezi ně se připojil i německý Mercedes-Benz, a to díky partnerství s americkou firmou Factorial Energy; v roce 2025 zahájil silniční testy vozu EQS s pevnolátkovými články. Společnost Solid Power vyvíjí polovodičové lithium-metalové baterie, které mohou zcela proměnit dosud známé standardy nabíjení, a tedy i kapacitu při zachování současných rozměrů či širší možnosti tvarování, ale i nižším rizikem požáru, které je se současnými tekutými elektrolyty spojeno. Díky potenciálně vyšší bezpečnosti tak pevnolátkové baterie našly své uplatnění třeba v kardiostimulátorech. Nevýhodou těchto baterií v kapacitách nutných pro použití v elektromobilech je jejich vysoká cena, která by se však dala stlačit velkosériovou výrobou.

Zázračné bateriové technologie často slibují zázraky v krátkém horizontu, protože potřebují zvednout vlnu nadšení a sehnat investory. Skutečně slibné technologie pracují s dlouhodobým horizontem a mají za sebou jméno velké firmy. Tak např. Nissan v roce 2021 rozjel dlouhodobou vizi Nissan Ambition 2030, která se zaměřuje na budoucnost mobility a energetiky. Její bateriová část měla za cíl v roce 2024 spustit první (pilotní) linku pro výrobu baterií s pevným elektrolytem (all-solid-state-batteries) a v roce 2028 představit první elektromobil, který tento článek bude používat. Nissan chce díky levnějším materiálům v roce 2028 být na 75 dolarů/ kWh, během následujících dvou let má cena klesnout až na 65 dolarů, čímž se elektromobily dostanou naroveň spalovacím autům. Tyto nové baterie se mají postupně dostat na dvojnásobek energetické hustoty Li-Ion baterií, což v praxi znamená

menší články a delší dojezd. Dalším bonusem je rychlejší nabíjení, Nissan mluví o 15 minutách.

Podle současných plánů výrobců (Toyota, Nissan, VW/QuantumScape, Mercedes/Factorial) se první sériové vozy s pevnolátkovými bateriemi očekávají kolem let 2027–2028 a masové rozšíření až v příští dekádě **4)**

- Redoxní průtokové baterie

Hlavními součástmi redoxních průtokových baterií jsou dvě kapaliny, jedna kladně a druhá záporně nabitá. Při používání baterie jsou tyto kapaliny čerpány do komory známé jako zásobník článků, kde jsou odděleny propustnou membránou a vyměňují si elektrony – vytvářejí tak proud. V provozu je spousta velkých redoxních průtokových baterií, které jsou navrženy tak, aby byly stabilní a vydržely zhruba 20 let. Tyto stávající baterie však používají vanad rozpuštěný v kyselině sírové, což je toxický a korozivní roztok. Projekt HIGREEW plánuje vytvořit redoxní průtokovou baterii, která využívá mnohem méně toxických materiálů.

Pokud jde o ukládání energie pro účely vyrovnávání dodávek do elektrických sítí, baterie musí být spolehlivé a vysokokapacitní, což znamená drahé. Nedostatkové lithium však není nejlepší volbou. Místo toho byl v rámci projektu HIGREEW zkoumán jiný druh baterií, známý jako redoxní průtokový článek.
V rámci čtyřletého evropského projektu HIGREEW byla vytvořena redoxní průtoková baterie, která využívá mnohem méně toxických materiálů, jako jsou roztoky solí ve vodě, které uchovávají ionty na bázi uhlíku. Tohoto projektu se aktivně účastnilo Výzkumné centrum NTC Západočeské univerzity v Plzni, dále nizozemská společnost Uniresearch a český start-up Pinflow Energy. Nové baterie jsou nehořlavé, nevýbušné a mají mít životnost přes 25 let. Projekt HIGREEW vyvinul nízkonákladovou redoxní průtokovou baterii (RFB) s organickými elektrolyty na vodní bázi, která je šetrná k životnímu prostředí, má vysokou energetickou a výkonovou hustotu.

- Experimentální vysokonapěťová a nehořlavá baterie

Baterie byla zkonstruovaná odborníky Fyzikálního ústavu a Ústavu fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského (AV ČR) a využívá slanou vodu, zinek a grafit. Výzkumným týmům se podařilo vyřešit nízkou kapacitu a napětí u stávajících vodných baterií tím, že do roztoku vody přidali velké množství chaotropní soli chloristanu zinečnatého. Dosažené napětí je srovnatelné s napětím, kterého dosahují organické elektrolyty v komerčních lithiových bateriích. Nespornou výhodou nového elektrolytu je vysoká vodivost, která na rozdíl od organických elektrolytů významně neklesá ani za nízkých teplot. Baterie také nehoří a nemůže vybuchnout, neboť má nehořlavý elektrolyt. Využití by tak baterie mohla nalézt při ukládání energie vyrobené v obnovitelných zdrojích jako jsou solární či větrné elektrárny. Ačkoliv je v současnosti na trhu velké množství moderních baterií, většina z nich se pro vysokokapacitní ukládání elektřiny nehodí, a to i kvůli vysokým cenám. Experimentální baterie tak nabízí podobné parametry jako komerční nikl-metal hydridové baterie. Je ale přitom vyrobena z extrémně levných materiálů, což by mohlo podpořit další snížení ceny baterií, které dnes patří k jedné z těch dražších komponent moderních přístrojů.

Nová technologie by navíc mohla řešit i problémy s hořícími bateriemi, které mohou být velmi nebezpečné. Využití by tak baterie mohla nalézt při ukládání energie vyrobené v OZE.

- Lithium-sirné baterie (LSB)

Na jejich výzkum dostal prof. Otyepka z CATRIN UPOL Olomouc prestižní grant ERC. Elektrodový materiál vznikl na základě bohatých zkušeností týmu CATRIN s dvoudimenzionální chemií, tedy pochopením chemických pravidel dvojrozměrného světa ultratenkých uhlíkových nanomateriálů. Byl použit nejtenčí izolant na světě fluorografen, u něhož část atomů fluoru byla nahrazena polysulfidy. Tato jednoduchá metoda by mohla být velmi efektivní pro výrobu lithium-sirných baterií s vysokým výkonem, stabilitou, dlouhou životností a dvojnásobnou kapacitou. LSB jsou jednou z možností, jak řešit rostoucí poptávku po energii v souvislosti s dynamickým rozvojem technologií a současně snížit závislost na toxických chemikáliích či surovinách, které zatěžují životní prostředí. Síra je ekologický, šetrný, dostupný a levný materiál, baterie s jejím využitím se navíc obejdou bez přítomnosti toxických kovů, jako je nikl či kobalt. Skutečnost, že LSB jsou dobíjecí, pomůže v dlouhodobém výhledu snížit množství elektronického odpadu. První komerční výroba Li-S článků byla v zahraničí zahájena v roce 2025 (např. Lyten, USA)

- Nikl-vodík baterie

Články se vyrábí v provedení, kde je jeden článek v tlakové nádobě se separátorem, který funguje také jako vrstva umožňující difuzi vodíku, zpravidla se jedná o zirkonovou tkaninu. Elektrolyt tvoří 26% vodný roztok hydroxidu draselného. Niklová elektroda je zhotovená jako slinovaná elektroda s obsahem hydroxidu nikelnatého. Nominální vybíjecí napětí je 1,25 V. Provozní tlak dosahuje hodnot okolo 80 barů. Energetická hustota se pohybuje okolo 40-75 Wh na kilogram. Měrný výkon je zhruba 220 W/kg. Provozní teploty se pohybují v rozsahu -28 až +54 stupňů Celsia. Energetická účinnost dosahuje 85 %. Stav nabití je přímo úměrný tlaku vodíku v tlakové nádobě, a tak lze snadno určit míru nabití. Kvůli obsahu platiny a nutnosti zapouzdření do pevné tlakové nádoby jsou tyto baterie velmi drahé. Principem funkce se velice podobají svým nástupcům, akumulátorům na bázi nikl-metal hydrid. Osvědčily se zejména na satelitech.

5.3.2. Úložiště energie

Systémy skladování energie poskytují inteligentní řízení zátěže pro přenos a distribuci energie a modulují frekvenci a špičku v čase podle zatížení rozvodné sítě. Jsou klíčem pro výrazné zvýšení využití OZE. Více možností skladování energie by regionu umožnilo vyvážit elektrické sítě a ušetřit přebytečnou energii; rovněž by to pomohlo zlepšit energetickou účinnost a integrovat více obnovitelných zdrojů energie do elektrických systémů a vytvořit vnitřní trh s nižšími cenami pro spotřebitele.

Běžně se používají různé varianty Li-iontových baterií. Ty jsou robustní, spotřebovávají nedostatkové lithium a jsou nákladné. Proto vědci hledají další varianty. Redoxní baterie se od konvenčních typů liší tím, že reakce v nich probíhají jen na povrchu elektrody. Redoxní reakci tvoří současně probíhající oxidace a redukce. Vývoj v této oblasti však pomalu končí, protože byl vyčerpán potenciál těchto typů baterií. Nadějná řešení jsou hledána v alternativním přístupu založeném na redoxních reakcích funkčních skupin na povrchu uhlíkových nanotrubic. Techniky vrstvy po vrstvě se používají k sestavení elektrody, která se skládá z aditiv-free, hustě zabalených a funkcionalizovaných multivrstev uhlíkových nanotrubic. Elektroda, která je o tloušťce několika mikrometrů, dokáže uchovávat lithium až do reverzibilní gravimetrické kapacity ~200 mAh/g elektrody a současně dodává výkon 100 kW/kg elektrody a poskytuje životnost přesahující tisíce cyklů. Zařízení s elektrodou s nanotrubkami jako s kladnou elektrodou a s titaničitanem lithným ($Li_4Ti_5O_{12}$) jako zápornou elektrodou vykazuje gravimetrickou energii asi 5krát vyšší než konvenční elektrochemické kondenzátory a 10krát vyšší výkon než běžné lithium-iontové baterie.

Také vyvíjející se evropský trh skladování energie potřebuje baterie. Evropská komise zdůraznila, že skladování energie je klíčové pro přechod na uhlíkově neutrální ekonomiku. Očekává se, že poptávka po bateriovém skladování energie v nadcházejících desetiletích výrazně vzroste, protože svět se odkloní od fosilních paliv k ekologičtějším zdrojům energie.

- Skladování obnovitelné energie ve formě chemické energie

Jedná se o procesní technologie, jako jsou vodíkové a CO_2 nosiče energie, tj. technologie pro dodávku energie z plynu a energie z kapaliny a skladování tepelné energie (prostřednictvím materiálů s fázovou změnou nebo reverzibilních termochemických reakcí). Obecně tedy je elektrická energie přeměňována na chemickou v plynné fázi, jako je methan, který lze skladovat ve stávající distribuční síti plynu, případně vodík, nebo do kapalné fáze jako je metanol, etanol a další. Převedení elektrické energie na chemickou energii výrobou vhodných energetických vektorů (nosičů) umožňuje flexibilnější využívání energie v různých aplikacích (doprava, obytné budovy, průmysl atd.). Vhodné energetické vektory mohou být také použity jako základní suroviny pro chemický průmysl, kterému nabízejí novou nízkouhlíkovou ekonomiku. Energie musí být uložena tak, aby odpovídala poptávce. Mezi nejvýznamnější patří především vodík, dále metan, metanol, etanol a další.

Očekávaným výsledkem budou gigantické investice do obnovitelných zdrojů. Podle předpokladů Evropské komise bude nutné solární kapacity do roku 2030 zvýšit zhruba pětinásobně oproti roku 2019. Také vyvíjející se evropský trh skladování energie potřebuje baterie. Zájem o skladování energie v posledních několika letech vzrostl, protože vlády po celém světě uvažují o přechodu od fosilních paliv k čistším zdrojům energií.

- Problematika surovin pro baterie

Evropský průmysl baterií potřebuje řadu surovin, které dosud z velké části dováží, například lithium, kobalt, mangan, grafit a nikl. Evropská unie proto podporuje budování celého bateriového hodnotového řetězce. Nařízení o kritických surovinách (CRMA, 2024) stanoví, že do roku 2030 má EU pokrýt nejméně 10 % své roční spotřeby strategických surovin vlastní

těžbou, 40 % vlastním zpracováním a 25 % recyklací. Zároveň nemá být z jediné třetí země dováženo více než 65 % spotřeby žádné z nich. Komise v roce 2025 vybrala první strategické projekty, mezi nimi i těžbu a zpracování lithia na Cínovci. Význam surovinové bezpečnosti dále roste kvůli válce na Ukrajině a kvůli vývozním omezením hlavních producentských zemí. Vývoj poptávky po kovech pro výrobu baterií ukazuje obrázek č. 2. 8)

Světová poptávka po lithium-iontových bateriích dosáhla v roce 2025 přibližně 1,6 TWh, meziročně o 29 % více. Elektromobily tvořily zhruba tři čtvrtiny poptávky. Nejrychleji rostla stacionární bateriová úložiště (+51 %) a články typu LFP (+48 %). Poptávka po lithiu v posledních dvou letech rostla v průměru asi o 25 % ročně a podle IEA mu nedostatek nabídky hrozí až do roku 2035. Ceny lithia jsou velmi kolísavé:

- v letech 2020–2022 vzrostla cena uhličitanu lithného z přibližně 5 000 USD/t na zhruba 70 000 USD/t,
- v letech 2023–2025 prudce klesla (v roce 2025 v průměru asi 9 000 USD/t),
- od konce roku 2025 opět roste a na jaře 2026 dosáhla na čínském trhu přibližně 160 000 CNY/t (asi 22 000 USD/t).

Díky rychlému nástupu článků LFP a nízkokobaltových katod se v bateriích používá méně kobaltu, než se dříve předpokládalo. Trh s kobaltem je však silně ovlivněn politikou Konžské demokratické republiky, která zajišťuje zhruba tři čtvrtiny světové těžby. Ta v únoru 2025 zakázala vývoz kobaltu a od 16. 10. 2025 ho nahradila vývozními kvótami (96 600 t na rok 2026). Ceny kobaltu v důsledku toho vzrostly přibližně o 130 %.

Nabídka je silně koncentrovaná. U klíčových minerálů připadalo v roce 2025 na největší zpracovatelskou zemi v průměru 72 % světové rafinace. U lithia, grafitu a kobaltu je to Čína, u niklu Indonésie. Počet surovin, na které Čína uplatňuje vývozní kontroly, se od roku 2023 ztrojnásobil. Investice do těžby bateriových kovů přitom v roce 2025 klesly o více než 20 %, u lithiových společností dokonce asi o 40 %. Země se proto předhánějí v budování vlastních dodavatelských řetězců a v rozvoji recyklace.

Čína v současnosti dominuje celosvětovému průmyslu baterií a zaujímá první místo v globálním žebříčku dodavatelských řetězců lithium-iontových baterií. Kontroluje více než 50 % kapacity na rafinaci kovů pro baterie ve všech klíčových materiálech a čínské společnosti celosvětově výrazně investovaly do těžebních aktiv. Podle společnosti BNEF je Čína také velmocí na výrobu baterií, která představuje téměř 75 % celkové zprovozněné kapacity. Snahy o vybudování domácích dodavatelských řetězců závislost na Číně neodstraní.

Zatímco v roce 2010 měly Li-ion bateriové sady cenu přibližně 1 200 USD/kWh, v roce 2021 se dostaly na zhruba 132 USD/kWh (nikl-kobalt-manganové články kolem 140 USD/kWh, lithium-železo-fosfátové kolem 100 USD/kWh). V roce 2022 ceny v důsledku drahého lithia a kobaltu poprvé po deseti letech meziročně vzrostly, od roku 2023 však opět klesají. Podle průzkumu BNEF z prosince 2025 činila průměrná cena Li-ion bateriových sad v roce 2025 108 USD/kWh (o 8 % méně než v roce 2024), přičemž nejlevnějším segmentem se staly stacionární úložiště.

Ceny lithia v letech 2021–2022 vyskočily o více než 400 %, zatímco cena kobaltu se v roce 2021 více než zdvojnásobila, především kvůli poptávce po elektromobilech. Nikl, další

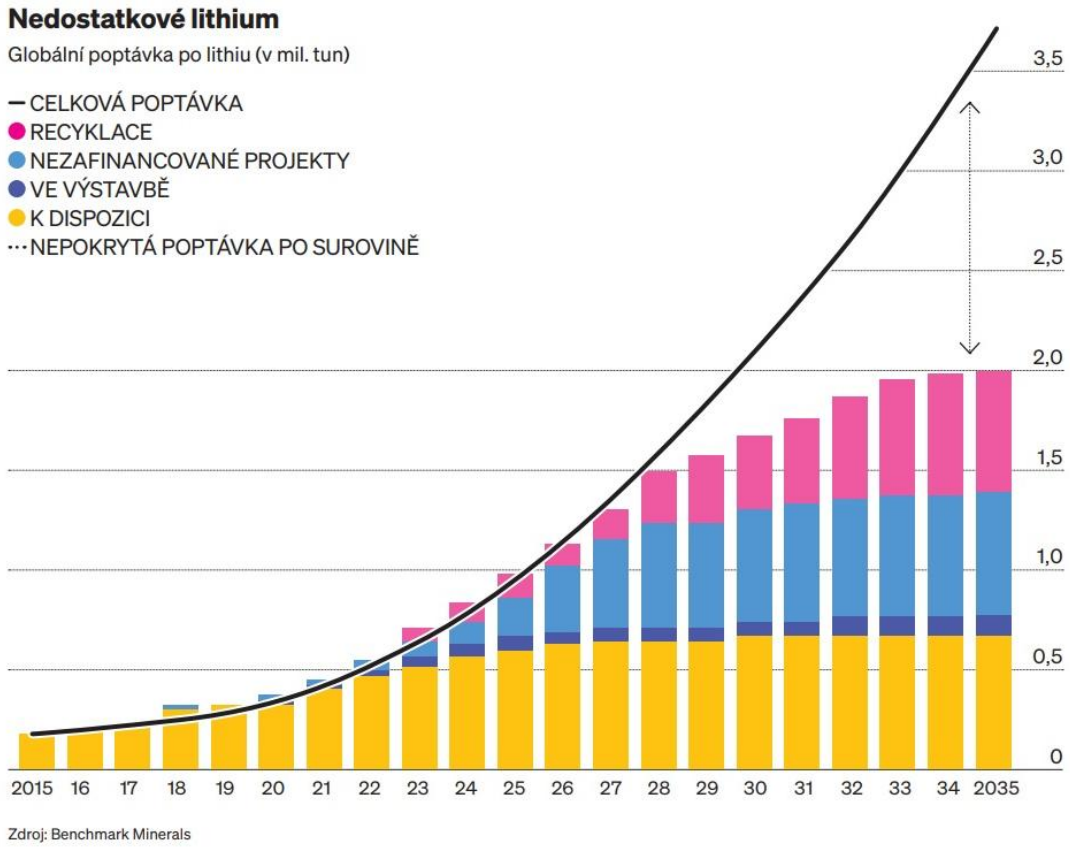
základní prvek v některých katodách pro baterie, zažil na začátku března 2022 svou vlastní zajímavou cenovou akci na londýnské burze kovů – překonal 100 000 USD za tunu, což burzu přimělo pozastavit, přezkoumat a později znovu otevřít obchodování. 7)

Rozvoj elektromobility a velkokapacitních úložišť energie zvyšuje spotřebu lithia. EU klade velký důraz na projekty takzvaného bateriového řetězce pro elektromobily. I když je Evropa jedním z největších světových výrobců motorových vozidel, nemá místní dodávky hydroxidu lithného, který se ve velké míře používá v technologii baterií pro elektromobily. Proto Evropská komise podporuje výrobu lithia. Na tyto projekty bylo uvolněno z EU 6,1 miliardy eur, celková investice přesáhne 60 miliard eur, takže průmysl bude dávat významný díl svých peněz na realizaci projektů v dodavatelském řetězci baterií. **4)**

Jednou ze společností, která si klade za cíl stát se prvním evropským dodavatelem lithia v integrovaném evropském dodavatelském řetězci baterií je European Lithium, společnost zabývající se těžebním průzkumem a vývojem zaměřeným na průzkum, identifikaci a získávání lithia v Evropě. Společnost se zaměřuje výhradně na svůj zcela vlastněný projekt Wolfsberg Lithium v Korutanech v Rakousku. Nemovitost obsahuje vysoce kvalitní zdroj lithia v průměrné kvalitě jednoho procenta Li_2O v rudě s celkovým zdrojem 10,98 milionů tun. Společnost European Lithium Limited podepsala memorandum o porozumění s evropským výrobcem automobilů BMW AG za účelem zajištění odběru lithium hydroxidu pro baterie z projektu Wolfsberg a získala určité prostředky z EU jako předfinancování tohoto projektu.

Globální kapacita lithium-iontových baterií vzroste do roku 2030 pětinásobně (přes 3 000 GWh, možná až na 5 500 GWh). 7)

Prognózu spotřeby lithia ve světě ukazuje následující obrázek č. 3.



V této souvislosti byly v ČR zvažovány dva velké investiční projekty, které navíc mohou být alternativou k řešení problematiky ztráty pracovních míst v souvislosti s útlumem těžby uhlí. Jsou to projekty vysoce technicky a investičně náročné, a tedy i značně rizikové. Pokračuje především projekt těžby a zpracování lithia (ČEZ, GEOMET), záměr gigafactory se v současnosti nerealizuje. Jedná se o tyto projekty:

- Výroba lithia s využitím zásob Li v ČR

Lithium je možné ze suroviny v ČR získat dvěma způsoby a momentálně probíhají zkoušky, které mají ukázat, která z metod je výhodnější. Jedna je na bázi louhování a druhá na bázi vysokoteplotního zpracování. Ta je vysoce ekologická, protože odpad, který vzniká, je možné okamžitě využít pro výrobu cementu. Tuto metodu řeší i Centrum CirkTech a VŠCHT Praha. Tato originální metoda InCeMet je testována v areálu cementárny Holcim Česko (dříve Lafarge Cement) v Čížkovicích.

Samotná těžba rudy měla podle dřívějších plánů začít kolem roku 2030; aktuální harmonogram závisí na procesu EIA a investičním rozhodnutí akcionářů. Probíhat má v hlubinném dole na Cínovci, konkrétně v lokalitě Sedmihůrky nedaleko města Dubí. Těžaři plánují za prvních 20 let vytěžit až 3,2 milionu tun rudy ročně. V ložisku Cínovec se nachází

1,2–1,4 mil. tun lithia; vytěžitelné zásoby podle finální studie proveditelnosti činí 101,3 mil. t rudy, tj. cca 1,01 mil. t ekvivalentu uhličitanu lithného.

Byly představeny dva podnikatelské záměry na těžbu lithia v ČR: **9)**

- Projekt ČEZ a GEOMET. Plánují těžit v Cínovci hlubinně a ze země dostat násobně více suroviny. Celkové zdroje lithia na krušnohorském Cínovci jsou odhadovány na 1,2 až 1,4 milionu tun tohoto kovu. V březnu 2025 zařadila Evropská komise projekt mezi strategické projekty podle nařízení o kritických surovinách (CRMA).

- Výstavby velkých továren na výrobu baterií

ČEZ a Geomet podepsaly memorandum týkající se podpory výroby lithia a výstavby továrny na baterie. Vyrábět se v ní měly baterie o kapacitě více než 30 GWh ročně, což by odpovídalo výrobě baterií pro přibližně 400 až 800 tisíc osobních automobilů ročně. Projekt těžby a zpracování lithia na Cínovci má podle finální studie proveditelnosti vytvořit téměř 2 000 přímých pracovních míst a plánovaná gigafactory dalších zhruba 3 000 pracovních míst. Původně uvažovaný projekt gigafactory v Prunéřově nebyl realizován a v současnosti se s jeho výstavbou nepočítá. Projekt těžby a zpracování lithia na Cínovci však pokračuje v přípravné a povolovací fázi. V prosinci 2025 byla dokončena finální studie proveditelnosti, která potvrdila realizovatelnost projektu; zpracovatelský závod má vzniknout v areálu bývalé elektrárny Prunéřov.

Koncern Volkswagen v minulých letech oznámil plán vybudovat až šest evropských továren na baterie, přičemž mezi zvažovanými lokalitami byly také země střední Evropy. V roce 2026 zahájila společnost Škoda Auto v Mladé Boleslavi sériovou výrobu nové generace bateriových systémů typu cell-to-pack (CTP) s lithium-železo-fosfátovou (LFP) chemií. Nová hala s investicí 205 milionů eur dokáže vyrobit více než 1 100 bateriových systémů denně a zaměstnává přibližně 600 pracovníků. Škoda Auto se díky tomu stala největším výrobcem bateriových systémů pro elektromobily v rámci koncernu Volkswagen. Baterie jsou určeny pro elektromobily postavené na platformě MEB a budou využívány nejen ve vozech značky Škoda, ale také u dalších značek skupiny Volkswagen.[11)]

V areálu bývalé elektrárny Prunéřov I na Chomutovsku se původně uvažovalo o výstavbě velkokapacitní továrny na zpracování Lithia navázané na plánovanou těžbu lithia na Cínovci. Projekt však nebyl realizován a v současnosti se s jeho výstavbou nepočítá. Další podpora má být podmíněna realistickým investičním plánem, dostupností energie a surovin, zajištěním odbytu a vyhodnocením regionálních a environmentálních dopadů.

Výroba lithia z domácích zdrojů představuje pro Českou republiku významnou příležitost k modernizaci průmyslu, posílení evropského dodavatelského řetězce pro baterie a vytvoření nových pracovních míst v regionech dotčených útlumem těžby uhlí. Vzhledem k silné orientaci české ekonomiky na automobilový průmysl je rozvoj domácích kapacit v oblasti bateriových materiálů, bateriových systémů a souvisejících technologií považován za strategicky významný krok pro udržení konkurenceschopnosti českého průmyslu.

Centrum CirkTech VŠCHT Praha společně s Lafarge poloprovozně ověřuje technologii výroby lithia ze surovin v ČR na bázi vysokoteplotního zpracování. Úspěšné ověření a průmyslové nasazení technologie InCeMet by mohlo významně přispět k vytvoření domácího hodnotového řetězce pro lithium a bateriové materiály v České republice. Její význam je úzce spojen především s projektem těžby a zpracování lithia na Cínovci a s rozvojem evropského bateriového průmyslu obecně.

- Další významné investiční záměry v oblasti surovin pro baterie

Kanadská společnost Euro Manganese prostřednictvím dceřiné firmy Mangan Chvaletice, která drží průzkumná práva k ložisku manganu ve Chvaleticích a připravuje těžbu. Projekt má trvat 25 let a jeho náklady mají dosáhnout zhruba 400 milionů dolarů (devět miliard korun). Společnost Euro Manganese začala stavět zkušební továrnu, která v blízkosti Chvaletic zahájila testy těžby manganu na podzim roku 2023. Spuštění komerční jednotky by pak mělo být v letech 2032 - 2034. Má se vyrábět vysoce kvalitní kovový mangan a síran manganatý.

Projekt na těžbu kobaltu v krušnohorské Tisové byl pro nízkou výtěžnost zastaven.

Pro automobilky budou klíčové dvě strategie – zabezpečit si kvalitní zdroje surovin na výrobu baterií a získat technologii, která přinese efektivní a levný provoz jejich vozidel. Elektromobily však nebudou jediným tahounem výroby baterií. Jako další významná oblast jejich využití bude především oblast skladování energie – bateriová úložiště.

I když je pravděpodobné, že po roce 2030 dojde k postupné náhradě současných Li-iontových baterií inovovanými pevnolátkovými bateriemi nebo jinými novými modely baterií, je zřejmé, že lithium bude potřeba i pro tyto nové druhy baterií.

Náměty pro český výzkum a vývoj v oblasti skladování energie

- zkoumat nové druhy elektrolytů, které budou mít vysokou vodivost společně s elektrochemickou, chemickou a tepelnou stabilitou
- dokončit vývoj technologie přípravy Li z českých surovin na bázi vysokoteplotního zpracování
- vývoj pevnolátkových baterií s vyšší výkonností
- vývoj nových elektrod pro baterie. Jako možná se ukazuje náhrada uhlíku křemíkem. Čistý křemík totiž dosahuje energetické hustoty až 4 200 mAh na gram, což je přibližně desetinásobek kapacity grafitu (372 mAh/g) a mohlo by to vést k výraznému zvýšení kapacity Li-ion baterií. Objemové změny křemíku při interkalaci lithia lze řešit např. tak, že uhlíkové anody budou opatřeny nanodrátky křemíku.

- zlepšení výkonu a hustoty energie použitím tenkých vrstvených materiálů na bázi uhlíku, jako je grafen, s cílem vytvoření protonové baterie, která bude konkurenceschopná s lithium-iontovými bateriemi;
- vývoj cenově výhodných membránových materiálů s dlouhou životností a souvisejících alternativních elektrolytů pro vanadové redox průtočné baterie

Zdroje:

1) *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU – A Foresight Study: https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881*
2) *SVA 4 SUSCHEM CZ 2019*
3) *INN 6 Lithium-ion Battery Types Lithium Investing News, Mar. 31, 2022*
4) *Bates A. M. a kol.: Are solid-state batteries safer than lithium-ion batteries INN, 17. 3. 2022*
5) *Bormashov: Diamond and Related Materials, INN duben 2022*
6) *Cleantech Market Update: H1 2022 in Review, Cleantech Investing News 18.8.2022*
7) *Woodmac: Global Lithium-ion Battery Capacity to Increase Five Times by 2030: INN Lithium Investing News, Mar. 31, 2022*
8) *BloombergNEF: Race to Net Zero: The Pressures of the Battery Boom in Five Charts, https://about.bnef.com/ 21. 7. 2022*
9) *Rozhodnutí o těžbě a zpracování lithia v Česku má padnout do dvou let, https://www.idnes.cz/usti/zpravy/lithium-tezba-cinovec-geomet-cez-A210825_133245_usti-zpravy_mendl 25. 8. 2021*
10) *https://www.idnes.cz/ekonomika/podniky/karel-janecek-rsj-muze-tezit-lithium-v-cinovci.A161025_113229_ekonomika_rny*
11) *Autohled: https://www.autohled.cz/magazin/skoda-rozjela-vyrobu-lfp-baterii-v-mlade-boleslavi-denne-jich-vznikne-pres-1-100-pro-cely-koncern-vw/10319*

- Superkondenzátory

Dalším představitelem elektrochemických řešení ukládání energie v pevné fázi jsou superkondenzátory nazývané také elektrochemické kondenzátory. Superkondenzátory uchovávají energii buď pomocí iontové adsorpce (elektrochemické kondenzátory s dvojitou vrstvou) nebo pomocí rychlých redoxních reakcí (pseudokondenzátory). Mohou doplňovat nebo nahrazovat baterie v aplikacích pro skladování a odběr elektrické energie, pokud je potřeba vysoký výkon nebo příjem. Komerčně prodávané superkondenzátory mají kapacitu až několik tisíc faradů a nabíjecí/vybíjecí proud v rozmezí od jednotek ampér až po stovky ampér. V dnešní době se využívají v hybridních a elektrických vozidlech. **1)**

Pozoruhodné zlepšení výkonnosti bylo dosaženo nedávným pokrokem v porozumění mechanismu ukládání nábojů a vývoji pokročilých nanostrukturních materiálů. Objev, že iontová desolvace se vyskytuje v pórech menších než solvatované ionty, vedl k vyšší kapacitě pro elektrochemické dvojvrstvé kondenzátory používající uhlíkové elektrody se

subnanometrovými póry a otevřela dveře pro navrhování zařízení s vysokou hustotou energie s použitím různých elektrolytů. Kombinace nanostrukturovaných lithiových elektrod umožnila zvýšit hustotu energie elektrochemických kondenzátorů blíž k hustotě baterií. Dalšího pokroku bylo dosaženo nahrazením grafitové elektrody grafenovou elektrodou. Ta byla navržena tak, aby se superkondenzátor nabíjel a uvolňoval energii mnohem rychleji než běžné baterie.

Hlavním výzkumným cílem bylo vyrobit hybridní baterio-kondenzátorový systém pro elektromobily. Pro realizaci superkondenzátorů jako zdrojů elektrické energie s velmi vysokými hodnotami měrné energie a výkonu je potřeba zkoumat nové materiály, fyzikální a chemické procesy probíhající v okolí a na povrchu elektrod. Je zapotřebí plně porozumět mechanismům uchovávání náboje a navrhnout nové druhy elektrodových materiálů.

Výhodou superkondenzátoru je poměrně vysoká účinnost akumulace (až 95 %). Nevýhodou je závislost napětí na uloženém náboji, což lze minimalizovat použitím napěťových měničů. Rovněž cena je zatím poměrně vysoká, ale s objemem zavedení v průmyslu a s nárůstem sériovosti výroby lze předpokládat její pokles.

Superkondenzátory je vhodné používat v oblasti fotovoltaiky, především jako vyrovnávací akumulátory elektrické energie pro menší systémy spojené se sítí, kde mohou kompenzovat krátkodobé výkyvy výkonu. Jejich širší využití jako skladovacího řešení je limitováno jejich omezenou kapacitou.**2)**

Prvky, jako je kobalt a galium, našly od svého objevu použití v technologii díky svým žádoucím chemickým a fyzikálním vlastnostem. A se zvýšenou poptávkou po udržitelných alternativách a účinných technologiích jsou tyto kovy znovu zkoumány, aby vyhovovaly dnešním potřebám v oblasti polovodičů. Například galiové materiály se stále více používají ve složených polovodičích, jako je arsenid galia a nitrid galia. Tyto sloučeniny nabízejí zvýšenou mobilitu elektronů a výkon ve srovnání s výhradně křemíkovými polovodiči, zejména v moderních aplikacích s vysokým výkonem. Tradičně byly složené polovodiče považovány za obtížné a nákladné na výrobu. Metalorganická chemická depozice z plynné fáze však využívá vysoce čisté organokovové látky a poskytuje průmyslu techniku k zajištění spolehlivých a nákladově efektivních složených polovodičů.

Na podporu průmyslu ve vývoji nových, vysoce kvalitních složených polovodičů společnost Umicore v roce 2017 spustila inovativní závod na výrobu kov-organických prekurzorů. V tomto závodě se sídlem v Hanau v Německu vyrábí Umicore trimethylgallium. Jejich výrobní proces je inovativní, bezpečný a jedinečný. Nabízí udržitelnější a ekologičtější výrobní metodu tím, že minimalizuje nebezpečné vedlejší proudy a materiálové ztráty a optimalizuje výnos na téměř 100 %.

V ČR se problematikou superkondenzátorů zabývá např. Ústav elektrotechnologie VUT Brno, dále centrum CATRIN na UPOL v Olomouci 3). V letech 2020–2021 koordinoval prof. Otyepka ERC Proof of Concept projekt „UP2DChem“ zaměřený na vývoj elektrodových materiálů pro superkondenzátory. V září 2021 zahájil ve spolupráci s firmou Itelcond a Bar-Ilanovou univerzitou řešení tříletého projektu Evropské rady pro inovace na vývoj prototypů

superkondenzátoru. Tým vyvinul nové uhlíkové nanomateriály pro baterie a superkondenzátory. V březnu například získali na přenos vědeckých poznatků do praxe jako vůbec první v Česku grant od Evropské rady pro inovace v hodnotě 2,5 milionu eur (zhruba 62,5 milionu korun). Dusíkem obohacený grafen, který vyvinuli, má obrovský potenciál – oproti jiným materiálům pro superkondenzátory má obrovskou kapacitu uchování energie, a navíc je levný, bezpečný a šetrný k přírodě. Zásadním milníkem byl přenos technologií do praxe. Z akademické půdy v Olomouci vzešla **spin-off společnost Atomiver s.r.o.**

Náměty pro výzkumné projekty:

- vývoj nových uhlíkových nanomateriálů pro baterie a superkondenzátory
- zkoumat nové druhy elektrolytů, které budou mít vysokou vodivost společně s elektrochemickou, chemickou a tepelnou stabilitou
- vývoj nových druhů elektrodových materiálů

Zdroje :

1) *SVA, SUSCHEM CZ, rok 2019*
2) *Ch. Reynolds: Evoluce superkondenzátorů https://www.dps-az.cz/soucastky/id:9790/evoluce-superkondenzatoru*
3) *Otyepka M. a kol.: Nitrogen doped graphene with diamond-like bonds achieves unprecedented energy density at high power in a symmetric sustainable supercapacitor, Energy & ENVIRONMENTAL SCIENCE, vol. 15, iss. 2, pp. 740-748, 2022*
4) *Wilks A.: Semiconductors in tomorrow's technologies*
5) *https://www.chemistryworld.com/chemistry-40/ 29.3.2021*

5.3.3 Palivové články

Palivový článek je elektrochemické zařízení přeměňující přímo chemickou energii paliva a okysličovadla na energii elektrickou za vzniku menšího množství tepla. Kontinuálně musí být přiváděno palivo i okysličovadlo k elektrodám a odváděny spaliny. Palivové články získávají elektrickou energii přímo z chemické formy, a proto by měly být účinnější, jednodušší a spolehlivější. Zatím však jejich využití částečně brání technické překážky. Výhodou palivového článku je skutečnost, že elektrody nevstupují do chemické reakce, tudíž nedochází provozem článku ke strukturálním změnám elektrod a článek má teoreticky nekonečnou životnost. Aktivní látky jsou k elektrodám přiváděny z vnějšku a doba činnosti závisí pouze na přivádění reaktantů.

Palivové články jako elektrochemické reaktory jsou schopné měnit chemickou energii na elektrickou energii. Tyto články jsou v zásadě schopné dosahovat vyšší účinnosti přeměny

energie paliv na elektrickou energii než konvenční termické systémy se spalováním paliv a tepelnými motory (např. turbínami) pro přeměnu tepla na užitečnou, elektrickou energii. Palivové články mají také přednosti v emisní oblasti. Vzhledem k tomu, že pracují obvykle v oblasti teplot 20–1000 °C a vzhledem k nutnosti využívání čistých paliv, emise NOx, SOx, prachu a těžkých kovů jsou zanedbatelné.[1)]

V současnosti se nejvíce nadějí vkládá do kyslíko-vodíkového palivového článku v rámci vodíkového pohonu automobilů. Potřebný vodík může být získán například pomocí elektrolýzy vody, potřebný kyslík pro palivový článek, je možno získávat z atmosféry. Komerčně úspěšný je nízkoteplotní PEM palivový článek (Proton Exchange Membrane). Úspěšnost tohoto systému je dána pokrokem ve výzkumu a vývoji membrány (komerčně úspěšná membrána NAFION), katalyzátoru, struktury článku atd. Tyto PEM palivové články vodík-vzduch jsou v hledáčku mnoha výzkumných týmů s cílem dosáhnout potřebných technologických parametrů s cenou pod 500 USD/kW pro stacionární aplikace. Existují palivové články různých konstrukcí, rozměrů a maximálních výkonů. Podle konstrukce a typu mohou pracovat při teplotách od 60 do 1 000 °C, jako palivo mohou používat kromě vodíku např. metan (CH**4)**, metanol (CH3OH), hydrazin (N2H**4)** apod., elektrolytem může být např. roztok kyseliny fosforečné (H3PO**4)**, hydroxidu draselného (KOH), tavenina alkalických uhličitanů či pevný oxidický elektrolyt (oxid zirkoničitý stabilizovaný Y_2O_3, YSZ). Napětí jednoho palivového článku bývá přibližně 1 V, články se rovněž mohou skládat sériově do baterií. Zajímavým využitím palivových článků je vodíkový elektromobil, který nemá spalovací motor s přímým vstřikováním, ale palivové články a elektromotor. Vývoj a výzkum se zaměřuje především na palivové články s tavenými uhličitany (Molten Carbonate Fuel Cell) a s pevnými oxidy (Solid Oxide Fuel Cell), které pracují s teplotami 500–1000 °C, což jim umožňuje přímé využívání např. zemního plynu.

Současný stav a vývoj vodíkových technologií v dopravě a průmyslu

V oblasti vývoje vodíkových vozidel došlo během posledních let k výrazné konsolidaci trhu. Zatímco ještě před deseti lety experimentovala s vodíkovým pohonem většina významných automobilek, dnes se vývoj soustřeďuje především na dva hlavní směry: **membránové palivové články (FCEV)** a **spalovací motory využívající vodík (H_2-ICE)**. Obě technologie nacházejí své hlavní uplatnění zejména v segmentech těžké dopravy, kde jsou požadovány dlouhé dojezdy, vysoká energetická hustota a rychlé doplňování energie[4)].

Většina evropských a amerických výrobců osobních automobilů, včetně koncernů Stellantis nebo Volkswagen, v posledních letech omezila své programy zaměřené na osobní vodíkové automobily. Hlavními důvody jsou náklady na výrobu a distribuci vodíku, omezená infrastruktura plnicích stanic a nižší energetická účinnost celého řetězce ve srovnání s bateriovými elektromobily. Naopak mezi nejvýznamnější výrobce osobních vozů s palivovými články nadále patří Toyota a Hyundai. K nim se nově připojuje BMW, které oznámilo zahájení sériové výroby svého prvního modelu s vodíkovým palivovým článkem v roce 2028 ve spolupráci s Toyotou.[2)]

Vývojové kapacity a strategie vedoucích firem

Výzkumné a vývojové centrum Toyota Motor Europe (TME) v belgickém Zaventemu pokračuje ve vývoji nové generace palivových článků a zároveň rozšiřuje využití vodíku do dalších oblastí dopravy. Strategie Toyoty označovaná jako **Multi-pathway strategy** vychází z předpokladu, že dekarbonizace nebude postavena na jediné technologii, ale na kombinaci bateriových elektromobilů, hybridních vozidel, palivových článků, syntetických paliv i vodíku. Toyota proto rozšiřuje využití vodíkových technologií vedle osobních vozidel také do nákladní dopravy, autobusů, železniční dopravy a energetických aplikací 3).

Řada evropských výrobců mezitím přesunula své vodíkové aktivity z osobních automobilů do segmentu těžké dopravy. Mercedes-Benz například ukončil vývoj modelu GLC F-CELL a soustředí svůj výzkum na nákladní vozidla. Významnou roli zde hraje společnost **Cellcentric**, společný podnik Volvo Group a Daimler Truck, který patří mezi nejvýznamnější evropská centra vývoje palivových článků pro těžkou dopravu 5)

Paralelně pokračuje také vývoj nových materiálů. Vysoce chemicky a tepelně odolné polymery, jako jsou **Ultramid, Ultradur, polyftalamidy (PPA), PPS, PA12, fluoropolymery (PVDF, ETFE) či kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny**, nacházejí uplatnění při výrobě komponent palivových článků, potrubních systémů, ventilů, těsnění i vysokotlakých zásobníků vodíku. Jejich nízká hmotnost, chemická odolnost a dlouhodobá stabilita představují významný faktor pro bezpečnost a ekonomiku vodíkových systémů 6,7).

Přenosná elektronika a specializované aplikace

Původní očekávání, že mikro-palivové články využívající metanol nebo etanol nahradí baterie v noteboocích, mobilních telefonech a další přenosné elektronice, se nenaplnila. Tento segment dnes jednoznačně ovládají lithium-iontové akumulátory a nově vyvíjené technologie pevných elektrolytů (Solid-State). Metanol si naopak nachází perspektivní uplatnění především v lodní dopravě jako alternativní nízkoemisní palivo.

Významné postavení si palivové články nadále udržují ve specializovaných vojenských a námořních aplikacích. Typickým příkladem jsou ponorky vybavené systémy **Air Independent Propulsion (AIP)**, které umožňují dlouhodobý provoz pod hladinou bez přístupu atmosférického kyslíku. Palivové články zde poskytují mimořádně tichý provoz, nízkou tepelnou stopu a vysokou provozní spolehlivost, což jsou vlastnosti zásadní pro vojenské využití. Na rozdíl od běžné dopravy však nelze tvrdit, že by technologie palivových článků tvořila standard napříč celým armádním sektorem; její využití zůstává soustředěno především do vybraných specializovaných aplikací.

Závěr

Vodíkové technologie procházejí obdobím realistického přehodnocení svých možností. Zatímco masové rozšíření osobních vozidel s palivovými články se zatím nenaplnilo, vodík si nadále udržuje významnou pozici v oblastech, kde bateriová řešení narážejí na technická omezení. Největší potenciál se proto aktuálně soustřeďuje do těžké nákladní dopravy,

autobusů, železniční a námořní dopravy, průmyslových aplikací a systémů dlouhodobého ukládání energie. O konečném rozsahu budoucího využití rozhodne především rozvoj infrastruktury, dostupnost nízkoemisního vodíku a ekonomická konkurenceschopnost vůči rychle se vyvíjejícím bateriovým technologiím.

Náměty pro výzkumné projekty:

- Vývoj pokročilých materiálů pro anodové a katodové desky palivových článků
- zkoumat nové druhy elektrolytů, které budou mít vysokou vodivost společně s elektrochemickou, chemickou a tepelnou stabilitou

Zdroje:

1) *K. Svoboda, M. Hartman, O. Trnka: Vysokoteplotní palivové články, vhodná paliva a možnosti jejich využití, https://www.tzb-info.cz/1837-vysokoteplotni-palivove-clanky-vhodna-paliva-a-moznosti-jejich-vyuziti-i*

2) BMW Group. BMW Group and Toyota Motor Company pioneer next generation of hydrogen fuel cell technology.
https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0447132EN/

3) Toyota Motor Europe. Toyota reinforces its multi-pathway approach and its commitment to customer-focused innovation.
https://newsroom.toyota.eu/toyota-reinforces-its-multi-pathway-approach-and-its-commitment-to-customer-focused-innovation/

4) Cellcentric GmbH & Co. KG. About us – Home of advanced heavy-duty fuel cell systems.
https://www.cellcentric.net/en-us/about-us

5) Mercedes-Benz Group. Daimler Truck AG and the Volvo Group complete creation of fuel-cell joint venture: cellcentric.
https://group.mercedes-benz.com/investors/reports-news/financial-news/20210301-fuell-cell-jv-cellcentric.html

6) Toyota Motor Corporation. Multi-Pathway Approach toward Carbon Neutrality.
https://global.toyota/pages/fact-data/fact-data_002_02_en.pdf

7) Toyota USA Newsroom. Toyota Provides Technology Roadmap at the 2025 Hydrogen and Fuel Cell Seminar.
https://pressroom.toyota.com/toyota-provides-technology-roadmap-at-the-2025-hydrogen-and-fuel-cell-seminar/

5.3.4. Akumulace tepelné energie

Termochemické skladování energie je založeno na reverzibilních chemických reakcích s velkým rozdílem entalpie mezi reaktanty a produkty. Umožňuje v zásadě trvalé, bezztrátové, vysokoenergetické akumulování tepla. Tepelná akumulační média se používají v různých oblastech s různými profily materiálů v závislosti na aplikaci a teplotním rozsahu. Nižšímu teplotnímu rozsahu (20–120 °C) v současnosti dominují systémy na bázi vody. Materiály s fázovou změnou (PCM) mohou také ukládat tepelnou energii a pracovat při konstantní

teplotě v závislosti na specifickém fázovém přechodu. Sorpční skladování využívající reverzibilní desorpční/adsorpční procesy je vhodné pro teplotní rozsahy 100–150 °C. Při vyšších teplotách (až 1000 °C) lze teplo ve formě citelného tepla akumulovat a hraje klíčovou roli při ukládání energie v solárních tepelných elektrárnách.

Návrh výzkumných úkolů:

• Vývoj reverzibilních termochemických reakcí, jako je CaO/CaCO3, k zajištění aplikací s vysokou hustotou energie, které pokrývají co největší rozsah teplot.

• Vývoj systémů přeměny tepla pro efektivní zvýšení nízkoteplotního (odpadního) tepla na příslušné teplotní úrovně, aby se do procesu (znovu) zavedla tepelná energie.

• Vývoj kombinovaných systémů, např. sorpce s termochemickou reakcí a přemostění různých teplotních rozsahů pro řízenou dodávku tepelné nebo chladicí energie

• Vývoj procedurálních otázek týkajících se systémové integrace a přenosu tepla v integrovaných energetických systémech.

Očekávané přínosy:

Skladování tepelné energie bude zásadním příspěvkem k integrovanému úsilí o energetickou účinnost ve stavebnictví, zpracovatelském průmyslu a energetickém systému jako celku, každý se svými specifickými požadavky. Navrhovaný výzkum vyvine nástroje a řešení pro efektivnější využití tepelné energie. V průmyslu to přispěje ke snížení energetické náročnosti a spotřeby paliv v prvovýrobě a přispěje k umožnění průmyslové symbiózy.

6. Vodíková strategie České republiky

Rozvoj vodíkového hospodářství v ČR se řídí aktualizovanou Vodíkovou strategií České republiky z roku 2024. Strategie počítá do roku 2030 s cca 400 MW elektrolyzérů a výrobou přibližně 20 tis. t obnovitelného vodíku ročně a člení vývoj do fází „lokální ostrovy“ (do 2030), „globální mosty“ (2030–2045, dovoz vodíku) a „nové technologie“ (po 2045). Klade důraz na dekarbonizaci obtížně elektrifikovatelných průmyslových procesů, rozvoj výroby obnovitelného a nízkouhlíkového vodíku, dovozní infrastrukturu, skladování, bezpečnost a propojení českého trhu s evropskou vodíkovou sítí. Vodík nemá být univerzální náhradou fosilních paliv; prioritně se má využívat tam, kde přímá elektrifikace není technicky nebo ekonomicky vhodná.
Dva strategické cíle: snižování emisí skleníkových plynů a podpora ekonomického růstu.
Základní pilíře Vodíkové strategie:
• výroba nízkouhlíkového vodíku,
• využití nízkouhlíkového vodíku,
• doprava a skladování vodíku.
Tři základní barvy vodíku

- Šedý vodík se získává z fosilního plynu. Emise CO_2 nejsou zachycovány a proudí přímo do atmosféry.
- Modrý vodík je „zelenější“ variantou toho šedého. Původ je stejný, ale v tomto případě se emise zachycují a skladují pod zemským povrchem. V současné době však existuje jisté procento emisí, které se i tak dostanou do atmosféry.
- Zelený vodík vzniká za pomoci obnovitelných zdrojů. Při výrobě nedochází k uvolnění skleníkových plynů. Největším limitem tohoto typu vodíku je jeho vysoká cena.

Environmentální přínos vodíku závisí na emisích celého výrobního řetězce. Obnovitelný vodík se vyrábí elektrolýzou s využitím elektřiny z obnovitelných zdrojů za podmínek stanovených právními předpisy EU pro obnovitelná paliva nebiologického původu. Nízkouhlíkový vodík může pocházet také z jiných výrobních cest, pokud splní příslušnou emisní prahovou hodnotu a pravidla výpočtu úspor emisí skleníkových plynů. Jaderná elektřina proto může přispívat k výrobě nízkouhlíkového vodíku, nikoli však automaticky k výrobě obnovitelného vodíku.

Klasifikace vodíku podle čistoty:

- Vodík pro palivové články PEM.

Vyžaduje nejvyšší chemickou čistotu, aby bylo zajištěno, že ani při dlouhodobém provozu nedojde k degradaci a poškození palivových článků. (norma ISO 14687:2019 Hydrogen fuel quality – Product specification), která pro PEM palivové články vyžaduje čistotu vodíku min. 99,97 % a velmi nízké limity nečistot (např. CO max. 0,2 ppm, celková síra max. 0,004 ppm). Takový vodík se převážně vyrábí elektrolýzou vody, případně z plastových odpadů s využitím plazmatu. Vodík vyrobený PEM elektrolýzou vody lze po vysušení použít v PEM palivových článcích. Vodík vyrobený alkalickou elektrolýzou je navíc potřeba zbavit zbytků kyslíku a par elektrolytu.

- Vodík pro ostatní použití

Při ostatním využití nejsou na čistotu vodíku kladeny zdaleka tak vysoké nároky. Vodík se v tomto případě využívá převážně jako vstupní surovina chemické reakce, případně pro výrobu tepla spalováním. Požadavky na čistotu proto mohou být definovány konkrétním použitím, které může být citlivé na příměsi specifických látek. Příměsi a nečistoty je nutné posuzovat z pohledu konkrétní chemické reakce.

Nízkouhlíkový vodík je dražší, než standardně používaný vodík a Vodíková strategie ČR předpokládá, že vodíkovou mobilitu bude třeba dotovat minimálně do roku 2030.
Vodíkové technologie patří ke špičkovým zařízením, jejichž výroba vyžaduje rozsáhlý a nákladný výzkum, vývoj a inovace. Výroba těchto technologií je možná jen v případě, že budeme mít rozvinutou výzkumnou a vývojovou základnu. Je nutné efektivně propojit práci výzkumných organizací, vysokých škol a výrobních podniků.

Výroba, využití, doprava a skladování vodíku vyžadují využití nových technologií. Ačkoliv základní technologie pro výrobu a využití vodíku jsou známé, jde o technologie, které jsou relativně drahé. Očekává se, že investice vložené do dalšího vývoje a výzkumu přinesou snížení ceny těchto technologií. Pokud má být naplněn strategický cíl podpory ekonomického růstu, je třeba zajistit, aby výroba těchto technologií probíhala i v ČR a aby nahradila výroby spojené s využitím fosilních paliv. Je to proces na poměrně dlouhou dobu, investičně velmi náročný, vyžadující širokou mezinárodní spolupráci.

Pro naplnění cílů vodíkové strategie bude ČR muset nízkoemisní vodík každopádně dovážet. Dovoz ze severní Afriky, Ukrajiny, plánují také další evropské země. Reálnější je splnit podmínku stoprocentního spalování nízkoemisních plynů k roku 2035.
Biometan, ale i zvláště vodík budou ovšem kvůli vysoké poptávce, omezeným výrobním možnostem a nutnosti technických opatření výrazně dražší než fosilní zemní plyn, což se promítne do cen energií.
V současnosti je energeticky nejúčinnějším způsobem výroby vodíku přímá přeměna fosilních paliv parciální oxidací zemního plynu a odpadních uhlovodíkových frakcí, parní reforming i s účinností kolem 70 % **2)**. Při produkci šedého vodíku, vyrobeného parním reformingem zemního plynu, emise CO_2 se v průměru pohybují okolo 8,8 kg na 1 kg vyrobeného vodíku.

Elektrolýza vody dosahuje podle typu a provozních podmínek účinnosti přibližně 60–75 % vztažené k výhřevnosti vodíku. Praktická spotřeba moderních elektrolyzérů se obvykle pohybuje přibližně mezi 50 a 60 kWh elektrické energie na kilogram vodíku, k čemuž je nutné připočíst energii na úpravu vody, kompresi, případně zkapalnění a skladování. Celková účinnost řetězce elektřina–vodík–elektřina je výrazně nižší než u přímého využití elektřiny nebo bateriového ukládání, a proto je vodík vhodný především pro dlouhodobé ukládání energie, průmyslové suroviny a obtížně elektrifikovatelné aplikace.

Velkou nevýhodou výroby pomocí elektrolýzy je ale stále malá efektivita, kdy je na samotnou výrobu vodíku nutné vynaložit velké množství energie. I přes to, že v současnosti vědci vytváří vylepšení pro elektrolyzéry, které by měly dosahovat větší efektivity, proces zatím nejde tak rychle.
Chemický průmysl ČR bude využívat vodík dvěma hlavními způsoby:

• Jako surovinu pro chemický průmysl:
Strategie pracuje s množstvím vodíku, které se zpracovává nyní, s tím, že v budoucnu toto množství pravděpodobně poklesne kvůli snížení výroby benzínu a nafty v rafineriích, nicméně může to být eliminováno rostoucími požadavky na výrobu syntetických paliv. Díky taxonomii a zejména směrnici RED III (v roce 2030 musí 42 % vodíku spotřebovaného v průmyslu pocházet z obnovitelných zdrojů – RFNBO, v roce 2035 60 %) bude vyvíjen tlak na postupné nahrazování šedého vodíku nízkouhlíkovým a obnovitelným vodíkem.

• Jako zdroj tepla
Neočekává se, že by tak byla nahrazena veškerá současná energetická spotřeba zemního plynu. Ten bude nahrazován i biometanem a elektrickou energií. Tento proces je výrazně ovlivněn ukončováním dovozu plynu z Ruska – podle nařízení EU přijatého v lednu 2026 skončí dovoz ruského LNG do konce roku 2026 a plynovodního plynu na podzim 2027.

V souladu s Evropskou vodíkovou strategií dělíme jednotlivé kroky do tří etap:

Aktualizace Vodíkové strategie ČR, kterou vláda schválila 17. 7. 2024, rozděluje rozvoj vodíkového hospodářství do tří fází: „lokální ostrovy“ (do roku 2030), „globální mosty“ (2030–2045) a „nové technologie“ (po roce 2045). Nahradila tak původní etapizaci ze strategie z roku 2021.

Vyhodnocení období 2021–2025

Původní strategie z roku 2021 dávala v první etapě (2021–2025) přednost dopravě a budování prvních lokálních distribučních míst. Počítala s tím, že vodík se bude kvůli vysokým nákladům na přepravu vyrábět v blízkosti místa spotřeby, převážně z obnovitelných zdrojů elektřiny. Jako další možný lokální zdroj nízkouhlíkového vodíku uváděla pyrolýzu organického odpadu nebo zemního plynu, pokud se podaří překonat technologické překážky a vyřešit započítávání emisí.
Skutečný rozvoj byl pomalejší:

- **Plnicí stanice:** do roku 2025 vznikly v ČR čtyři vodíkové stanice – dvě veřejné stanice ORLEN Benzina v Praze-Barrandově a v Litvínově-Záluží (obě 2023), stanice společnosti Vítkovice v Ostravě (2022) a výzkumná stanice VŠB-TUO. Další stanice byly ve fázi přípravy.
- **Výroba vodíku elektrolýzou:** zůstala u pilotních projektů o výkonu v řádu jednotek MW.
- **Přimíchávání vodíku do plynárenské soustavy:** testovala ho společnost GasNet. V Hranicích u Aše postavila elektrolyzér pro zkoušky přimíchávání vodíku do distribuční sítě, v Pardubicích vybudovala zkušební polygon pro ověřování materiálů a zařízení.
- **Pyrolýza metanu:** se v ČR v průmyslovém měřítku nerozvinula.
- **Financování:** zásadní podpora přišla až na konci období, kdy vláda v lednu 2025 vyčlenila z Modernizačního fondu 3 mld. Kč na výstavbu elektrolyzérů.

Fáze 1 – „lokální ostrovy“ (do roku 2030)

V této fázi se počítá s malými lokálními projekty, které propojí výrobu a spotřebu obnovitelného vodíku. Cílem je vybudovat přibližně 400 MW elektrolyzérů a vyrábět zhruba 20 tis. t obnovitelného vodíku ročně. To odpovídá požadavku směrnice RED III, aby v roce

2030 pocházelo 42 % vodíku spotřebovaného v průmyslu z obnovitelných zdrojů. Obnovitelný vodík má postupně nahrazovat část z přibližně 125 tis. t šedého vodíku, který se dnes v ČR spotřebovává hlavně v chemickém průmyslu a v rafinériích.
Podle Národního akčního plánu čisté mobility má v dopravě do roku 2030 vzniknout až 50 plnicích stanic a jezdit 380 nákladních vozidel a 200 městských a příměstských autobusů na vodík.
V této fázi má začít provozní ověřování využití vodíku v průmyslu. Jeho rozsah bude záviset hlavně na výstavbě velkých solárních a větrných elektráren propojených s elektrolyzéry a se zařízeními na stlačování nebo zkapalňování vodíku. Současně se připravuje přeprava vodíku: páteřní přepravní síť má vzniknout zejména úpravou stávajících plynovodů NET4GAS (tzv. repurposing) kolem roku 2030, a to jak pro domácí přepravu, tak pro tranzit přes ČR. Přimíchávání vodíku do stávající plynárenské sítě má jen omezený význam. Obnovitelný a nízkouhlíkový vodík se má přednostně využívat tam, kde nelze přímo elektrifikovat, tedy v průmyslu a těžké dopravě, nikoli k vytápění domácností.
Nelze vyloučit, že se ČR v delším období bude potýkat s nedostatkem elektrické energie. Elektřina z obnovitelných zdrojů by pak přednostně pokrývala spotřebu elektřiny a poptávka po ní by dále rostla s elektrifikací a dekarbonizací průmyslových výrob. Výroba vodíku elektrolýzou by tak byla omezená. Strategie proto zvažuje i další způsoby výroby nízkouhlíkového vodíku, včetně využití elektřiny z nových jaderných zdrojů a v budoucnu i z malých modulárních reaktorů. Takový vodík je podle pravidel EU nízkouhlíkový, nikoli obnovitelný.
Technologie, jejichž realizaci očekáváme do roku 2030:

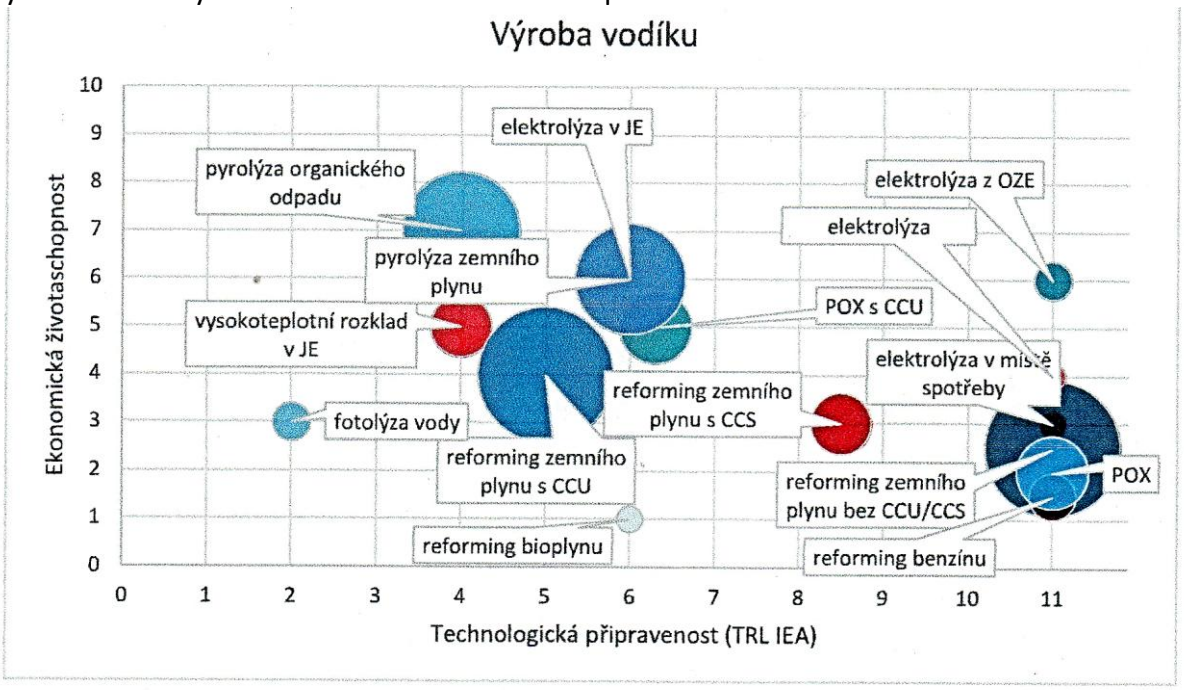
- propojení OZE s vysokoteplotní elektrolýzou/palivovým článkem
- konkurenceschopná koelektrolýza oxidu uhličitého a vody, získávání syntézního plynu a jeho následné zpracování na hodnotné chemické látky, typicky plynná a kapalná paliva
- snížení nákladů na metanizační jednotky a jejich instalace ve středně velkých podnicích
- distribuovaná výroba biometanu
- zlepšené vlastnosti reformerů pro přímé využití zemního plynu v PEM palivových článcích

Fáze 2 – „globální mosty“ (2030–2045)
Domácí výroba nepokryje celou poptávku, a proto se ČR po roce 2030 zaměří na dovoz vodíku panevropskou sítí vodíkovovodů. Vodík by mohl přicházet ze severní Evropy a oblasti Baltu, ze Středomoří a severní Afriky, případně z Ukrajiny. Masové nasazení vodíkových technologií v průmyslu bude možné až po vybudování této infrastruktury.

Fáze 3 – „nové technologie“ (po roce 2045)
V této fázi se počítá s domácí výrobou vodíku novými technologiemi, například reverzibilní elektrolýzou, jadernými reaktory IV. generace nebo koelektrolýzou dusíku a vody na amoniak. Cena vodíku by přitom mohla klesnout až ke 2 EUR/kg, zatímco dnes je to bez dotací zhruba 13 EUR/kg.

Vodíkové technologie s sebou nesou i řadu souvisejících technologických výzev, a to zejména pro měřicí zařízení, bezpečnostní technologie, různé typy baterií, čerpadel či součástí zařízení, pokročilé materiály (např. nové druhy ocelí pro vysoké tlaky vodíku až 1 100 bar).
Česká skupina Solar Global provozuje od roku 2023 v Napajedlech ve Zlínském kraji první průmyslový elektrolyzér na výrobu zeleného vodíku v ČR. Elektrolyzér má výkon 230 kW, je napájen ze střešní fotovoltaické elektrárny o výkonu 610 kWp a vyrábí přibližně 8 t vodíku ročně o čistotě 99,999 %. V říjnu 2025 zahájila společnost s podporou Modernizačního fondu výstavbu veřejné plnicí stanice, která má být v komerčním provozu od ledna 2027. Areál má postupně získat další elektrolyzéry o celkovém výkonu až 13 MW a bateriové úložiště o výkonu 9 MW. Vodík má sloužit osobní i nákladní dopravě a veřejné dopravě ve Zlínském kraji.
Orlen Unipetrol připravuje u rafinerie v Litvínově výrobu obnovitelného vodíku. Projekt počítá s fotovoltaickou elektrárnou o výkonu 54 MW a třemi PEM elektrolyzéry o celkovém příkonu 30 MW, které mají vyrábět přibližně 913 t obnovitelného vodíku ročně pro potřeby rafinerie. Ústecký krajský úřad záměr v dubnu 2025 nejprve zamítl kvůli dopadům na chráněné druhy. V říjnu 2025 k němu pak vydal souhlasné jednotné environmentální stanovisko s odkazem na strategický význam projektu pro plnění směrnice RED III. Výstavba má podle plánu probíhat od jara 2026 do konce roku 2028

Metody přípravy vodíku:
Náklady na dodávku vodíku do značné míry závisí na nákladech na spotřebovanou energii a její ceně. Doposud je hlavním producentem vodíku rafinérsko-petrochemický sektor (vodík je vedlejší produkt v rafinérských procesech např. reformování nebo při výrobě ethylenu vysokoteplotní pyrolýzou), účelová výroba vodíku se u nás děje především parciální oxidací (zplyňováním) primárních ropných zbytků nebo zbytkových frakcí ze štěpných procesů (visbreaking). Tzv. vodíkovou ekonomiku (včetně využití vodíku v procesech CCUS), a tedy výzkumné směry v oblasti vodíku lze načrtnout pomocí obrázku č. 4.



Aby mohl být vodík v EU uznán jako nízkouhlíkový, musí dosáhnout úspory emisí skleníkových plynů nejméně 70 % oproti fosilnímu srovnávacímu palivu (94 g CO_2ekv./MJ), tj. emisí nejvýše cca 28,2 g CO_2ekv./MJ H_2 (přibližně 3,4 kg CO_2ekv./kg H_2). U současných technologií lze dosáhnout snížení emisí pomocí technologií záchytu a ukládání CO_2 (CCS) nebo záchytu a využití CO_2 (CCU). Možnosti CCS vyžadují vedle zachycení produkovaného CO2 i jeho transport na místo uskladnění. Samotná technologie Parní reformování (SMR) + CCS založená na separačních procesech dle Mezinárodní energetické agentury (IEA) zvyšuje spotřebu zemního plynu o 10 % a ekonomické náklady o 50 %.
Plán REPowerEU z roku 2022 stanovil jako cíl vyrobit v EU do roku 2030 10 milionů tun vodíku z obnovitelných zdrojů a dalších 10 milionů tun dovézt. K tomu by bylo potřeba přibližně 40 GW elektrolyzérů. Potřeba investic do klíčové vodíkové infrastruktury se odhaduje na 28–38 miliard EUR pro plynovody uvnitř EU a 6–11 miliard EUR pro ukládání.
Evropský účetní dvůr ve zvláštní zprávě 11/2024 (červenec 2024) označil tyto cíle za příliš ambiciózní. Podle něj vycházely spíše z politického rozhodnutí než z důkladné analýzy a nejspíš nebudou splněny. Kritizoval také roztříštěnost podpory: na období 2021–2027 je sice k dispozici zhruba 18,8 mld. EUR, ale rozdělených mezi řadu programů. Komisi doporučil vodíkovou strategii aktualizovat, určit priority financování a rozhodnout, která odvětví podporovat domácí výrobou a která dovozem.
Skutečný vývoj za cíli výrazně zaostává. Na konci roku 2025 bylo v Evropě v provozu jen asi 570 MW elektrolyzérů ve 140 projektech a dalších přibližně 3,3 GW bylo ve výstavbě s dokončením do roku 2029. Evropská vodíková banka ve třech aukcích do května 2026 podpořila řadu projektů. Ve třetí aukci přidělila 1,09 mld. EUR devíti projektům o celkovém výkonu 1,1 GW. Závazné cíle pro spotřebu obnovitelného vodíku (RFNBO) v průmyslu a dopravě dnes stanoví směrnice RED III. Tempo výstavby však naznačuje, že cíle plánu REPowerEU pro rok 2030 splněny nebudou.

- Parní reforming

Parní reforming zemního plynu dosahuje účinnosti kolem 70 %. Ačkoliv tento způsob výroby vodíku je zatížen uhlíkovou stopou ze zemního plynu, je kvůli energetickému mixu ČR tato uhlíková stopa nižší než uhlíková stopa vodíku vyrobeného elektrolýzou z elektrické energie ze sítě. Jedná se o nejlevnější výrobu vodíku. Výroba vodíku parciální oxidací ropných zbytků (POX) v podmínkách ČR představuje největší objem výroby vodíku. Jedná se o léta aplikovanou a technicky stoprocentně zvládnutou technologii.
Zásadní nevýhodou je vysoká emisní stopa – 125 g CO2 /MJ. Tu lze snížit pouze pomocí dodatečných technologií CCS/U. V současnosti již dochází k zachycování a částečnému využití zachyceného CO_2. Hledají se cesty, jak zvýšit záchyt CO_2 a jak nalézt využití pro zachycený CO2 přímo v chemické výrobě. Účelem této výroby je spotřeba vodíku v chemickém průmyslu, nelze tudíž předpokládat výrazné přebytky pro další použití.

Alternativou těchto zavedených petrochemických technologií je výroba vodíku reformingem benzínu. Při katalytickém reformování benzínu je uvolňován vodík spolu s aromatickými uhlovodíky. Velmi vysoká je ale emisní stopa, kterou nebude možné technologicky snižovat a je zde nutnost dalšího čištění vodíku.

- Chlor-alkalická elektrolýza **2)**

Jedná se o jeden z energeticky nejnáročnějších procesů v chemickém průmyslu, jehož primárním cílem je výroba chloru, nebo hydroxidu sodného / draselného, nikoliv výroba vodíku. V současné době je jediným velkým provozem využívajícím elektrickou energii k produkci vodíku v ČR je chlor-alkalická technologie provozovaná ve Spolchemii v Ústí nad Labem. Z důvodu složení mixu produkce elektrické energie v ČR, je takto vyráběný vodík zatížen srovnatelnou emisní stopou, jako má proces POX. Emise 123 gCO_2/MJ H2 (14,8 $kgCO_2$/kg H2).

- Elektrolýza vody **2)**

V současném technologickém vývoji je nejsilněji prosazovaným přístupem k poskytování vodíku elektrolytické štěpení vody na vodík a kyslík. Elektrolýza vody je předmětem četných studií a vědeckých publikací.
Jedná se o alkalickou elektrolýzu s použitím 20–40% roztoku hydroxidu draselného jako elektrolytu a elektrod potažených niklem. Poločlánky jsou od sebe odděleny membránou. Alkalickou elektrolýzu lze provádět buď pod tlakem s výstupním tlakem vodíku až 40 bar, nebo bez tlaku. Kromě energetických nároků (v současné době 55 kWh/kg vodíku) je k výrobě potřeba vysoce čistá voda o objemu 9 litrů/kg H2. Alkalická elektrolýza je dnes zřejmě nejlevnější technologie elektrolytické výroby vodíku.
Potřeba energie je u beztlakových systémů nižší než u tlakových elektrolyzérů. V druhém případě se pohybuje kolem 4,6 kWh/Nm^3 vodíku (tj. cca 51 MWh/t vodíku), do roku 2050 se očekává další snížení na 4,4 kWh/Nm^3 (cca 49 MWh/t).
Emise CO_2 z elektrolýzy závisí na tom, z jakého zdroje pochází spotřebovaná elektřina. Při spotřebě přibližně 53 MWh elektřiny na tunu vodíku a emisním faktoru výroby elektřiny v ČR 0,34 t CO_2/MWh (MPO, údaj za rok 2024) vzniká při napájení ze sítě zhruba 18 t CO_2 na tunu vodíku. To je přibližně dvakrát více než u parního reformingu zemního plynu (asi 9 t CO_2/t H_2). S dekarbonizací elektroenergetiky mají tyto emise do roku 2050 klesnout téměř k nule; při napájení z obnovitelných zdrojů jsou prakticky nulové již dnes.
Investiční náklady na elektrolyzéry se podle IEA (Global Hydrogen Review 2025) pohybovaly v roce 2024 v průměru mezi 2 000 a 2 600 USD/kW instalovaného příkonu (v Číně 600–1 200 USD/kW) a do roku 2030 mají klesnout na 1 400–1 820 USD/kW. Roční provozní náklady (OPEX) činí přibližně 3 % investičních nákladů a ekonomická životnost elektrolyzérových stacků je kolem 50 000 provozních hodin. Účinnost elektrolýzy vztažená k výhřevnosti vodíku dosahuje dnes v průměru přibližně 63 %. Výhledově se počítá s jejím zvýšením na 70–78 % v roce 2050, zejména díky vysokoteplotní elektrolýze a pokročilým materiálům.

Pozn.:
CAPEX – zahrnuje pouze výdaje na pořízení elektrolyzéru. Nejsou zde započítány náklady na další prvky celého systému jako např. transformační stanice pro připojení k síti elektrizační soustavy či zdroji elektrické energie, zásobník na vodík, zařízení měřící kvalitu plynu apod. Zahrnuty nejsou ani náklady na zpracování studie, návrh technologie, podobně jako stavební a instalační práce.
OPEX – roční náklady nezávislé na produkci vodíku (např. náklady na mzdy zaměstnanců, pojištění projektu, nájem, údržbu apod.). Položka OPEX nezahrnuje variabilní náklady, které se přímo odvíjejí od objemu produkce vodíku. Takovými jsou zejména náklady na palivo – elektřina a voda.

- PEM elektrolýza (polymerní elektrolytové membrány)

Pro tento typ elektrolýzy se používá pevný polymerní elektrolyt a protony propustná polymerní membrána potažená katalyzátorem, což znamená, že místo hydroxidu draselného lze použít čistou vodu. Elektrolyzéry PEM mají jednodušší strukturu a články lze použít s výrazně vyššími proudovými hustotami a jsou provozovány při tlacích do 100 bar. PEM elektrolyzér má rychlejší start než elektrolyzér alkalický (odpadá nutnost ohřevu velkého množství elektrolytu). Náklady jsou v současnosti stále vyšší než u alkalické elektrolýzy, ale očekává se, že se vyrovnají. Elektrolýza využívající polymerní membránu (PEM) je naopak účinnější, ale elektrolyzéry pro tento účel obsahují vzácné kovy a jsou drahé, i přes značný pokles měrné spotřeby vzácných kovů.

- Vysokoteplotní elektrolýza

Pro vysokoteplotní elektrolýzu vody je charakteristické, že část dodávané energie tvoří elektrická energie a část je přivedena ve formě tepla. Reakce probíhající ve vysokoteplotním elektrolyzéru je reverzní k reakci probíhající v palivových článcích s pevnými oxidy, zařízení je možné použít jako elektrolyzér, nebo jako palivový článek. Do elektrolyzéru vstupuje vodní pára. Vystupuje z něho obohacená směs obsahující 75 % vodíku a 25 % páry. Z ní je oddělen iont kyslíku, který prochází skrze membránu. V případě vysokoteplotní elektrolýzy lze výrazně snížit spotřebu elektřiny pro elektrolýzu. Je zde použit kyslíko-iontově vodivý pevný elektrolyt. Elektrolýza je provozována při 700-1000 °C s párou, přes vazbu s rekuperačním teplem vhodných exotermických procesů je elektřinou aplikována odpařovací entalpie vody. Vodík je pak z páry oddělen v kondenzační jednotce. Zatímco při teplotě 100 °C je pro elektrolýzu třeba 207 MJ na získání 1 kg vodíku, při teplotě 850 °C stačí pro výrobu stejného množství vodíku pouze 133 MJ**. 3)**
Spotřeba elektřiny je dnes cca 3,8 kWh/Nm3 a v budoucnu by se měla snížit na cca 3,6 kWh/Nm3. Tato technologie je však nejméně rozvinutá a v poloprovozních provozech byla zatím využívána jen sporadicky. Hlavní problém je nízká životnost aktivních prvků. Pro další rozšíření technologie je důležité zvýšení životnosti a snížení měrných nákladů formou automatizované výroby zařízení. Rozšíření technologie může také napomoci vysoká cena elektřiny. Mezi přední výrobce vysokoteplotních elektrolyzérů patří:

- **Topsoe (Dánsko):** v říjnu 2025 otevřela v Herningu největší evropskou továrnu na vysokoteplotní elektrolyzéry s pevnými oxidy (SOEC) s roční výrobní kapacitou 500 MW. Podle výrobce dosahuje její technologie přibližně o 20 % vyšší účinnosti než alkalická nebo PEM elektrolýza, při využití odpadní páry až o 30 %.
- **Sunfire GmbH (Německo):** vyrábí vedle alkalických elektrolyzérů i vysokoteplotní SOEC systémy. Do společnosti v minulosti investovala i skupina ČEZ prostřednictvím fondu Inven Capital.
- **Bloom Energy (USA)** a britská společnost **Ceres Power**, která svou technologii pevnooxidových článků poskytuje v licenci průmyslovým partnerům.

Tabulka č. 1 Srovnání jednotlivých typů elektrolyzérů 4)

Parametr		**Alkalická**	**PEM**	**Vysokoteplotní**	**AEM**

		(AEL)		(SOEC)	
TRL	2026	9	8–9	7–8	6–7
Spotřeba elektřiny v kWh/kg H_2 (kWh/Nm^3)	2024	49 (4,4)	52 (4,7)	39 (3,5)[1)]	53 (4,8)
	cíl 2030	48 (4,3)	48 (4,3)	37 (3,3)[1)]	48 (4,3)
	výhled 2050	< 45 (< 4,0)	< 45 (< 4,0)	< 40 (< 3,6)[1)]	< 45 (< 4,0)
Provozní tlak (bar)	současnost	< 30	< 70	< 10	< 35
	výhled 2050	> 70	> 70	> 20	> 70
Životnost stacku (tis. hodin)	současnost	60	50–80	< 20	> 5
	výhled 2050	100	100–120	80	100
Degradace (%/1 000 h)	2024	0,11	0,15	1,0	0,9
	cíl 2030	0,10	0,12	0,5	0,5
Investiční náklady (EUR/kW)[2)]	2024	480	700	1 250	550
	cíl 2030	400	500	520	300

[1)] U SOEC bez tepla dodávaného ve formě páry (typicky dalších 8–10 kWh/kg H_2 z odpadního tepla).
[2)] Náklady podle Clean Hydrogen JU se týkají samotného elektrolyzérového systému. Celkové náklady instalace včetně připojení, úpravy vody, komprese a stavby jsou výrazně vyšší: podle IEA činily v roce 2024 v průměru 2 000–2 600 USD/kW, v Číně 600–1 200 USD/kW.
Zdroj 4): Clean Hydrogen JU – SRIA Key Performance Indicators (stav 2024, cíle 2030); IRENA: Green Hydrogen Cost Reduction (2020) – výhled 2050; IEA: Global Hydrogen Review 2025.

Je nanejvýš nutné chemicky zhodnotit vznikající kyslík (produkovaný ve značném hmotnostním přebytku oproti vodíku, typicky 8:1). Kyslík z elektrolýzy tak může být použit pro řadu procesů, kde je jeho použití výhodnější oproti vzduchu. Zejména to platí o zplyňování, které je nutné realizovat s čistým kyslíkem (dnes frakcionací zkapalněného vzduchu, popř. jednotkami PSA nebo membránami).
Pro zajištění vyššího využití fondu pracovní doby investičně nákladných zařízení se doporučuje propojit elektrolyzéry také s klasickou elektrickou sítí, aby bylo možno vyrábět vodík i v době, kdy nejsou k dispozici zdroje OZE.

Emisní stopa vodíku vyráběného elektrolýzou závisí na původu použité elektřiny a na způsobu prokázání jejího původu. Pro uznání vodíku jako obnovitelného paliva nebiologického původu platí v EU pravidla adicionality a časové a geografické korelace mezi výrobou elektřiny a provozem elektrolyzéru. Certifikační rámec je tak již stanoven; hlavním úkolem je jeho praktická implementace, dostupnost vhodných smluvních modelů a sladění českých projektů s evropskými požadavky.

- Termální gasifikace – využití bioplynu/biometanu

Biomasa je přeměnitelná na další produkty včetně vodíku za využití termochemických reakcí odehrávajících se při teplotách 200–3000 °C. Jedná se především o pyrolýzu biomasy, při níž jsou získávány plynné produkty, jako je metan, vodík a oxid uhelnatý. Je ale možné reformovat již existující bioplyn vzniklý anaerobní digestací nebo také biometan vzniklý upgradingem bioplynu. V praxi se k dosažení požadovaného stupně konverze využívá přidání velkého množství vodní páry, což umožňuje pracovat za tlaku až 4 MPa. Odpadními látkami procesu jsou oxid uhličitý a oxid uhelnatý. Jedná se o v praxi velmi málo využívanou metodu, jejíž potenciál zřejmě bude omezený.
Výhody lze spatřovat v tom, že výroba bioplynu/biometanu spolu s dalšími využitelnými plyny je efektivní cestou využití biomasy, která má povahu odpadu.
Přeprava bioplynu/biometanu je snadnější než přeprava vodíku (k biometanu stačí přidat určité množství vyšších uhlovodíků a v principu je možné tuto směs vtláčet do sítě zemního plynu). Možnost vyrábět vodík v místě spotřeby. Náklady na další zpracování syntézního plynu jsou a zřejmě zůstanou vysoké.

- Zplyňování biomasy procesem POX nebo s využitím bioplynu

kde je metan pro proces značně znečištěn sulfanem a oxidem uhličitým, vůči kterým je proces POX tolerantní, vede k produkci biovodíku. Spojení elektrolýzy a zplynění procesem POX tak může představovat komplexní integrovanou jednotku produkující vodík z vody a biomasy. Je zřejmé, že tato varianta vyžaduje propojení takovéhoto komplexu se zdrojem obnovitelné energie.

- Využití zemního plynu s CCU

Oproti předchozí technologii navíc uvažuje využití získaného CO_2 v dalších procesech. Pro ČR relevantní technologií může být produkce močoviny, využití v zemědělství a případně při výrobě metanolu. Nevýhodou jsou velmi vysoké náklady (zejména pořizovací investice) a nízká efektivita záchytu CO_2. Ani tato varianta zřejmě nepředstavuje dostatečné využití velikostí odbytu pro dekarbonizaci současných výrob.

- Pyrolýzní výroba vodíku ze zemního plynu

Jedná se o přímou dekarbonizaci zemního plynu, kdy pyrolýzou vzniká vodík a pevný uhlík. K efektivní konverzi metanu jsou dle typu pyrolýzy nutné teploty od zhruba 800 až více než 1000 °C. Oddělený pevný uhlík pak může být uskladněn, nebo využit. Uskladňování a přeprava pevného uhlíku je přitom výrazně technologicky jednodušší než nakládání s plynným CO_2, který je typicky nutné vyčistit, stlačit, přepravit do vhodného místa uložení, dlouhodobě uložit a monitorovat. Ale ani ukládání pevného uhlíku nebude jednoduché, pokud se bude jednat o větší množství. Pevný uhlík je standardně využíván jako plnivo pneumatik nebo jako terénní výplň. Komplexní řešení využití pevného uhlíku se pravděpodobně dostatečně nerozvine, dokud se nebude tato technologie rozvíjet. Existence velkého množství „odpadního“ uhlíku bude stimulovat hledání cest k jeho efektivnímu využití. V současnosti společnost Monolith provozuje od roku 2020 v Nebrasce komerční závod na plazmovou pyrolýzu metanu (výroba sazí a vodíku); BASF provozuje od roku 2024

pilotní jednotku v Ludwigshafenu. Zkušenosti s výrobou vodíku pomocí technologie pyrolýzy zemního plynu jsou prozatím omezené.
Nicméně někteří významní producenti zemního plynu a akademické instituce se zaměřují na výzkum a vývoj této technologie. Jedná se o technologii, díky které se může vodík vyrábět přímo v místě spotřeby, pokud je zde dostupný zemní plyn.

V případě ČR, s omezeným potenciálem domácí výroby obnovitelného vodíku, je zde prostor pro výrobu vodíku z dostupného zemního plynu. K výrobě není třeba vodní zdroj (oproti elektrolýze) a nižší potřeba vstupní energie pro výrobu oproti elektrolýze a parnímu reformingu zemního plynu. Úzkým místem pro realizaci jsou prozatím omezené zkušenosti s technologií. Vzniká také odpadní látka (pevný uhlík), kterou je nutné uložit, nebo využít.

- Pyrolýza metanu

Dalším způsobem, jak zajistit vodík a zároveň se vyhnout energetickým nebo hmotným emisím CO_2, je pyrolýza metanu, tepelné nekatalytické štěpení metanu na vodík a uhlík při vysokých teplotách.

$$CH_4 \rightleftharpoons 2\ H_2 + C \quad \Delta H = +75\ kJ/mol\ (tj.\ cca\ 37{,}5\ kJ\ na\ mol\ H_2)$$

Ve srovnání s parním reformováním poskytuje pyrolýza metanu pouze polovinu vodíku v poměru k použitému metanu. Pokud potřeba tepla nepochází ze spalování methanu, ale z obnovitelných zdrojů energie, vzniká při pyrolýze methanu jen málo CO_2. TRL pro pyrolýzu metanu je v současnosti 5-6 a technická připravenost k použití se očekává od roku 2040.

Energetická a CO_2 bilance a také analýza nákladů byly zatím provedeny v rané vývojové fázi technologie. Stechiometricky je potřeba 3,98 t metanu na tunu vodíku, v reálném procesu je potřeba methanu dle aktuálních poznatků VaV vyšší cca o 0,5 t z důvodu ztrát. Emise CO_2 z těchto ztrát (především nezreagovaný methan) jsou na maximu 0,26 t na t vodíku, pokud jsou spáleny zbývající proudy proplachovacího plynu. To odpovídá pouze 5 % emisí z parního reformování. Úplné snížení těchto emisí je možno řešit přídavnou separací metanu z proplachovacího plynu nebo metanizace CO_2 ze spalování a recirkulací. Je to sice technicky proveditelné, ale toto řešení může být vyvinuto až poté, co bude zvládnut samotný proces pyrolýzy metanu. Potřeba elektřiny pro ohřev pyrolýzy a stlačení vyrobeného vodíku od 2 do 70 barů je 9,5 MWh na t vodíku. Energie potřebná k poskytnutí vodíku pyrolýzou metanu je proto výrazně nižší než energie elektrolýzy vody.
Elektrický ohřev metanové pyrolýzy je technicky složitý. Investiční náklady se zpočátku odhadují na 3500 EUR/t vodíku, přičemž lze v dlouhodobém horizontu očekávat výrazné snížení nákladů ve srovnání s počátečním zařízením. Vedlejším produktem pyrolýzy metanu je relativně čistý uhlíkový produkt, který potenciálně lze použít jako náhradu uhlí v koksovacím a vysokopecním procesu nebo při výrobě hliníku. Pyrolýzou metanu se na tunu vodíku vyrobí přibližně 3 tuny uhlíku. Na druhou stranu se bilance opět vyrovná, pokud se použije metan z bioplynu.
Emise CO_2 0,26 t CO_2/t H2 jako ztráty methanu, 4,56 t CO_2 ze spotřeby elektřiny (ta by měla být v roce 2050 nulová.) CAPEX 1 630 EUR/t H_2, OPEX 175 EUR/t vodíku. Další technologické přístupy, jako je termokatalytické štěpení metanu, jsou rovněž sledovány.

- Výroba vodíku z plastových odpadů

Skupina japonských firem – Iwatani Corporation, Toyota Tsusho a JGC Holdings – podepsala v prosinci 2022 dohodu o společném podniku na výrobu nízkouhlíkového vodíku zplyňováním plastového odpadu z domácností i průmyslu. Zařízení v přístavní oblasti Nagoji má ročně zpracovat přibližně 80 000 t odpadních plastů a vyrobit asi 11 000 t vodíku. Emise skleníkových plynů mají být přibližně o 85 % nižší než při výrobě vodíku ze zemního plynu. Zahájení provozu se plánovalo na polovinu 20. let. Podobnou technologii přitom v Japonsku dlouhodobě využívá společnost Resonac (dříve Showa Denko), která v Kawasaki od roku 2003 zplyňuje plastový odpad na vodík pro výrobu amoniaku.

Výroba vodíku z odpadu je slibný obor, zabývají se jím však zatím převážně menší firmy a start-upy a komerčních zařízení je jen málo. Kalifornská společnost SGH2 Energy představila v roce 2020 projekt zařízení v Lancasteru (Kalifornie). Mělo zpracovávat 40 000 t odpadu ročně a vyrábět až 12 t vodíku denně, dosud však nebylo postaveno a firma nemá žádný komerční provoz. Společnost Ways2H v roce 2024 demonstrovala termochemickou technologii, která z tuny odpadu vyrobí přibližně 110 kg vodíku a současně zachytí vzniklý CO_2; první komerční zařízení teprve připravuje.

- Technologie výroby vodíku z odpadních plastů s využitím plazmatu

Princip spočívá v rozložení hmoty na základní části působením extrémně vysoké teploty. SGH2 Energy tomu říká SPEG (Solena Plasma Enhanced Gasification) a jak už název napovídá, o vše se postará komora s plazmatrony, která dosahuje teplot 3 500 °C až 4 000 °C. To je dost na to, aby se materiál rozložil na základní molekuly a vznikl syntetický plyn, z něhož se konečně extrahuje velmi čistý vodík (99,9999 %). Proces by měl být podle tvrzení společnosti 5–7× levnější než výroba zeleného, modrého nebo šedého vodíku současnými metodami. A dokonce ekologičtější než zelený vodík vyráběný třeba elektrolýzou.
Podobnou metodu vyvinula česká firma Millenium Technologies a.s. Praha pro výrobu svítiplynu jako náhrady zemního plynu. Ze syntézního plynu lze vyrábět také elektrickou energii v kogeneračních jednotkách. To znamená, že mohou vyrábět kombinovaně elektrickou energii a teplo – a tu pak dodávat do sítě a její pomocí vytápět. Když je syntézní plyn vyroben z kvalitních surovin, může být využit také materiálově. To znamená, že z něj může být vyráběn například vodík, amoniak, metanol. Plazmové reaktory, které Millenium Technologies vyvíjí, testuje už od roku 2010 v technologickém parku v Dubé.

- Hlubší energetické zpracování odpadní biomasy parciální oxidací v přítomnosti vodní páry na syntézní plyn

S významným obsahem vodíku představuje velkou výzvu pro výzkum a vývoj. Technologie parciální oxidace odpadního šrotu může být řešena v návaznosti na parciální oxidaci ropných zbytků, která se desítky let využívá v ropných rafineriích pro petrochemickou produkci vodíku. Hlavní rozdíl mezi zpracováváním ropných zbytků a odpadní biomasy z lisování oleje spočívá především v tom, že struktura biomasy obsahuje kromě uhlíku a vodíku další biogenní prvky (kyslík, síra, dusík, fosfor) a také popeloviny. Simulační výpočty procesu zplyňování biomasy byly provedeny na VŠCHT s modelovými zástupnými látkami (na základě dostupnosti dat o jejich vlastnostech): glukosa, vanilin, n-butylstyren, glycin, methionin, etylfosfát. V případě visbreakingového zbytku byly zvoleny tyto zástupné látky: naftalen, dodekan, benzothiofen, chinolin a antrachinon. Proces parciální oxidace byl simulován s

použitím programu AspenPlus. Při simulačních výpočtech byla v prvním stupni uvažována pyrolýza, resp. krakování suroviny, dekompozice jednotlivých složek na prvky a jejich parciální oxidace (bilanční reaktor Ryield). Ve druhém stupni byla řešena komplexní chemická rovnováha mezi vzniklými produkty minimalizací Gibbsovy energie (rovnovážný reaktor RGibbs). Při výpočtu byly uvažovány tyto reakční podmínky: surovina - 10 % řepkového šrotu v uhlovodíkovém zbytku z visbreakingu; vstupní teplota proudů 250 °C; tlak 3,62 MPa; adiabatické podmínky zplyňování (výstupní teplota nad 1300 °C). Na základě provedených výpočtů byla postavena čtvrtprovozní aparatura se zplyňovacím reaktorem vnitřního průměru 0,4 m a výšky 2 m, se žáruvzdornou vyzdívkou, opatřeným koaxiální tryskou pro přívod suspenze řepkového šrotu ve směsi uhlovodíků, kyslíku (vzduchu) a vodní páry. Výsledky ukázaly, že současné zpracování obou odpadů může přispět ke zvýšení produkce vodíku o 2,5 % při současném snížení spotřeby jak kyslíku, tak i páry o 5 %. Ukázalo se, že jak poměr vodní páry k přiváděné surovině (v rozmezí 0,4-0,5**5)**, tak i obsah řepkového šrotu ve směsi odpadních uhlovodíků (v rozmezí 5-10 %) má malý vliv na molární zlomek vodíku v produktu. Současně bylo zjištěno, že přídavkem řepkového šrotu k odpadním uhlovodíkům v množství 10 % se zvýší produkce vodíku o cca 2,5 %, přičemž se sníží měrná spotřeba komprimovaného kyslíku a páry o 5 %. Experimentální a modelové výsledky byly pak publikovány v následující práci - **6)**.

- solární tepelné metody

Využití fotochemické nebo foto-elektrochemické technologie (aktivace slunečním světlem). Jedná se o výrobu vodíku přímou fotolýzou vody při využití vysoce účinných a sluneční světlo absorbujících podložek s celkovým výtěžkem konverze sluneční energie vyšším než 14 %. Tato hodnota odpovídá komerčně a technicky přijatelné míře zavedení tohoto postupu do masové produkce. Výhodou je zavedení foto-elektrochemických postupů a vývoj materiálů, které by neobsahovaly vzácné kovy a zároveň byly schopné dosáhnout aspoň 90 % účinnosti ve štěpení při současné aplikaci elektro a fotoaktivace.

Stejně jako elektrolýza vody je solární termální štěpení vody předmětem intenzivního výzkumného úsilí. Zralost průmyslové aplikace lze očekávat v příštích 15 letech, ale ČR má pro tento způsob zásadní lokační nevýhodu ve srovnání s jinými, slunnějšími regiony a investiční náklady jsou ve srovnání s jinými metodami velmi vysoké. V současnosti největší testovací zařízení pro solární termální štěpení vody o výkonu 750 kW je provozováno za významné účasti Německého střediska pro letectví a kosmonautiku (DLR) v rámci projektu Hydrosol Plant v Almeríi (Španělsko).

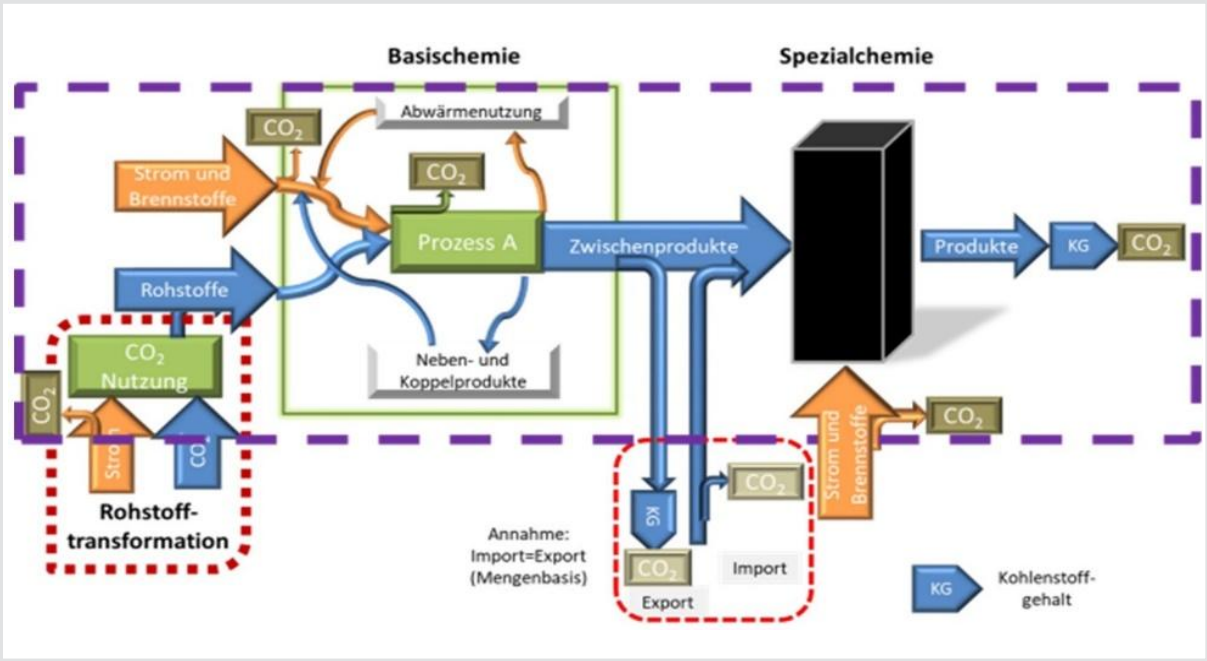
Vědci z americké Národní laboratoře pro obnovitelnou energii (NREL, dnes National Laboratory of the Rockies - NLR) mají slibnou metodu, jak vyrábět efektivněji zelený vodík. Jejich metoda pro výrobu solárního termochemického vodíku totiž oproti elektrolyzérům využívá dvoustupňový chemický proces, kdy jsou oxidy kovů vystaveny teplotám vyšším než 1 400 °C a následně oxidovány párou při nižších teplotách. Díky tomu vznikne vodík, který pro svou výrobu potřebuje mnohem menší množství energie, než je tomu u standardně využívané elektrolýzy. Podle nich by měly být k této metodě výroby vodíku vhodné perovskitové materiály, pokud by dokázaly odolávat vysokým teplotám, které v procesu vznikají.

Vodík je v současnosti důležitým nosičem pro ukládání energie vyrobené z obnovitelných zdrojů, náhradou za fosilní paliva pro dopravu, pro výrobu amoniaku, ale také pro další průmyslové aplikace. Klíčem k úspěšnému využívání vodíku jako paliva je schopnost splnit cíl, jehož smyslem je snížit cenu čistého vodíku o 80 procent na jeden dolar za kilogram v řádu deseti let (iniciativa Hydrogen Shot amerického ministerstva energetiky z roku 2021, cíl do roku 2031).

Jako příklady dalších řešených výzkumných projektů lze uvést:
Vysoce účinný kompozitní elektrokatalyzátor pro reakce uvolnění vodíku (Hydrogen Evolution Reaction – HER) a kyslíku (Oxygen Evolution Reaction – OER), které jsou součástí elektrochemického štěpení vody. Katalyzátor využívá unikátní kombinace dusíkem dopovaného oxidu grafenu a sulfidu niklu připraveného transformací nikelnaté kovové organické sítě (MOF). Mimořádná elektrokatalytická účinnost je dána velkou plochou povrchu, hierarchickou strukturou kompozitního 2D systému s velkým objemem pórů, přístupností aktivních kovových center a dopováním grafenové struktury dusíkem. Kompozitní materiál představuje konkurenceschopnou alternativu k doposud používaným a drahým komerčním oxidům na bázi vzácných kovů.

Vědci z CATRIN Olomouc zkoumají možnosti využití multikomponentních hybridních systémů pro přímé solární štěpení vody. Nanostrukturované centrální materiály jsou kombinovány s jinými materiály a nanočásticemi se specifickou funkcionalitou, sloužící k např. optické senzitizaci (rozšířená absorpce ve viditelném spektru), zlepšení dynamiky fotogenerovaných nosičů náboje, zvýšení kinetiky povrchových oxidačně-redukčních reakcí – a tato interakce významným způsobem ovlivní fotoelektrokatalytickou aktivitu celého kompozitního systému. Vyvinuli unikátní technologii založenou na částečné redukci TiO2 ve vodíkové atmosféře za současné tvorby Ti3+ a povrchových defektů. Tyto defekty fungují jako chemické pasti pro ukotvení individuálních atomů platiny po jednoduché impregnaci roztokem Pt4+. Metoda dovoluje elegantně kontrolovat hustotu povrchových defektů, a tedy i míru pokrytí vrstev TiO2 jednotlivými atomy platiny. Takto navázané atomy zvyšují fotokatalytickou účinnost oxidu titaničitého až 150krát ve srovnání s obvykle používanými systémy, v nichž je platina ve formě nanočástic nanesena na povrch TiO2. **7)**

Tzv. vodíkovou ekonomiku (včetně využití vodíku v procesech CCUS), a tedy výzkumné směry v oblasti vodíku lze načrtnout pomocí obrázku č. 5.



V počáteční fázi bude výroba nízkouhlíkového vodíku pomocí elektrolyzérů připojených k obnovitelným zdrojům elektrické energie jedinou cestou. Plánuje se pokračovat ve výstavbě solárních a větrných elektráren a jejich využití pro výrobu vodíku. Přínos obnovitelných zdrojů k výrobě vodíku a efektivita výroby nikdy nemohou být, kvůli našim přírodním podmínkám, na stejné úrovni jako v přímořských zemích nebo v zemích, které leží blíže rovníku. Mimo využití sluneční a větrné energie jsou proto hledány i oblasti, kde nebudeme limitováni přírodními podmínkami. Nejprve se vývoj soustředí na následující způsoby výroby nízkouhlíkového vodíku:

- z obnovitelných zdrojů,
- ze zemního plynu s CCUS,
- pyrolýzním rozkladem (popřípadě plazmovým zplyňováním) různých typů organického odpadu
- v jaderných elektrárnách

Neplánuje se, že by ČR byla zemí vyvážející nízkouhlíkový vodík. Objem výroby je proto odvozen od zpracovávaného objemu nízkouhlíkového vodíku. Předpokládá se, že objem výroby nízkouhlíkového vodíku v ČR má svůj limit, který bude záviset na efektivnosti technologií výroby a dostupnosti obnovitelných zdrojů elektrické energie a bioplynu. Veškeré další požadavky budou muset být uspokojeny dovozem nízkouhlíkového vodíku ze zahraničí. Do roku 2035 nebude pravděpodobně možné využít stávající potrubní infrastrukturu k dovozu vodíku. Ostatní způsoby dopravy vodíku na velké vzdálenosti nejsou zatím příliš efektivní, proto hlavním zdrojem nízkouhlíkového vodíku bude do roku 2035 lokální výroba a cílová čísla odpovídají prognóze spotřeby. Prognóza výroby pro další období bude aktualizována v závislosti na připravenosti přepravní infrastruktury a dostupnosti nízkouhlíkového vodíku v zahraničí.

Tabulka č. 2

Rok	**2026**	**2030**

Kumulovaný výkon elektrolyzérů (MWe)	řádově jednotky MWe (pilotní provozy)[1)]	min. 400 (prioritně do roku 2027)

[1)] Např. Solar Global Napajedla (0,23 MW), pilotní elektrolyzér GasNet. Ve výstavbě je mj. projekt Orlen Unipetrol v Litvínově (30 MW, dokončení do konce roku 2028).
Zdroj: 1) Vodíková strategie ČR – aktualizace 2024 (MPO)

Zdroj : **1)**
Maximalizace spotřeby a výroby nízkouhlíkového vodíku je tedy hlavním indikátorem naplňování Vodíkové strategie ČR. Jeho předpokladem je zavádění progresivních vodíkových technologií a transformace výzkumu, vývoje a inovací. Směrnice RED III (součást balíčku Fit for 55) vyžaduje, aby v roce 2030 pocházelo 42 % vodíku spotřebovaného v průmyslu z obnovitelných zdrojů (RFNBO) a v roce 2035 60 %.

Příklady rozvoje aktivit v rámci Vodíkové strategie v ČR **3)**, **4)**:

ČEZ a. s. – projekt ČEZ v Mníšku pod Brdy představuje největší tuzemskou vodíkovou infrastrukturu pro bezemisní dopravu. Spočívá ve výrobě tzv. zeleného vodíku pomocí elektrolyzéru ČEZ ESCO a jeho přímém zásobování pro flotilu městských autobusů dopravce Martin Uher.

ORLEN Unipetrol RPA je největším producentem šedého vodíku v ČR (přibližně 80 000 t ročně). V ČR provozuje dvě veřejné vodíkové plnicí stanice: v Praze na Barrandově (od března 2023) a v Litvínově-Záluží (od června 2023). Do konce roku 2026 měly přibýt stanice v Praze-Horních Počernicích, v Brně-Slatině a v Ostravě-Pustkovci a do roku 2030 má síť čítat přibližně 20 stanic. Využití stanic je zatím nízké: na konci roku 2024 bylo v ČR registrováno pouze 28 vodíkových vozidel.
V Litvínově provozuje společnost laboratoř pro analýzu kvality vodíku. U litvínovské rafinerie připravuje výrobu obnovitelného vodíku: fotovoltaická elektrárna o výkonu 54 MW má napájet PEM elektrolyzéry o příkonu 30 MW, které mají vyrábět přibližně 913 t vodíku ročně, s dokončením do konce roku 2028. Společnost se podílí na budování hodnotového řetězce výroby, skladování, přepravy a využití vodíku v regionu střední Evropy s cílem dekarbonizovat silniční, železniční i vodní dopravu.

USA – UNITED HYDROGEN GROUP výroba 10 t kapalného vodíku/den. Fáze provozní zkoušky – výroba alternativního paliva pro energetiku z odpadu (termální depolymerizace), vodík z procesního plynu. Fáze přípravy 100 MW projekt H2 Triangle v Severních Čechách. Výroba zeleného vodíku elektrolýzou pro dopravu. Partneři: CHEMINVEST (CZ), PLUG POWER (USA).

Moravskoslezský kraj – Vodíkové údolí Komplexní vize rozvoje vodíkových technologií. Pokrytí celého hodnotového i distribučního řetězce. Multimodální řešení se zapojením stakeholderů.

Ústecký kraj – Komplexní rozvoj vodíkového regionu = první české vodíkové údolí a současně region, pro nějž představuje vodík významnou součást transformačních procesů, první český

region s rozvíjenou sítí plnících stanic (v roce 2021 byly připravovány tři stanice), existence pipeline konkrétních projektových záměrů přispívajících k rozvoji uceleného hodnotového vodíkového řetězce. Kraj disponuje jedinečnými podmínkami pro rozvoj vodíkového hospodářství – tradice chemického průmyslu, energetiky, technické a znalostní zázemí, množství progresivně uvažujících firem, partnerství se Saskem, množství jinak obtížně využitelných lokalit brownfieldového typu pro možnou instalaci FVE a souvisejících vodíkových technologií. Požadavek na zajištění strategicko-metodického a legislativního zázemí umožňující jasné vymezení mj. zeleného vodíku a s tím spojené vyjasnění potenciálu podmínek dotační podpory pro rozvoj příslušných technologií.

Česká strojírenská firma 2 JCP z Račic u Štětí na Litoměřicku podepsala v roce 2021 kontrakt s německým koncernem Siemens Energy na dodávku tří průmyslových elektrolyzérů (Silyzer 300), tedy zařízení pro výrobu zeleného vodíku, za 100 milionů korun. Firma pak zahájila sériovou výrobu dalších elektrolyzérů. Zařízení slouží v Dánsku v závodě Kassø společnosti European Energy, prvním velkokapacitním komerčním zařízení na výrobu tzv. zeleného metanolu (provoz zahájen v roce 2025). Mimo jiné se v něm bude vyrábět palivo pro první e-metanolovou flotilu na světě, na moře ji vypustil přepravce kontejnerů Maersk. V Račicích proto postavili novou výrobní halu a v závodě v Třebíči připravili rekonstrukci hal, aby dokázali zakázky Siemens Energy pokrýt.

Zařízení dokáže produkovat až 300 kilogramů zeleného vodíku za hodinu. Siemens Energy na vývoji technologie pracoval od roku 2011, čeští strojaři se podíleli i na designu zařízení. Postup klíčového procesu chemické elektrolýzy nadále drží Siemens, který pro sériovou výrobu jader elektrolyzéru v Berlíně buduje velkou továrnu. Společnost 2 JCP patří do portfolia české investiční společnosti Jet Investment, která se již 25 let specializuje na investice do průmyslových společností. Vodíkový byznys by se měl stát těžištěm jejich dalších akvizic.

Dle Hydrogen Roadmap Europe **5)** bude v roce 2030 v EU pracovat ve vodíkovém průmyslu 1 milion zaměstnanců a do roku 2050 je očekáván nárůst na 5,4 milionu zaměstnanců. Při délce akreditačních mechanismů a délce studijního cyklu je tak nutné provádět nezbytné kroky co nejdříve. Pro výzkumné instituce je nezbytné zajištění dostatečných zdrojů financování ve formě vypisovaných výzkumných výzev zaměřených na vodíkové technologie, což opět umožní udržení odborníků, vznik znalostní báze i zavedení inovativních produktů do portfolia českých podniků. **8)**

Výzvy pro VaV českého chemického průmyslu:

- vývoj a komercionalizace alkalického elektrolyzéru a palivového článku fungujícího v jednom zařízení
- vývoj a komercionalizace PEM palivového článku (i zde může být elektrolyzér a palivový článek v jednom zařízení)
- vývoj solárních tepelných metod přípravy vodíku
- vývoj a testování účinnosti technologie vysokoteplotní elektrolýzy
- záchyt a čištění vodíku + spolupráce v oblasti membránových separací malých molekul

- konverze a reverzní konverze synplynu
- syntéza metanolu ze zeleného vodíku a směsi CO/CO_2,
- Fischer-Tropschova syntéza včetně zpracování produktů na čistá paliva a petrochemikálie
- výroba vodíku z plastových odpadů s využitím plazmatu
- produkce biovodíku parciální oxidací
- vývoj nových elektrodových materiálů a pochopení mechanismů degradace vysokoteplotních elektrolyzérů s pevnými oxidy
- analyzovat možnosti uplatnění jaderných zařízení při výrobě nízkoemisního vodíku v ČR. Do této analýzy zahrnout stávající zdroje, nové jaderné zdroje a potenciálně i malé modulární reaktory. Zejména uplatnitelnost, potenciál, ekonomické, legislativní a technické aspekty včetně konkrétních doporučení ve vztahu ke stávajícím a novým jaderným zdrojům, VaVaI v oblasti jaderné energetiky. Výsledky této analýzy následně při nejbližší aktualizaci zapracovat do Vodíkové strategie ČR a Státní energetické koncepce, resp. Národního akčního plánu rozvoje jaderné energetiky v ČR či dalších relevantních dokumentů.

Zdroje:

1) *Vodíková strategie ČR schválená vládou ČR https://mpo.gov.cz/cz/prumysl/strategicke-projekty/vodikova-strategie-cr-aktualizace-2024-schvalena-vladou--282165/*

2) *Roadmap Chemie 2050, Eine Studie von DECHEMA und Future Camp für den VCI.2019*

3) *Představení vodíkové strategie ČR dne 16. 7. 2021 na MPO ČR*

4) *Technologický foresight a implementační akční plán využití vodíkových technologií v energetice a průmyslu ČR, Česká vodíková technologická platforma, 24. 7. 2020*

5) *Hydrogen Roadmap Europe*

6) *J. Hanika, J. Lederer, V. Tukač, V. Veselý, D. Kováč: Hydrogen production via synthetic gas by biomass/oil partial oxidation, Chemical Engineering Journal 176-177 (20**11)** 286-290 (Elsevier.com)*

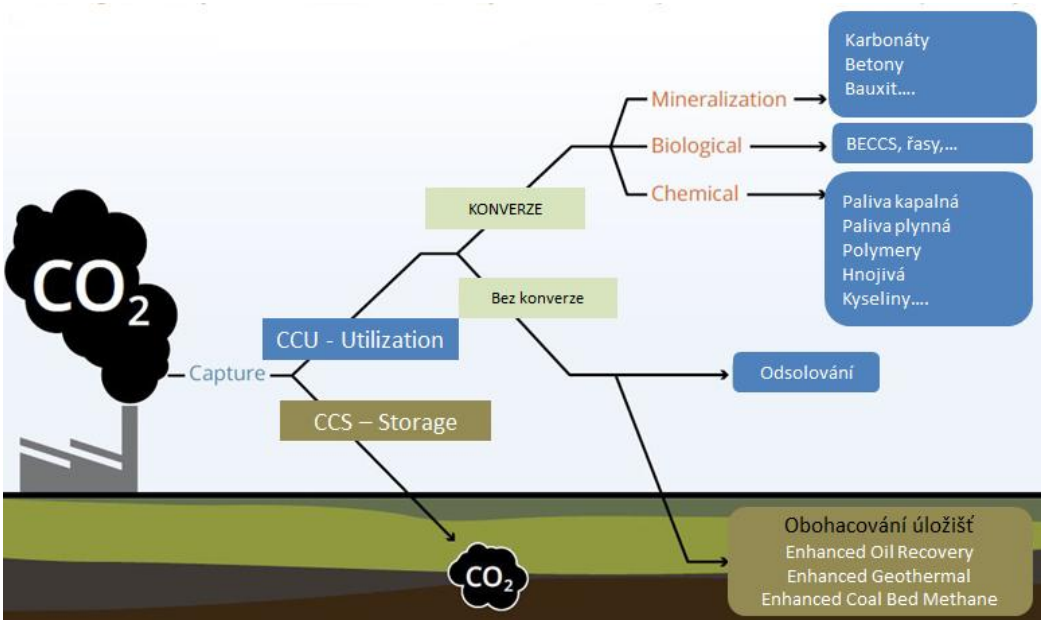
7) *X. ZHOU, a kol. "Advanced Photocatalysts: Pinning Single Atom Co-Catalysts on Titania Nanotubes", ADVANCED FUNCTIONAL MATERIALS, vol. 31, iss. 30, pp. 2102843, 2021*

8) *M. Šilhan: Vodíková strategie České republiky v kontextu chemického průmyslu, Chemické listy Vol 115 No 10 (202**1)***

7. CO_2 jako surovina

7.1 Zachycování a využití CO_2

Součástí evropského plánu Fit for 55 – dosažení uhlíkové neutrality do roku 2050 – je i střednědobý cíl k roku 2030: do konce této dekády chce EU jako celek snížit své čisté emise skleníkových plynů nejméně o 55 % oproti roku 1990. V roce 2026 byl klimatickým zákonem stanoven i mezicíl snížení o 90 % do roku 2040. K docílení takových ambiciózních cílů existuje několik cest.



Obrázek č. 6 dokumentuje možnosti využití CO2 z průmyslové výroby a procesy CCS a CCU

Zachycování a ukládání uhlíku (CCS) může představovat možnost snižování Zachycování a ukládání uhlíku (CCS) může představovat možnost snižování emisí skleníkových plynů, zejména v odvětvích s obtížně odstranitelnými procesními emisemi (cement, vápno, chemie). Podle Akčního plánu rozvoje technologií CCUS, který MŽP zpracovalo v roce 2025, se celková úložná kapacita ČR odhaduje přibližně na 1 200 Mt CO_2. Z toho 95 % připadá na slané akvifery v permokarbonských pánvích středních Čech a v karpatské oblasti a 5 % na vytěžená ložiska uhlovodíků. Odhad je však zatím velmi nepřesný. Vzhledem k omezené domácí kapacitě se počítá i s přepravou CO_2 plynovody k úložištím v Severním moři, případně v oblasti Baltu. Nařízení EU o průmyslu pro nulové čisté emise (NZIA, 2024) přitom stanoví cíl vybudovat v EU do roku 2030 úložnou kapacitu 50 Mt CO_2 ročně.

Energetická společnost Moravské naftové doly (MND) zkoumá možnosti ukládání zkapalněného CO_2 hluboko pod zem na jižní Moravě, v oblastech, kde dříve pátrala po ropě a zemním plynu. Zkapalněný CO_2 má být vtláčen do slaných akviferů, tedy do horninových souvrství v hloubce přes 800 m nasycených původní mořskou vodou z období prvohor až třetihor. MND dosud mapovala a vyhodnocovala vhodné struktury a následovat mají průzkumné vrty a vtlačné zkoušky. Společně s Českou geologickou službou, VŠB – TU Ostrava a dalšími partnery se podílela na česko-norském projektu CO2-SPICER (2020–2024). Ten připravil pilotní úložiště ve struktuře Žarošice (Žár-3) s kapacitou až 100 kt CO_2, samotné vtláčení však závisí na dostupnosti zachyceného CO_2. MND je rovněž partnerem evropského projektu COREu, který připravuje propojené trasy přepravy a ukládání CO_2 ve střední a jihovýchodní Evropě. Právní rámec upravuje zákon č. 85/2012 Sb. o ukládání oxidu uhličitého do přírodních horninových struktur.

CCS je i nadále předmětem odborné debaty. Kritici upozorňují na vysoké náklady a riziko, že prostředky vynaložené na CCS budou chybět pro rozvoj energetické a materiálové efektivnosti a obnovitelných zdrojů. Pro řadu procesních emisí, zejména v cementářství a výrobě vápna, však zatím jiné technologické řešení není k dispozici.

Vyvíjejí se také technologie přímého zachytávání CO_2 ze vzduchu (DAC). Na Islandu zahájila společnost Climeworks v roce 2021 provoz zařízení Orca s projektovanou kapacitou 4 000 t CO_2 ročně a v roce 2024 většího zařízení Mammoth s kapacitou 36 000 t ročně. Zachycený CO_2 se ukládá technologií společnosti Carbfix: CO_2 rozpuštěný ve vodě se vtláčí do čedičových hornin, kde během přibližně dvou let mineralizuje na uhličitany. Skutečné výkony obou zařízení jsou však výrazně nižší než projektované: Orca nikdy nepřekročila 1 700 t ročně a Mammoth zachytil do května 2025 jen asi 800 t CO_2. To ukazuje na velké technické a ekonomické nároky DAC.

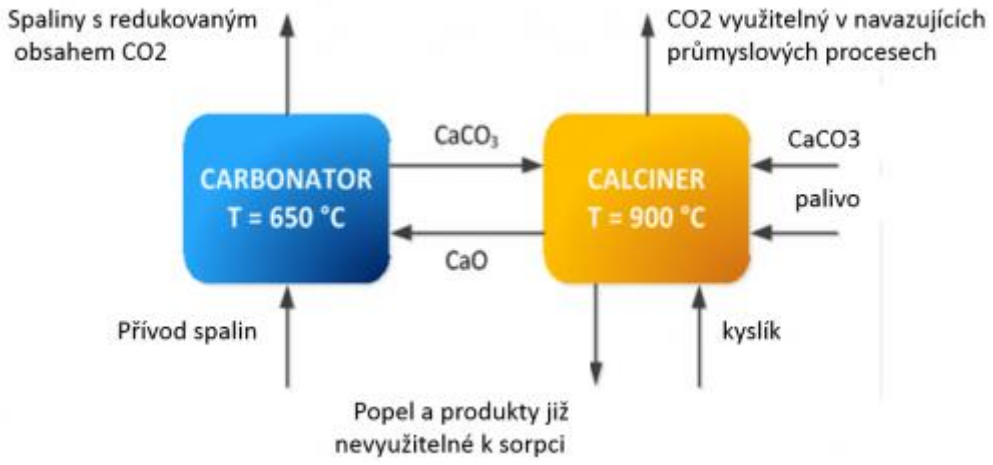
7.1.1 Zachycování CO_2 z atmosféry

Nalézt způsob, jak odstranit z ovzduší oxid uhličitý, který je jednou z příčin probíhajících klimatických změn, se snaží řada vědeckých týmů. CO_2 lze zachytit přímo ze vzduchu nebo z průmyslového zdroje pomocí různých technologií, včetně absorpčních, adsorpčních, chemických smyček, membránové separace plynů nebo technologií hydrátů plynů. Někteří odborníci ale varují, že samotné technologie pro zachycování uhlíku klimatickou krizi nevyřeší.

Jednou z mála publikovaných technologií je systém Orca, který pracuje s velkými dopravními kontejnery vybavenými high-tech filtry a ventilátory pro těžbu oxidu uhličitého. CCS použitý v moderní konvenční elektrárně by mohl snížit emise CO_2 do atmosféry přibližně o 80–90 % ve srovnání se zařízením bez CCS. U elektráren na fosilní paliva se odhaduje, že zachycování a stlačování CO_2 zvýší náklady na kilowatthodinu vyrobené energie o 21–91 %; a použití technologie na stávající zařízení by bylo ještě nákladnější, zvláště pokud stojí daleko od místa odnímání.

Další metodou je aplikace vysokoteplotní absorpce CO_2 ze spalin s využitím karbonátové smyčky. Záchyt CO_2 ze spalin na vápenatých sorbentech za vysokých teplot je moderní technologie dekarbonizace spalin, která je v současné době vyvíjena na několika špičkových výzkumných pracovištích ve světě. V ČR se touto technologií zabýval výzkumný tým projektu tvořený pracovníky Fakulty technologie ochrany prostředí VŠCHT Praha, Fakulty strojní ČVUT v Praze a ÚJV Řež, a.s. – projekt HITECARLO **1)**

Proces využití karbonátové smyčky v sobě zahrnuje dvě chemické reakce současně probíhající v propojených reaktorech s fluidním ložem. V jednom z reaktorů, absorbéru, probíhá sorpce. Zde reaguje pálené vápno (CaO) s oxidem uhličitým obsaženým ve spalinách za vzniku uhličitanu vápenatého (CaCO3). V druhém regeneračním reaktoru dochází za působení vysoké teploty (typicky 900–950 °C) k rozkladu uhličitanu vápenatého zpět na pálené vápno a oxid uhličitý, který může být použit v navazujících průmyslových procesech (např. k metanizaci v technologii Power2Gas). V současnosti je potřeba 80 kg vápna pro zachycení 1 tuny CO_2. Aktuální odhad nákladů na zachycení 1 tuny CO_2 je 20 až 27 €. Zjednodušené schéma je na obrázku č. 7.



7.1.2. Využití metod zachycování a využití CO_2 (CCU)

Zachycování, využití a ukládání CO_2 může přispět ke snižování emisí zejména v odvětvích s obtížně odstranitelnými procesními emisemi. CCS zajišťuje dlouhodobé geologické uložení CO_2, zatímco CCU využívá CO_2 jako surovinu pro výrobu paliv, chemických látek nebo materiálů. Klimatický přínos CCU závisí na původu energie a vodíku, životnosti výrobku a na tom, zda se CO_2 po použití znovu uvolní. Obě cesty proto musí být hodnoceny pomocí analýzy životního cyklu a porovnávány s přímým snižováním spotřeby energie a fosilních surovin.
CO_2 jako uhlíková surovina nahrazující fosilní zdroje doplní budoucí surovinové základny pro organické syntézy. Emise CO_2 mají potenciál být využity jako suroviny pro výrobu různých

produktů, včetně bioolejů, speciálních chemikálií, polymerů a paliv. Pokud lze využít nízkonákladovou energii z obnovitelných zdrojů, mohou produkty založené na technologii zachycování a využití uhlíku (CCU) nahradit produkty založené na fosilních palivech. Zatímco zachycování a ukládání uhlíku (CCS) primárně váže uhlík jako CO2 z průmyslových odpadních proudů a atmosféry, CCU zpožďuje nebo zabraňuje uvolňování CO_2. To zahrnuje využití CO_2 jako vedlejšího produktu chemické výroby. K aktivaci CCU je však zapotřebí velké množství obnovitelné energie za konkurenceschopnou cenu. Oxid uhličitý má termodynamicky značně stabilní molekulu. Reakce jsou většinou založeny na vzniku nových vazeb mezi uhlíkem a kyslíkem (C-O), zatímco vazby uhlík-uhlík (C-C) se tvoří značně obtížně. Z uvedeného vyplývá energetická náročnost, jejíž řešení je jedním z aktuálních výzkumných témat. Je také výhodné, máme-li k dispozici relativně koncentrovaný zdroj plynu. Příznivým faktorem je, pokud výchozí plyn obsahuje co nejméně příměsí, aby nedocházelo ke snižování účinnosti katalyzátorů vlivem katalyzátorových jedů. Při řadě reakcí vzniká zároveň voda, kterou je nutno vhodným způsobem odstraňovat. V uvedených reakcích hraje zcela klíčovou roli výběr, resp. vývoj vhodných katalyzátorů, jejichž použití je mnohdy základní podmínkou pro praktickou realizovatelnost dané reakce, umožňuje vést proces za mírnějších podmínek, snížit tak energetické nároky příslušných technologií a zvýšit celkovou efektivitu. Často se uplatňují katalyzátory na bázi kovů jako zinek, měď, ruthenium a rhodium např. při hydrogenačních reakcích. Dobrou účinnost vykazuje tzv. N-heterocyklický karben: má pětičlenný kruh se dvěma atomy dusíku a třemi atomy uhlíku s volným párem elektronů aktivujícím oxid uhličitý. Při použití silanu jako redukčního činidla se vědcům ze Singapuru podařilo připravit z oxidu uhličitého za mírných podmínek metanol. Výzkum se zaměřuje i na možnosti uplatnění fotokatalytických reakcí.

Přeměna CO_2 na uhlovodíky nebo okysličené uhlovodíky vodíkovou cestou může být v budoucnu posílena využitím vody (místo vodíku). Tato cesta je již identifikována iniciativou SUNERGY, která definuje budoucí technologicky perspektivní cesty (elektrochemické, fotoelektrochemické a biohybridní procesy) založené na vodě:

1. Štěpení vody obnovitelnými zdroji energie pro výrobu vodíku (využití kyslíku v energetice).
2. Redukce dusíku vodou s využitím obnovitelné energie pro výrobu čpavku (využití kyslíku v energetice).
3. Redukce CO_2 vodou pomocí obnovitelné energie k výrobě okysličených uhlovodíků (využití kyslíku v energetickém sektoru).
4. Podpora oběhového hospodářství s důrazem na materiálovou recyklaci.

7.1.3. Využití CO_2 k výrobě pohonných hmot

Pozornost výzkumu na sebe soustřeďují i reakce využitelné k výrobě pohonných hmot. Jednou z možností je výroba syntézního plynu vysokoteplotní katalytickou metodou tzv. suchého reformování:

$$CO2 + CH4 —>2\ CO + 2\ H2$$

Pro tuto klíčovou reakci by se dal v podstatě využít i bioplyn. Syntézní plyn jako mnohostranně použitelný meziprodukt může být dále zpracován dobře známou technologií

podle Fischera a Tropsche na tekutá motorová paliva nebo z něj lze připravit alkany a alkeny pro další chemické syntézy. Ze syntézního plynu je možno standardní technologií vyrobit metanol, který lze získat i přímo z oxidu uhličitého. Metanol je pak dále použitelný jako motorové palivo i k výrobě přísad či derivátů do pohonných hmot. Je svého druhu „energetickou konzervou“ s možností využití i v palivových článcích. Může sloužit jako výchozí látka pro řadu organických syntéz, kdy se v podstatě stává základem celého moderního odvětví organické chemie, tzv. metanolové chemie.

Zajímavou možnost přípravy metanolu z oxidu uhličitého uvádí nositel Nobelovy ceny za chemii profesor Olah, kdy reakcí s vodou při současném napojení na zdroj elektrického proudu probíhá příslušný proces v palivovém článku:

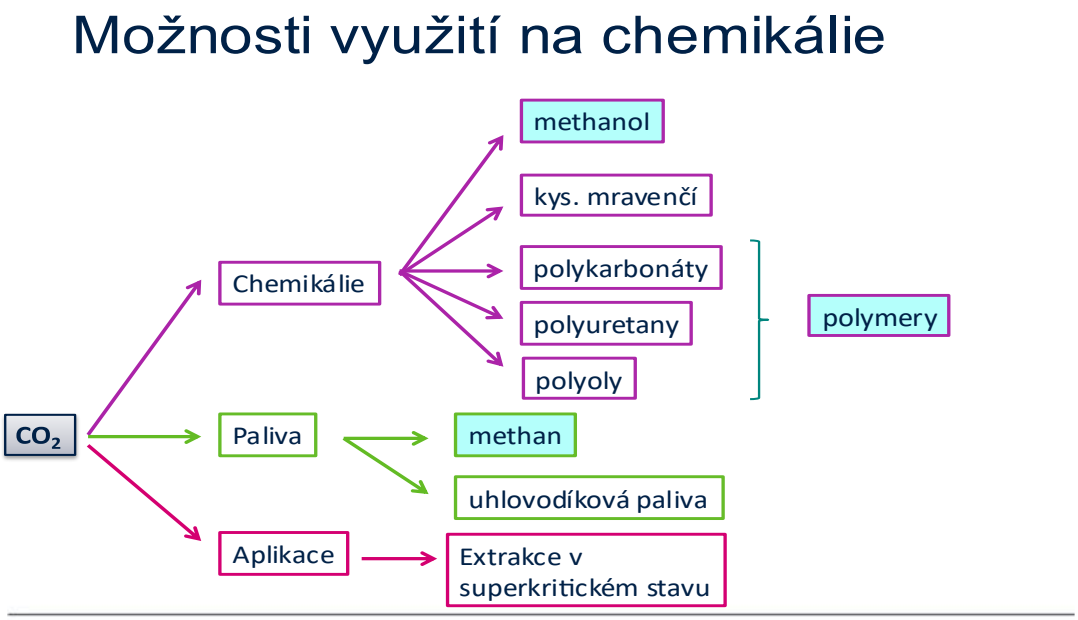
$$2\ CO_2 + 4\ H_2O + e^- \text{—>} 2\ CH_3OH + 3\ O_2$$

Tento postup by mohl být v budoucnu zajímavý např. pro provozovatele bioplynových stanic dodávajících do rozvodné plynárenské sítě biometan. Pro odseparovaný oxid uhličitý by se tak našlo vhodné uplatnění právě při převodu na žádaný metanol.

Německá cestovní mapa 2) rozebírá možnost využití CO_2 pro výrobu syntetické nafty.
Až dosud se nafta získává ze surové ropy. Alternativní metodou pro výrobu nafty je Fischer-Tropschova syntéza. Zde se syntézní plyn přeměňuje na alifatické uhlovodíky s dlouhým řetězcem. Syntézní plyn lze vyrobit z vodíku, např. získaného elektrolýzou vody, nebo může být generován reakcí s CO_2: Syntézní plyn lze také získat z různých zdrojů obsahujících uhlík. Biomasu a uhlíkatý odpad lze zplynovat a přebytečný methan produkovaný elektricky vyhřívanou krakovací jednotkou lze přeměnit na syntézní plyn parním reformováním. Zdaleka největší energetickou náročnost Fischer-Tropschovy syntézy představuje elektrolýza k vytvoření požadovaného vodíku. Celková spotřeba elektrické energie je 126 GJ/t nafty. Při použití biomasy (např. dřeva) k výrobě nafty pomocí Fischer-Tropschovy syntézy není potřeba elektřiny pro elektrolýzu. Musí se jednat o biomasu, která pochází z udržitelných zdrojů pro snížení CO_2. Vzhledem k vysokému obsahu vody v biomase a velkému množství heteroatomů v uhlíkové struktuře je potřeba 5,7 t dřeva na tunu nafty.
Potřebná investice na instalaci kapacity elektrolýzy je zpočátku 5 870 EUR/t-rok naftu a do roku 2050 se sníží v důsledku snížení nákladů na technologii elektrolýzy na 1 470 EUR/pa naftu. Předpokládá se, že náklady na instalaci Fischer-Tropschovy syntézy budou konstantní ve výši 300 EUR/rok nafty a na zplyňování pevných látek (biomasa, plasty) ve výši 300 EUR/rok nafty.

- technická možnost využití CO_2 jako uhlíkové suroviny pro náhradu fosilních surovin **3)**

Jednoduchá molekula oxidu uhličitého může sloužit jako základ pro výrobu umělých hmot, chemických produktů a poloproduktů použitelných v dalších syntézách i pohonných hmot. Hlavní problém přitom představují náročné podmínky prováděných reakcí probíhajících za vysokých teplot, tlaků a s drahými katalyzátory. Jedná se zejména o tyto výrobky: čpavek, močovina, metan, metanol, zelený etylen, plasty, akryláty, aromatické sloučeniny.
Schéma možností využití CO_2 pro výrobu chemikálií ukazuje obr. č. 8.



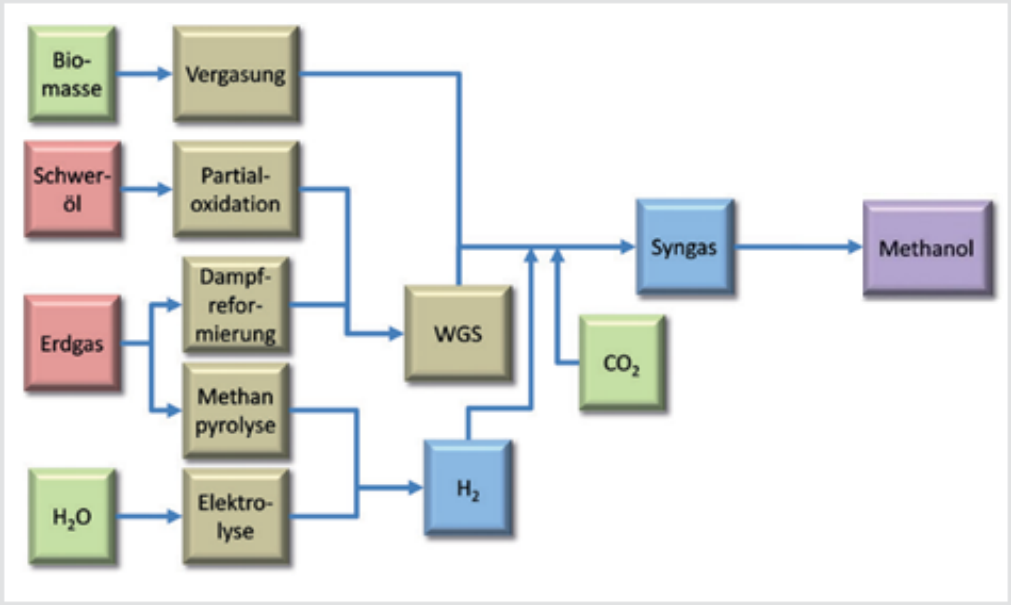
7.2. Další možnosti využití CO2 jako chemické suroviny

7.2.1 Výroba metanolu

Z celosvětového hlediska je metanol jedním z nejobjemnějších petrochemických produktů, který se zpracovává v petrochemických závodech až do 10 000 tun/den. V Evropě se methanol vyrábí téměř výhradně ze zemního plynu, ale v Německu je pouze 40 % produkce ze zemního plynu a 60 % se vyrábí v závodě Leuna z těžké ropy, což je rafinérský zbytek z kolony Visbreaker.

U obou surovin proces začíná generováním syntézního plynu parním reformováním nebo částečnou oxidací v případě těžkého oleje a následnou konverzí vodního plynu (water-gas shift), přičemž poměr vodíku k CO se upraví na 2:1. Syntézní plyn také obsahuje několik procent CO_2. Katalytická reakce probíhá v metanolovém reaktoru, a je exotermická, to znamená, že vzniká pára, která se mimo jiné používá ke zpracování produktu. Surový metanol obsahuje vodu a malá množství vedlejších produktů a čistí se destilací.

Různé cesty mohou být považovány za alternativní výrobní procesy, které jsou znázorněny společně s konvenčními procesy na obrázku č. 9. Water gas shift (WGS) je konverzní reakce vodního plynu.



Zavedené metanolové katalyzátory jsou také vhodné pro přeměnu syntézních plynů bohatých na CO_2, na směsi čistého CO_2 a vodíku. Syntézou metanolu z CO_2 a vodíku z obnovitelných zdrojů energie se zabývají různé pilotní a demonstrační projekty. Společnost Carbon Recycling International na Islandu (závod George Olah Plant) provozuje demonstrační závod s kapacitou 5 kt/rok. Na základě výsledků byla tato technologie licencována v Číně (např. závod Shunli v Anyangu zpracuje cca 160 000 t CO_2/rok). Pokud je vodík poskytován elektrolýzou vody, elektrolyzér nahrazuje reformátor. Protože se nepoužívá žádná jiná surovina obsahující uhlík, je požadované množství dodávaného CO_2 stechiometricky 1,37 t CO_2/t methanolu.
Využití CO_2 z biomasy nebo průmyslových zdrojů se počítá jako kredit (negativní emise), protože se zamezí používání nového fosilního uhlíku. Výroba páry cca 2 GJ/t methanolu.

Celková energetická náročnost procesu je 11 MWh/t metanolu neboli 39,6 GJ/t a dominuje mu elektrolýza vody, která tvoří více než 85 procent energetické potřeby. Výrobní náklady by se měly snížit z 1 045 euro/t v roce 2020 na 662 euro/t metanolu v roce 2050. Nákladová parita s konvenčními procesy bude dosažena v roce 2044. **2)** Zbývající emise souvisí s elektřinou v závislosti na elektrickém mixu. Konkrétní investiční náklady jsou zpočátku 1700 €/t, z nichž cca 80 procent lze přidělit elektrolýze. Investiční náklady jsou v současnosti čtyřnásobně vyšší proti konvenčním systémům. Parity nákladů oproti novým nebo odepisovaným zařízením bude dosaženo až po roce 2040.

7.2.2 Metanol po pyrolýze metanu

Pokud je vodík získáván z pyrolýzy metanu, nahrazuje reformátor při konvenční syntéze metanolu. I zde může být požadovaný uhlík poskytnut jako CO_2 a měl by být přiváděn externě z průmyslových zdrojů. Alternativně by bylo myslitelné poskytování tepla pro pyrolýzu metanu částečným spalováním zemního plynu, ale to je kontraproduktivní z hlediska požadované neutrality skleníkových plynů a vyhýbání se fosilním surovinám. Jinak platí stejné okrajové podmínky jako pro proces založený na elektrolýze.

Celková energetická potřeba procesního řetězce pyrolýzy metanu a syntézy metanolu je 51,4 GJ, z čehož 37,6 GJ lze připsat energetickému obsahu suroviny (metanu). Surovinové složky emisí CO_2 jsou výsledkem ztrát metanu při jeho pyrolýze. Ztráta metanu snižuje kredit CO_2 začleněním recyklovaného CO_2 do metanolu (1,37 t/t metanolu) o 0,049 t CO_2/t metanolu. To také zůstává jako specifické zbytkové emise. Pokud emise související s elektřinou klesnou v roce 2050 na nulu, budou emise z tohoto procesního řetězce již nižší než emise z konvenčního procesu. Jako vedlejší produkt vzniká cca 0,62 t uhlíku na t metanolu. Specifické investiční náklady jsou o 65 procent vyšší než u konvenčních nových zařízení, výrobní náklady jsou 1,3 krát vyšší než u konvenčního procesu, zejména kvůli vysoké poptávce po zemním plynu pro pyrolýzu metanu. V roce 2043 by bylo možno dosáhnout nákladové parity. TRL 5-6.

7.2.3 Metanol z biomasy

Výroba metanolu z biomasy probíhá prostřednictvím výroby syntézního plynu zplyňováním biomasy. Následuje konvenční syntéza metanolu. Z důvodů udržitelnosti lze jako biomasu využít organický odpad a zemědělské a lesní zbytky. Výtěžnost metanolu je asi 1,5 až 2krát vyšší u surovin na bázi lignocelulózy, jako je dřevo, než u surovin obsahujících cukr nebo škrob. Biomasa použitá jako surovina musí být nejprve předupravena, tzn. drcena, sušena na maximální obsah vody 15 % a zbavena cizích látek. Pro zplyňování lze použít zplyňovače s pevným ložem, zplyňovače s fluidním ložem nebo zplyňovače s unášeným proudem, které lze provozovat jak alotermicky (externím přívodem tepla), tak autotermicky (částečným spalováním použité suroviny). Omezený přísun kyslíku podporuje tvorbu syntézního plynu a snižuje obsah CO2 a vody. Po zplyňování musí obvykle následovat čištění plynu, zejména se musí oddělit dehet, prach a anorganické zbytky. Z vytvořeného syntézního plynu pak probíhá konvenční syntéza metanolu. Technologie je v zásadě dostupná. Průkopníkem zplyňování biomasy v Německu byla společnost CHOREN Industries. Ve Freibergu (Sasko) vyvinula technologii Carbo-V, která kombinuje nízkoteplotní zplyňování s následným zplyňováním v unášeném proudu, a postavila zde první velké demonstrační zařízení na výrobu syntetických paliv z dřevní biomasy (tzv. Beta plant). V roce 2011 však společnost zbankrotovala a technologii v roce 2012 převzala společnost Linde. Zplyňování v unášeném proudu se na výrobu metanolu využívalo také v areálu bývalého plynárenského kombinátu Schwarze Pumpe u Sprembergu. Závod SVZ Schwarze Pumpe zde vyráběl metanol ze syntézního plynu získaného zplyňováním komunálních a průmyslových odpadů spolu s uhlím až do insolvence v roce 2007.
Komerční závod na výrobu metanolu z lesní biomasy o kapacitě 300 tun za den s technologií ThyssenKrupp Industrial Solutions (tehdy Uhde) připravuje od počátku 21. století švédská společnost Värmlandsmetanol AB v Hagforsu. Kvůli nedostatku financování a sporům o povolení však dosud nebyl postaven.

V závislosti na biomase je účinnost zplyňování biomasy 50-60 %, u dřevní biomasy je to 60 %. Z toho vyplývá potřeba biomasy 2,56 t/t metanolu, u škrobovitých surovin jako je cukrová řepa s obsahem vody >75 % se požadavek zvyšuje na více než 8 t/t metanolu. Proces již má

nižší emise než fosilní proces, a to kvůli relativně vysoké potřebě biomasy. Výroba metanolu z biomasy ale není příliš efektivní z hlediska zdrojů. Ze stejného důvodu tvoří podíl surovin na výrobních nákladech 30 %. Předpokládané náklady na suchou biomasu ve výši 160 EUR/t se od roku 2040 sníží díky rostoucím nákladům na emise CO_2.

7.2.4 Přeměna oxidu uhličitého na palivo pomocí sluneční energie

K přeměně na oxid uhelnatý jsou zapotřebí dva elektrony. Fotony s modrým světlem vytvářejí dlouho žijící elektrony s vysokou energetickou hladinou, a tak organický materiál zvaný COF lze nabít elektrony a reakci dokončit. Porézní organický materiál COF (kovalentní organická síť) je známý tím, že velmi účinně absorbuje sluneční světlo. Přidáním katalytického komplexu do COF se podařilo přeměnit oxid uhličitý na oxid uhelnatý bez jakékoli další energie. Tento průlomový objev by mohl být důležitým dílem skládačky při snižování množství skleníkových plynů v atmosféře v budoucnosti.

- Palivo pro letadla 4)

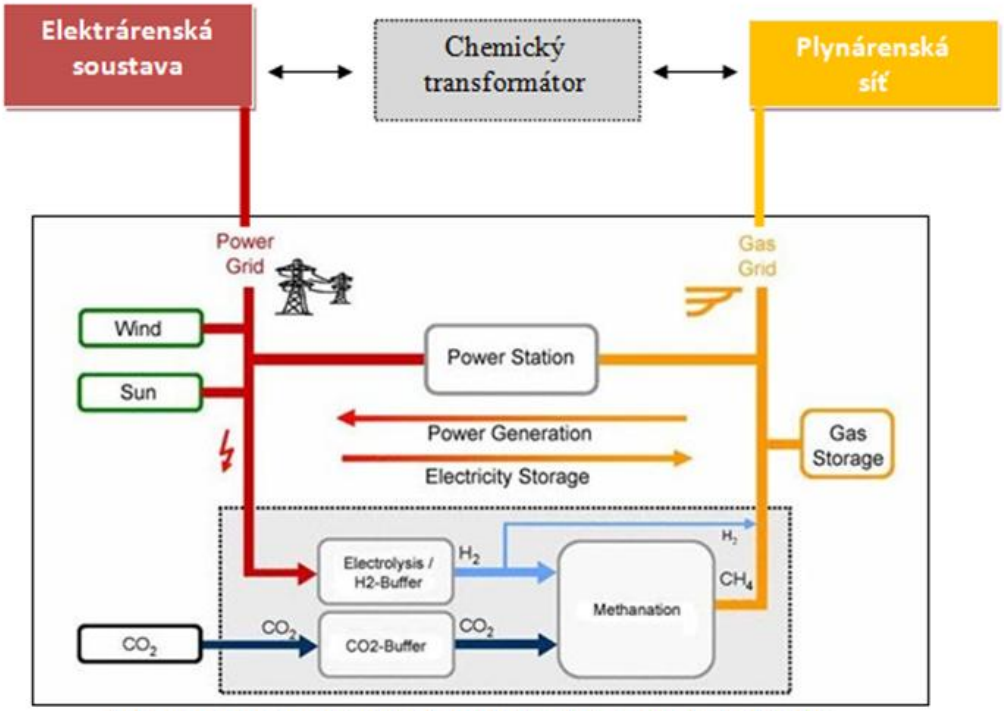
Nový katalyzátor na bázi železa, manganu a draslíku přeměňuje oxid uhličitý na palivo pro letadla
Objev vědců z Oxfordské univerzity lze zjednodušeně označit jako „obrácení procesu spalování“**.** Oxid uhličitý je v katalyzátoru na bázi železa chemickou reakcí transformován na palivo. Proces byl zatím otestován jen v laboratorních podmínkách a v malém měřítku. Směs kyseliny citronové, vodíku a katalyzátoru vyrobeného ze železa, manganu a draslíku se zahřeje na teplotu 350 °C. Když se do směsi přidá oxid uhličitý, vznikne jako produkt kapalné palivo, které lze využít k pohonu proudového motoru. Odborníci jsou však přesvědčeni o tom, že bude fungovat i v reálných podmínkách a stane se zásadním obratem v budoucnosti komerčního létání.
Solární věž pro výrobu kapalných paliv, kterou vyvinula ETH Zürich a provozuje ve španělském Móstoles (IMDEA Energy), tvoří 169 zrcadlových panelů, takzvaných heliostatů, které se otáčejí samy ke slunci a záření odráží a koncentrují do solárního reaktoru na špičce samotné věže. Utváří tak energetický tok v objemu až 3000 kW na metr čtvereční při cílové teplotě 1450 stupňů Celsia, který směřuje do otvoru o průměru 16 centimetrů.
Samotný reaktor má výkon 50 kW a klíčové je, že jeho vnitřní plášť je pokrytý vysoce porézní houbovitou keramickou vrstvou oxidu ceričitého. Ta pak jako katalyzátor spouští důležité oxidačně-redukční reakce vody a CO2, které jsou do reaktoru rovněž vstřikovány, a termochemicky je rozkládá na syntézní plyn neboli směs vodíku a oxidu uhelnatého. Ta následně putuje do kondenzační jednotky a v dalších procesech se z ní při vysoké teplotě a tlaku vyrábí petrolej a nafta. A vše přitom stále pohání solární energie.

Další novinkou je průlomový fotosyntetický solární článek vyrábějící palivo z oxidu uhličitého a slunečního záření. **5)**

Vědci z Illinoiské univerzity v Chicagu se zaměřili na dichalkogenidy přechodných kovů (TMDC), které spojili s nekonvenční iontovou kapalinou jako elektrolytem a vytvořili tím pozoruhodný elektrochemický článek. Vyzkoušeli několik katalyzátorů a jako nejlepší se ukázaly nanovločky diselenidu wolframu. Je to velmi dobrý katalyzátor redukce oxidu uhličitého. Funguje tisíckrát rychleji než katalyzátory z drahých kovů, a zároveň je dvacetkrát levnější. Solární farma vybavená fotosyntetickými články by podle tiskové zprávy Illinoiské univerzity mohla konvertovat nemalé množství oxidu uhličitého z atmosféry a vyrobit z něj palivo. Prozatím jde o laboratorní testy, u kterých ještě neproběhla komercionalizace.

7.2.5 Využití CO_2 pro akumulaci energie z obnovitelných zdrojů

Technickou podstatou tohoto řešení je redukce oxidu uhličitého na methan Sabatierovou reakcí. Vodík se vyrobí elektrolýzou vody, při níž se uplatní přebytečná elektrická energie z větrných, příp. fotovoltaických elektráren. Metan lze následně využít různými způsoby – např. k výrobě elektřiny a tepla cestou kogenerace, jako pohonná hmota v automobilní dopravě, a hlavně se počítá s jeho dodávkami do plynárenské sítě. Možné propojení elektrárenské a plynárenské sítě s využitím chemické transformace CO2 a vodíku ukazuje obr. č. 10.



Schema prinpipu propojení elektrárenské a plynárenské sítě

Zdrojem oxidu uhličitého pro uskutečnění metanizačního kroku této technologie by kromě fosilních zdrojů mohly být např. i různé průmyslové kvasné procesy. Zvlášť zajímavé by mohlo být uplatnění technologie „Power-to-Gas“ u velkých bioplynových stanic.

Lze odhadnout, že zatímco z celkového množství emisí oxidu uhličitého produkovaných člověkem bude možno zpracovat na chemické výrobky maximálně jedno procento, v případě výroby pohonných hmot by se tato produkce mohla výhledově přiblížit až k deseti procentům. Z pohledu chemického průmyslu se jedná o značná množství, takže se zde otevírá významný prostor pro výzkum. Zásadní význam mají zejména výzkumné aktivity v oblasti katalýzy, kde se nabízí i možnost mezinárodní spolupráce. S ohledem na uvedené trendy by bylo vhodné, aby i v ČR byla věnována větší pozornost podpoře výzkumu a vývoje v dané oblasti při respektování očekávaných budoucích změn v surovinové základně.

Náměty pro výzkum v ČR:

CM SUSCHEM CZ **6)** doporučila pro tuzemský výzkum intenzivněji se věnovat těmto tématům:

- Vývoj separačních technologií na zdrojích CO_2,
- výroba zeleného metanu metanizací CO_2
- výroba etanolu s využitím CO_2 (homologací metanolu)

Dále doporučujeme následující výzkumná témata:

- Výzkum metanolové katalýzy
- Rozvoj technologie „Power-to-Gas“ u velkých bioplynových stanic

- Vývoj fotosyntetických solárních článků k přímé přeměně CO_2 na paliva

Prof. Pašek v roce 2022 uvedl na konferenci ICCT v Mikulově, že považuje využití CO_2 jako chemické suroviny za užitečné především pro výrobu močoviny jako základní suroviny např. pro hnojiva. Vedle výzkumu v rámci ČR budou posuzovány možnosti využití potenciálu komerčně nabízených technologií. Problematiku vývoje v oblasti využití CO_2 odborně sleduje CO_2 Czech Solution Group.

Zdroje:

1) *Staf M., Ciahotný K., Krtková E.: Perspektivy aplikace karbonátové smyčky v průmyslu a energetice České republiky, PALIVA 8 (201**6)**, 1, S.: 7–15*

2)*Německá CM: Roadmap Chemie 2050, Eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI.2019*

3) *Gál L.: Problematika CO2 , Konference Cirkulární ekonomika a recyklace plastů, Kralupy 9. 12. 2021*

4) *Marek J.: Vědci umí vyrobit letecké palivo a naftu ze slunce, CO2 a vody, https://www.seznamzpravy.cz/clanek/tech-technolog (3. 8. 2022)*

5) *https://www.osel.cz/8950-prulomovy-solarni-clanek (2. 8. 2016)*

6) *CM SUSCHEM CZ 2020*

8. Strategie udržitelnosti chemických látek

Hlavní cíle Strategie udržitelnosti chemických látek:

- Eliminace nebo snížení používání nebezpečných chemických látek, zejména látek vzbuzujících mimořádné obavy (SVHC), ve finálních produktech a jejich náhrada s cílem dosáhnout netoxického prostředí.
- Ve Strategii jsou uvedeny požadavky na nové nízkouhlíkové výrobní postupy a technologie v chemickém průmyslu s malým dopadem na životní prostředí, které umožní jeho přechod k neutralitě z hlediska klimatu a plnění cíle nulového znečištění.
- Rozvoj inovativních technologií k řešení tzv. starých (legacy) látek především v odpadových tocích.

Strategie navrhuje mnoho opatření a časový harmonogram transformace průmyslu s cílem přilákat investice do bezpečných a udržitelných výrobků a výrobních metod z hlediska klimatu a plnění cíle nulového znečištění. Musí být upřednostněna energetická účinnost a rozhodující úlohu z hlediska udržitelnosti zdrojů by mohla hrát paliva, jako obnovitelný vodík a udržitelně vyráběný biometan. Digitální technologie mohou rovněž hrát významnou úlohu v procesech ekologizace výroby.
Strategie uvádí taky požadavky na nové chemické látky a materiály, které musí být ze své podstaty bezpečné a udržitelné po celou dobu svého životního cyklu. Tyto látky a materiály budou využity např. v energetice, stavebnictví, mobilitě, zdravotnictví, zemědělství, elektronice, farmacii a v dalších odvětvích. Může být obtížné znát dlouhodobé karcinogenní, reprotoxické, alergenní nebo neurotoxické účinky substituce. Uvažuje se také o ceně a praktičnosti náhrady, protože úspěšná náhrada může vyžadovat technické a organizační změny. Výsledek náhrady nemusí být zcela neškodný materiál nebo postup, měl by však snížit rizika původní výroby. Nahrazování nebezpečných chemikálií se řídí zásadami zelené chemie a vede k „čisté“ technologii.
Proces aktualizace legislativy je náročný a stále probíhá. Revize nařízení CLP (nařízení (EU) 2024/2865) je účinná od prosince 2024, část požadavků na označování však byla nařízením (EU) 2025/2439 („stop-the-clock“) odložena do roku 2028. Komise v roce 2026 upustila od plánované komplexní revize nařízení REACH a nahrazuje ji dílčími zjednodušujícími změnami; univerzální omezení PFAS je stále v hodnocení ECHA (stanoviska výborů RAC a SEAC se očekávají do konce roku 2026).
Součástí strategie bez toxických látek je prosazování bezpečných a čistých recyklačních řešení, vč. chemické recyklace, technologií nakládání s odpady a dekontaminačních řešení. Nařízením v přenesené pravomoci (EU) 2023/707 byly do CLP zavedeny nové třídy nebezpečnosti: endokrinní disruptory pro lidské zdraví a životní prostředí (ED HH, ED ENV), látky PBT/vPvB a PMT/vPvM. Pro nové látky platí od 1. 5. 2025, pro látky již uvedené na trh od 1. 11. 2026; pro směsi od 1. 5. 2026, resp. od 1. 5. 2028. Revize CLP zásadně ovlivní nejen chemický průmysl, ale i řadu
navazujících oborů. Tyto revize zásadně ovlivní:

• polymerní přípravky a sloučeniny, výrobky z papíru a lepenky, inkousty a tonery, které mohou být použity pro materiály určené pro styk s potravinami
• barvy a nátěry
• prací a čisticí prostředky
• lepidla a tmely
• kosmetika a výrobky osobní péče
• maziva a plastická maziva
• biocidní přípravky a přípravky na ochranu rostlin **2)**

V kontextu rámce SSbD pro chemikálie a materiály může být termín „by design“ interpretovat na dvou úrovních:

- Molekulární design: jedná se o návrh nových chemikálií nebo materiálů s molekulárním modelováním, založené na popisu atomistické úrovně molekulárního systému. Tento typ designu efektivně dodává nové chemikálie nebo materiály, u kterých jsou vlastnosti vyladěny tak, aby byly bezpečné a udržitelné.
- Návrh procesu: jedná se o návrh nových nebo vylepšených procesů výroby chemikálií a materiálů. Pokud vyrobená chemikálie (látka nebo směs) neobsahuje méně nebezpečných látek, návrh procesu nemění vnitřní vlastnosti (např. nebezpečné vlastnosti) chemikálie nebo materiálu. Může však učinit výrobu látky udržitelnější (např. efektivnější z hlediska spotřeby energie nebo zdrojů, méně závislou na potřebě jiných nebezpečných látek v průběhu přípravy).

Rámec SSbD bude pokrývat obě fáze, Komise vydala doporučení (EU) 2022/2510 k rámci SSbD a v roce 2025 zveřejnilo JRC jeho revidovanou verzi.
Dal by se použít k určení, kterým směrem by se měl molekulární design ubírat, ale má být také užitečný pro inženýry a vědce ke zlepšování nebo vývoji nových výrobních postupů pro chemikálie a materiály. Rámec SSbD bude také užitečný pro produktové designéry, když potřebují vybrat chemikálie a materiály splňující funkční požadavky produktu, který vyvíjejí. **2)**

8.1. Nahrazení nebezpečných chemických látek

Substituce těchto látek může být na různých úrovních, jako je použití méně nebezpečné chemikálie ve stejném procesu, např. pro stavební barvy: od organických rozpouštědel po barvy na vodní bázi. V polygrafickém průmyslu pro čištění ofsetových tiskových strojů od organických rozpouštědel po výrobky na bázi esterů rostlinných olejů. Nový design procesu, např. při odmašťování kovů: od odmašťování v parách trichlorethylenu až po vysokotlaké čištění horkým alkalickým roztokem v uzavřeném systému. Při pájení natvrdo: od tavidel obsahujících sloučeniny boru a fluoru po použití pece s redukční atmosférou, nový proces, např. odstranění starého nátěru: ze směsi dichlormethanu a methanolu k otryskání ocelovým pískem v uzavřeném systému. Od lepení lepidly až po nový design předmětů, které je mechanicky spojují, vzájemně, vyhnout se použití procesu, např. vyhýbání se galvanickému pokovování niklem používaným pouze z kosmetických důvodů. Dřevěný nábytek: od laku s organickými rozpouštědly až po žádnou povrchovou úpravu, který se

používá zejména pro kvalitní nábytek. Vyhnout se výrobě produktů zahrnujících nebezpečné procesy.

Některé látky ještě nelze technicky nahradit – nebo neexistují žádné alternativy, které by byly celkově méně nebezpečné. V případě činností, jako je recyklace, údržba a servis nebo zpracování výrobků, z nichž jsou nebezpečné látky uvolňovány, mají společnosti zpočátku malý vliv na náhradu. Podle analýzy CEFIC **3)** změny nařízení CLP a rozšíření GRA (generic risk assessment approach) navržené v rámci CSS s největší pravděpodobností ovlivní 28 % celkového průmyslového portfolia. Přibližně jedna třetina z těchto 28 % může být potenciálně nahrazena nebo přeformulována. Obchodní očekávání jsou ovlivněna nejen tím, co by mohlo být technicky a ekonomicky proveditelné, ale také tím, jak mohou jejich zákazníci reagovat na náhražky nebo přeformulované produkty. Změny CLP a GRA by při zohlednění potenciálních obchodních reakcí mohly vést ke snížení produktového portfolia a podnikání (z hlediska obratu) přibližně o 12 %, tj. o ekvivalent 70 miliard EUR z trhu v roce 2019.
Dopad na následné uživatele vyžaduje další průzkum. Analýza ukázala, že 74 % výrobků, na něž má mít dopad přidání nebezpečí do CLP a rozšíření GRA, jsou profesionální nebo spotřebitelské výrobky. Rovněž se odhaduje, že provozní a kapitálové výdaje i výdaje na výzkum a vývoj porostou. Například „poměr CAPEX k obratu“ se v období 2023–2040 pravděpodobně zvýší oproti základní linii v průměru o 2–5 %, což je způsobeno především dodatečnými investičními požadavky na substituci nebo přeformulování. Podobně se odhaduje, že „poměr OPEX k obratu“ se za stejné období zvýší oproti základní linii v průměru o 1,5 % až 3 % v důsledku zvýšených regulačních požadavků a případně vyšších provozních výdajů.

I když substituce není možná, lidé a životní prostředí musí být chráněni. Pokud jde o ochranu spotřebitelů a životního prostředí, hlavní důraz je kladen na nahrazení prostřednictvím zákazů nebo omezení. EU zavedla nové mezní hodnoty pro některé škodlivé chemické látky. Konkrétně se jedná o takzvané perzistentní organické látky (POP), které vykazují škodlivé účinky na člověka a zvířata, mají obzvláště dlouhou životnost, hromadí se v organismech, a tím i v potravním řetězci. Podle Evropské komise se perzistentní organické látky v nových výrobcích již nepoužívají. Stále je však lze nalézt v odpadech z některých výrobků, jako jsou textilie, nábytek, plasty či elektronická zařízení.

Nové limity byly stanoveny například pro koncentraci kyseliny perfluoroktanové (PFOA), jejíž soli a příbuzné sloučeniny se nacházejí například ve voděodolných textiliích či hasicí pěně. Podobné je to i s použitím dalších PFAS, především v obalech určených pro styk s potravinami (nařízení o obalech a obalových odpadech (EU) 2025/40 – PPWR – zakazuje od 12. 8. 2026 uvádět na trh takové obaly s obsahem PFAS nad stanovené limity) a v hasicích pěnách (nařízení Komise (EU) 2025/1988, položka 82 přílohy XVII REACH, s přechodnými obdobími do roku 2030). Pokud jde o bezpečnost a ochranu zdraví při práci, mají však zvláštní význam další doporučení týkající se "osvědčených postupů".

Směrnice RoHS (2011/65/EU) omezuje používání některých velmi nebezpečných chemických látek v elektrických a elektronických zařízeních, která každodenně používáme v domácnostech. V nových spotřebičích je zakázáno užívat olovo, rtuť a kadmium, žárovky a

svítidla určené pro domácnosti už nesmí obsahovat rtuť, kadmium, šestimocný chrom, polybromované bifenyly (PBB) a polybromované difenyletery (PBDE). Náhrada nebezpečných chemikálií v elektronice může být dobrým příkladem i pro další vývoj chemické politiky EU. Největší spor se vedl o regulaci bromovaných zpomalovačů hoření a jejich použití ve speciálních aplikacích.

V Cestovní mapě CEFIC **4)** je uvedeno:
„V roce 2018 nebezpečné chemikálie stále představovaly 74 % celkové chemické výroby v Evropě“. Stále více látek je klasifikováno jako nebezpečné podle nařízení CLP a tyto objemy pokrývají velká množství základních chemikálií, které jsou ze své podstaty nebezpečné, ale neuvolňují se. Jako takové je toto číslo používané izolovaně k ilustraci toho, že „chemické znečištění přímo škodí“, zavádějící.“
Například látkami odpovědnými za tvorbu pěny jsou povrchově aktivní látky, pocházející především z fosilních surovin (petrochemie), v některých případech živočišných tuků nebo rostlinných olejů. Použití dalšího produktu a vody k vytvoření většího množství pěny vede ke zvýšenému využívání zdrojů, a pokud látky nejsou biologicky odbouratelné, hromadí se v životním prostředí.
Evonik, německá společnost zabývající se speciálními chemikáliemi se sídlem v Essenu, vyrobila nový druh povrchově aktivních látek na bázi rhamnolipidů. Mají stejnou účinnost (pokud jde o čištění) jako ostatní povrchově aktivní látky, ale jsou šetrnější k pokožce, protože jejich pH je nižší než u mýdla a jsou 100 % biologicky odbouratelné. Proto nepředstavují takový problém při čištění odpadních vod a jsou pro vodní organismy snesitelnější. Inovace spočívá ve skutečnosti, že rhamnolipidy jsou přirozeně produkovány bakterií živenou cukrem, který je hojný a neovlivňuje citlivé ekosystémy. Druh mikroorganismu zahrnutý v této aplikaci se již používá v jiných uznávaných průmyslových aplikacích a nepředstavuje hrozbu pro lidské zdraví. Komerční produkce je realizována na průmyslové úrovni v zařízení ve Slovenské Ľupči.
Domácí mýdlo a detergent je největší aplikací povrchově aktivních látek z hlediska objemu. Světová produkce povrchově aktivních látek se pohybuje kolem 15 milionů t/rok. Z toho na mýdla připadá více než 8 milionů t/rok. Partnerství společnosti Evonik se společností Unilever – jedním z největších výrobců mýdel a detergentů na světě – má potenciál nahradit významnou část povrchově aktivních látek na fosilní bázi používaných v mýdlech a detergentech těmi na biologické bázi.

Studie o toxicitě lithia potvrzují negativní dopady lithiových solí na lidskou reprodukci. Výbor pro hodnocení rizik (RAC) Evropské agentury pro chemické látky (ECHA) proto v březnu 2024 znovu potvrdil své doporučení z roku 2021 klasifikovat uhličitan, chlorid a hydroxid lithný jako látky toxické pro reprodukci kategorie 1A (Repr. 1A), včetně účinků na kojené děti nebo prostřednictvím mateřského mléka (Lact.).
Evropská komise zařadila tuto klasifikaci do návrhu 24. adaptace nařízení CLP na technický pokrok (ATP). Návrh oznámila Světové obchodní organizaci a připomínky k němu bylo možné podávat do 26. 1. 2026. Po vyhlášení v Úředním věstníku EU se bude klasifikace uplatňovat po 18měsíčním přechodné období.
Těžaři lithia a výrobci baterií upozorňují, že klasifikace zvýší náklady a administrativní nároky na výrobu, zpracování a recyklaci lithia v EU a může oslabit budování evropského

bateriového řetězce, na který EU v rámci zelené transformace sází. Klasifikace se přitom netýká samotných hotových baterií a článků, ale látek a směsí. 5)

8.1.1 Příklady substitucí nebezpečných chem. látek z ČR:

Spolchemie provádí aplikovaný výzkum zaměřený na náhradu bisfenolů popř. halogenových retardérů hoření v epoxidových pryskyřicích.
Orlen Unipetrol v Polymer institutu Brno vyrábí pod obchodní značkou MAKROFLAM koncentráty retardérů hoření a kompozitní materiály se sníženou hořlavostí na bázi polypropylenu, polyethylenu, ABS, HIPS. Snížená hořlavost je dosažena halogenobsahujícími polymery nebo bezhalogenovými retardéry hoření podle norem předepsaných pro konkrétní aplikace se snahou o dosažení nejvyšších hodnot samozhášivosti. Pro aplikace v elektrotechnice jsou k dispozici materiály splňující žhavou smyčku 960°C (ČSN EN 60695-2-**12)** a klasifikaci V-0 podle UL94 (ČSN EN 60695-11-10). Pro aplikace ve stavebnictví jsou k dispozici kompozitní materiály splňující klasifikaci B (ČSN 73 0862), C (ČSN EN 13501-1) a B1 či B2 (DIN 4102-1).

8.2. Recyklovatelnost

Některé materiály používané ve finálních výrobcích nelze snadno přeměnit zpět na jejich základní stavební kameny, které by mohly být použity jako druhotné suroviny nebo meziprodukty. To je obvykle způsobeno vlastní chemickou strukturou materiálu a zpracováním a/nebo přísadami, které byly použity k zajištění jeho konečných vlastností.
Ačkoli je u většiny materiálů recyklace teoreticky z technologického hlediska možná, není praktikována v širokém měřítku kvůli několika překážkám, jako je vysoká energetická náročnost, vysoká pracnost nebo nízká hodnota konečného recyklátu, díky čemuž není recyklace ekonomicky životaschopná. Mezi takové materiály patří textilie, vlákny vyztužené polymery, materiály používané v bateriových aplikacích a většina materiálů používaných ve stavebnictví.
V některých případech je však recyklace materiálů technologicky náročná kvůli inherentním vlastnostem materiálu, které jsou typicky výsledkem jeho počátečního zpracovatelského cyklu nebo přísad používaných při jejich výrobě. Vlastnosti, které představují výzvu pro recyklovatelnost materiálu, jsou často stejné, které mu poskytují jeho jedinečné vlastnosti. Příkladem jsou termosetové pryskyřice s nevratnými chemickými vazbami, které jsou výsledkem procesu vytvrzování a polyuretanové pěny s vlastnostmi zpomalujícími hoření používané v izolaci a v nábytku.
Postupné omezování používání nebezpečných látek není zcela nové. Zákazy použití jednotlivých látek např. používání olova nebo rtuti existovaly ještě před REACH.
REACH a nové předpisy v oblasti biocidních materiálů tento proces významně urychlily. Náročný proces změn podléhá také často vlivu lobbistických tlaků ze strany těch firem, které již mají vyvinuty vhodné substituenty, které jsou často dražší. Patrné to bylo např. u koksochemie, titanové běloby, zhášedel, pesticidů a dalších.
Možnostmi uplatnění chemické recyklace se mj. zabývá Issue Team for Chemical Recycling Cefic. Na jeho webových stránkách jsou mj. přehledně znázorněny alternativy materiálové

recyklace plastů. **6).** V ČR pak tuto problematiku řeší ČTP Plasty a v rámci jedné ze svých pracovních skupin i SCHP ČR.

Nejžhavější výzkumná témata

8.2.1 Per – a polyfluoroalkylované látky (PFAS)

Vazby mezi uhlíkem a fluorem patří k nejsilnějším chemickým vazbám v organické chemii. PFAS mají široké použití, např. materiály pro styk s potravinami (obaly proti promaštění, pečící papír), textil, kosmetika, elektronika, zdravotnické prostředky, hasicí pěny, automobilový průmysl, letectví, obrana. Odolávají rozkladu a snadno se přenáší na dlouhé vzdálenosti od zdroje svého uvolnění (kontaminace podzemních vod, povrchové vody a půdy), jsou toxické pro reprodukci, některé mohou být karcinogenní. Některé jsou zařazeny do kandidátského seznamu nebezpečných látek (např. kyselina perfluorbutansulfonová (PFBS) a kyselina 2,3,3,3-tetrafluor-2-(heptafluorpropoxy)propionová, její soli a acylhalogenidy (HFPO-DA)). Stockholmskou úmluvou jsou zakázány např. PFOS, PFOA a PFHxS a od roku 2025 (COP-12) i dlouhořetězcové perfluorkarboxylové kyseliny C9–C21. Likvidace těchto látek není sice zcela nemožná, ale vyžaduje to extrémně vysoké teploty, a je tudíž drahá. Ve vývoji je metoda používající louh sodný.
Cílem je rozrušit fluoro-uhlíkové vazby, které patří mezi nejsilnější v celé organické chemii, ale jsou zároveň podmínkou schopnosti odpuzovat kapaliny, tedy i užitečnosti a využitelnosti těchto látek. Vývojáři se zaměřili na skupinu slabě nabitých atomů kyslíku na konci vazeb, čímž se jim podařilo oddělit koncovou část vazby od zbytku, načež se PFAS začaly rozpadat.
Metoda však funguje jen na 10 druhů široce používaných PFAS, a navíc tyto látky jsou rozšířené nejen ve vodě a půdě, ale i přímo v tělech zvířat a lidí.
Závažnost kontaminace životního prostředí PFAS je dokumentována i současným zpřísňováním restrikcí jejich použití všude, kde to bezpečnost provozů dovoluje nebo kde existuje jejich náhrada. Návrh univerzálního omezení PFAS v EU je v hodnocení ECHA (druhá veřejná konzultace skončila 25. 5. 2026, konečné přijetí se očekává nejdříve kolem roku 2029).

- Sanace proti bioakumulaci PFAS

PFAS tvoří rodinu velmi důležitých chemikálií díky jejich četným a extrémně užitečným vlastnostem. Nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích, což vedlo k jejich širokému přijetí a nevyhnutelnému uvolnění do životního prostředí. Důkazy zdůraznily účinek některých z nich na lidské zdraví, zejména co se týká imunitních reakcí a některých typů rakoviny a onemocnění štítné žlázy.
Puraffinity, společnost z Velké Británie specializující se na design pokročilých materiálů, vyvinula novou platformovou technologii, která umožňuje čištění vodních toků od těchto látek. Jejich surový substrát je upraven tak, aby byl „přátelský k PFAS“, schopný vázat se s molekulami PFAS. Toho se dosáhne přidáním optimalizovaných molekulárních receptorů na povrch, takže cílené molekuly PFAS jsou přitahovány a zachyceny na substrátu. Tato technologie tedy dokáže čistit vodní toky a nabízí rychlé a snadné řešení proti rozptylu PFAS

do prostředí. Filtrace může být implementována přímo v místech použití vody, například v domácnostech, nebo může být přijata potravinářským, nápojovým a farmaceutickým průmyslem vyrábějícím zboží pro lidskou spotřebu. Navíc schopnost regenerace média pro více použití znamená nižší provozní náklady. Tato technologie by mohla být zajímavá i pro letiště, která mohou být díky použití pěn zpomalujících hoření vystavena environmentálním a zdravotním rizikům. A konečně, průmyslová výroba a ropná a plynárenská zařízení jsou všechna odvětví, která se potýkají s problémy souvisejícími s používáním PFAS a kontaminovaných odtokových vod. Přijetí této technologie může umožnit nepřetržitý provoz a podstatně snížit OPEX.

8.2.2 Olovo

Látka toxická pro reprodukci: Repr. 1A; H360FD, SCL 0,03 % pro práškovou formu. Použití: výroba baterií, různých částí vozidel, strojů, nábytku, opláštění kabelů, pájení. Již dříve bylo omezeno používání Pb v elektronice. ECHA předložila v lednu 2021 návrh omezení používání olova ve střelivu určeném pro lov a sportovní střelbu a při rybolovu. V roce 2026 byl ve výboru REACH odsouhlasen návrh omezení olova v rybářském náčiní (s přechodnými obdobími 6 měsíců až 5 let) a předán ke kontrole Radě a Evropskému parlamentu; omezení olova ve střelivu je stále projednáváno.

8.2.3 Mikroplasty

Pevné plastové částice složené ze směsí polymerů a funkčních přísad, menší než 5 mm. V životním prostředí se biologicky nerozkládají (hromadí se ve zvířatech, včetně ryb a plodů moře, a v důsledku toho se také konzumují v potravinách).
Uvolňování přispívá k trvalému znečištění našich ekosystémů a potravinových řetězců. Nezáměrně vznikají i opotřebováváním větších kusů plastů (např. pneumatik).
Záměrná výroba – přídavek do výrobků pro zvláštní účely např. hnojiva, přípravky na ochranu rostlin, kosmetické přípravky, detergenty používané v domácnostech a průmyslu, čisticí prostředky, barvy a výrobků používaných v ropném a plynárenském průmyslu.
Měkký výplňový materiál sportovních hřišť s umělým trávníkem. Ve spotřebních výrobcích jako abraziva např. jako exfoliační nebo lešticí látky, jako mikročástice v kosmetických přípravcích. Další funkce např. regulace hustoty, vzhledu a stability výrobku, použití jako třpytky nebo součást líčidel. Celkově se odhaduje, že se v EU každý rok použije okolo 145 000 tun mikroplastů. Záměrně přidávané mikroplasty omezuje nařízení Komise (EU) 2023/2055 (položka 78 přílohy XVII REACH) s postupně nabíhajícími přechodnými obdobími; od 17. 10. 2026 platí povinnost poskytovat pokyny k likvidaci. Úniky plastových granulí řeší nové nařízení EU o předcházení ztrátám plastových pelet přijaté v roce 2025.

Další sledované chemikálie:

- Změkčovadla (bez ftalátů) pro materiály pro styk s potravinami
- Povrchově aktivní látky, např.

používané při zpracování textilií během fáze čištění (praní)

- Zpomalovače hoření (bez halogenů)
- Rtuť
- Pesticidy

8.3. Optimalizace procesů

Optimalizace procesů a zlepšení jejich efektivity může řešit problémy s využitím zdrojů a emisí. Cílem optimalizace by mělo být snížení využívání fosilních zdrojů a také zvýšení cirkulace materiálů.
Jedním z řešení, které by se mohlo vypořádat s vysokou spotřebou energie, je zvýšení rekuperace tepla v průmyslových procesech a jeho přesměrování tam, kde je potřeba (integrace procesů tepla a elektřiny). Vývoj procesů, které fungují v bezvodých médiích, stejně jako snížení a rekuperace škodlivých rozpouštědel a činidel používaných ve výrobních procesech, snižují spotřebu spotřebního materiálu a jsou ekologičtější.

8.3.1 Substituce nebezpečných procesů

Procesy, které jsou ze své podstaty nebezpečné, lze zcela nahradit nebo alespoň upravit. Jedním z navrhovaných řešení je použití procesů, které nevyužívají znečišťující látky, například nahrazení výroby amorfních pevných disperzí na bázi rozpouštědel výrobním procesem bez rozpouštědel nebo ve vodném prostředí.
I když ne všechny procesy lze zcela nahradit, stále je lze upravit tak, aby se snížila rizika. Příkladem je použití technologických prostředků k zachycení škodlivin před jejich uvolněním do životního prostředí, kupř. použití separačních membrán – reverzní osmóza – nebo využití technik imobilizace nanočástic k zachycení škodlivých nanočástic, jako je TiO2.

Výzvy pro český chemický výzkum:

- Zahrnout problematiku Strategie udržitelnosti chemikálií do svých programů strategie transformace
- Vývoj pokročilých materiálů jako jsou moderní plasty, biomateriály a biodegradovatelné materiály, moderní katalyzátory, nanomateriály, nanotechnologie, speciální vlákna, technické textilie, kompozitní materiály, vláknové kompozity, viskózní vlákna, materiály pro výrobní technologie a konkrétní využití
- Nové a sofistikované organické sloučeniny pro různé aplikace, např. pro mikroelektroniku**.**
- Nové farmaceutické meziprodukty a aktivní látky
- Substituce epichlorhydrinu
- Substituce vybraných zhášedel
- Substituce chemikálií pro brzdové kapaliny
- Zapojit se do vývoje alternativních konceptů testování toxicity

- Vývoj nových pokročilých nekovových materiálů pro průmyslové a spotřební užití

Na podporu výměny informací o úspěšných řešeních substitucí nebezpečných látek byla vytvořena mezinárodní platforma SUBSPORT (The Substitution Support Portal), kde lze vstoupit i do databáze úspěšných realizovaných náhrad**. 7)**

Zdroje :

1) *Kulhánková P.: Regulace chemických látek x recyklace plastů, novinky v EGD z pohledu MPO ČR, ICCT konference Mikulov, 2022*

2) *Safe and Sustainable by Design (SSbD) chemicals and materials, CEFIC Stakeholder Workshop 22. 3. 2022*

3) *Economic Analysis of the Impacts of the Chemicals Strategy for Sustainability, CEFIC prosinec 2021*

4) *Research and Innovation Roadmap 2050, CEFIC 2020*

5) *Zimmermann A., Cater L.: Toxic or magic? Batteries industry freaks out over EU proposal to classify lithium as a Toxin, Politico, Brusel 14. 7. 2022*

6) *https://cefic.org/a-solution-provider-for-sustainability/chemical-recycling-making-plastics-circular/*

7) *SUBSPORT – portál na podporu substituce, http://www.subsport.eu/case-stories-database*

9. Modernizace rafinérsko-petrochemického průmyslu

Dlouhodobá strategie rafinérského průmyslu pro nízkouhlíková kapalná paliva z roku 2018 ukazuje, že by většinové využití nízkouhlíkových kapalných paliv v dopravě mohlo snížit čisté emise CO_2 až o 87 % v roce 2050 ve srovnání s rokem 2015. Nové a inovativní výrobní technologie pro chemický průmysl, které snižují dopady na životní prostředí, snižují jejich energetickou a materiálovou náročnost. Přestože podíl obnovitelných zdrojů a alternativních paliv roste a poroste ještě rychleji, bude přinejmenším do roku 2030 většinový podíl energie v dopravě pocházet stále z ropy. Důležité však jsou vize, co potom. Vize 2050 ukazuje, že rozvoj udržitelných bezemisních nebo nízkoemisních kapalných paliv je možný a reálný a může průběžně akcentovat technický vývoj pohonů automobilů a plně respektovat i soudobý stav vozového parku, který se nepochybně nezmění ze dne na den.
evropského rafinérského průmyslu (FuelsEurope, Clean Fuels for All / Vision 2050) **1)** bude rafinerie budoucnosti, využívající své technologické know-how a flexibilní infrastruktury, stále častěji využívat nové suroviny, jako jsou obnovitelné zdroje, odpad a zachycený CO_2, ve velmi účinném výrobním centru, integrovaném do klastru průmyslových odvětví, v součinnosti s jinými odvětvími, jako jsou chemický průmysl, dálkové vytápění, udržitelná biopaliva a energetický průmysl. Tyto klastry budou zpracovávat a vyměňovat různé suroviny a polotovary – například obnovitelný vodík, odpadní uhlík, udržitelnou biomasu, odpad, zbytkové teplo, konvenční a syntetickou ropu a obnovitelnou energii. Nízkouhlíková kapalná paliva mohou být jednou z nákladově nejefektivnějších možností snižování CO_2 v dopravě. K výrobě nízkouhlíkových kapalných paliv bude zapotřebí mnoha technologií s potenciálem zajistit nízkoemisní mobilitu po celou dobu životnosti vozidel ve všech dopravních segmentech, jako jsou udržitelná biopaliva, CCS/CCU, obnovitelný vodík a převod energie do kapalin (power-to-liquids). Rozsáhlou integrací rafinerií a petrochemického průmyslu tyto průmyslové synergie zvýší konkurenceschopnost tohoto odvětví.
Největší rafinérsko-petrochemická společnost v ČR Orlen Unipetrol je součástí skupiny ORLEN. Skupina v roce 2025 zveřejnila strategii do roku 2035, podle níž chce do roku 2030 zcela ukončit výrobu energie z uhlí a do roku 2050 dosáhnout uhlíkové neutrality. Skupina v ní počítá s kumulovanými investicemi 350–380 mld. PLN v letech 2025–2035. Zaměřuje se zejména na:

- obnovitelné zdroje (12,8 GW instalovaného výkonu),
- akumulaci energie (1,4 GW),
- malé modulární reaktory (0,6 GW),
- zvýšení podílu obnovitelné energie v palivech na více než 25 %,
- využívání přibližně 210 tis. t obnovitelného vodíku ročně v rafinériích,
- rozšíření recyklační kapacity plastů ze 40 na 250 tis. t ročně.

Orlen Unipetrol již ve své strategii do roku 2030 ohlásil investice do zelených projektů ve výši přes 30 mld. Kč. Hlavní oblasti rozvoje v ČR:

- **Dekarbonizace výroby energie:** původně plánovaný paroplynový zdroj v Záluží u Litvínova nebyl kvůli vysokým nabídkovým cenám realizován. Místo něj společnost od konce roku 2025 převádí uhelnou teplárnu T700 na zemní plyn. Dva plynové kotle o tepelném výkonu 270 MW, schopné spalovat i směs s až 20 % vodíku, mají být

dokončeny ve 4. čtvrtletí 2027. Spotřeba uhlí tím klesne z 1,1 mil. t na méně než 0,4 mil. t ročně.

- **Obnovitelný vodík:** u rafinerie v Litvínově vzniká fotovoltaická elektrárna o výkonu 54 MW s PEM elektrolyzéry o příkonu 30 MW pro výrobu přibližně 913 t vodíku ročně, s dokončením do konce roku 2028.
- **Vodíková mobilita:** společnost provozuje dvě veřejné plnicí stanice (Praha-Barrandov, Litvínov) a plánuje rozšíření sítě na přibližně 20 stanic do roku 2030.
- **Recyklace plastů:** 15 % produkce polymerů má pocházet z recyklovaných plastů.
- **Pokročilá biopaliva:** výroba pokročilých biopaliv z rostlinného nebo plastového odpadu v objemu přibližně 0,2 mil. t ročně.

Pro výrobu olefinů (ethylenu, propylenu a butadienu) a aromatických látek (benzenu, toluenu a xylenu) je k dispozici řada konvenčních i alternativních metod. Některé z nich jsou rozebrány v této SVA.

V CM SUSCHEM CZ **3)** je analyzován předpokládaný vývoj v oblasti rafinérského a petrochemického průmyslu. Za hlavní faktory ovlivňující budoucí vývoj je považováno:

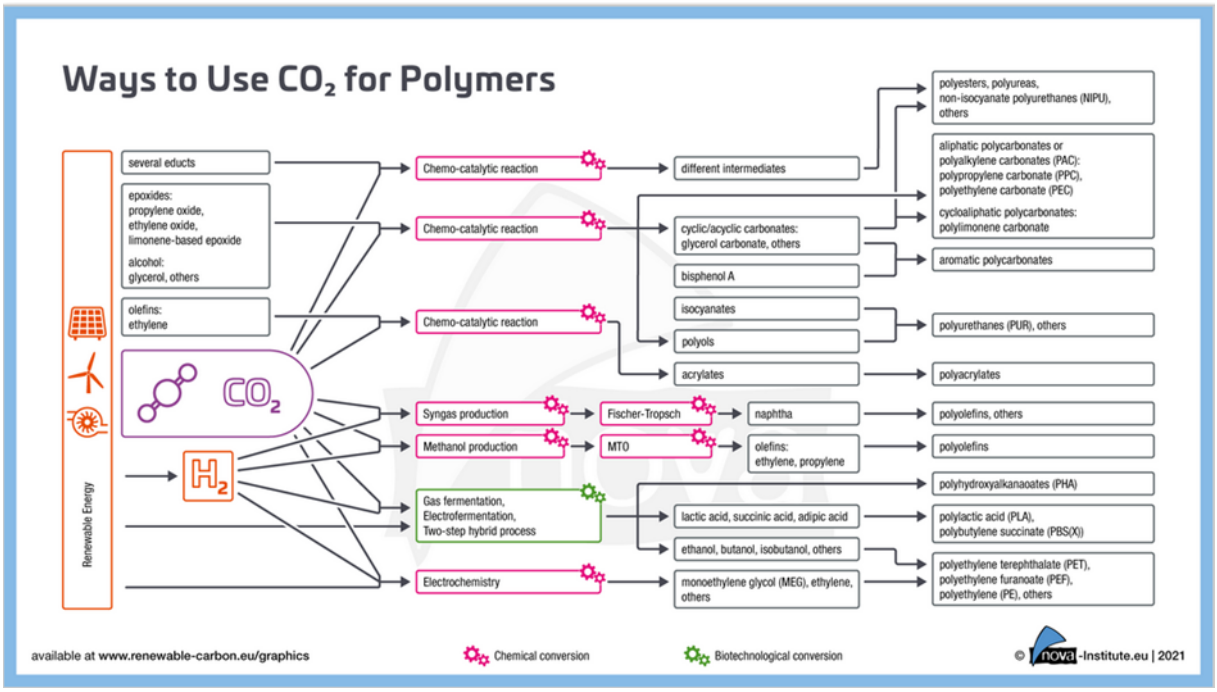
- Dekarbonizace dopravy (přechod na elektromobilitu, vodík pro dopravu) povede ke snížení objemu výroby kapalných pohonných paliv až o 50 % do roku 2050, zároveň se tím uvolní cenné suroviny pro zvýšení výroby plastů
- Změna energetického a surovinového mixu

Postupný odklon od fosilních surovin, růst využívání OZE, recyklace plastů a odpadů, využívání CO_2 jako suroviny pro výrobu chemikálií (CCU). V roce 2030 se předpokládá, že cca 13 % světové spotřeby energií bude kryto obnovitelnými zdroji (IEA).
Je však třeba přiznat, že zatímco tyto nové technologie přinášejí výrazné snížení emisí, z ekonomického posouzení se obvykle mohou stát nákladově srovnatelné se stávajícími konvenčními procesy až po roce 2040, a to i přes realizaci velmi ambiciózních úvah o snížení ceny fotovoltaických článků, větrných elektráren a elektrolyzérů.

- Rozvoj moderních biopaliv a syntetických paliv
- Růst spotřeby plastů

Podle studie **4)** celková výroba plastů v roce 2050 se předpokládá – 1,2 mld. t, z toho
135 mil. t z biomasy a z CO_2
315 mil. t z fosilních zdrojů
750 mil. t z mechanických nebo chemických recyklací

Podle nařízení PPWR (EU) 2025/40 musí plastové obaly od roku 2030 obsahovat minimálně 10–35 % recyklátu (podle druhu obalu, např. 30 % u PET obalů citlivých na kontakt s potravinami a u jednorázových lahví na nápoje); do roku 2030 má být recyklováno 55 % plastových obalů. Podle SVA tento cíl nebude možné splnit bez zahrnutí chemické recyklace. Plastics Europe v roce 2021 očekávala nárůst investic do chem. recyklací z 2,6 mld. EUR v roce 2025 na 7,2 mld. EUR v roce 2030 (v roce 2025 1,2 mil. t recyklátu, v roce 2030 3,4 mil. t recyklátu).
Transformace rafinérsko-petrochemického komplexu, předpokládané snížení spotřeby v souvislosti s rozvojem elektromobility a vývoj využití CO2 pro petrochemii dává naději na zvýšení výroby plastů.
Jako příklad využití CO_2 pro výrobu plastů znázorňuje následující obrázek č. 11.



9.1. Optimalizace technologických procesů

Vývoj technologií v rafinérském a petrochemickém průmyslu bude intenzivní především v oblasti využití alternativních surovin a ve zlepšení účinnosti výrobních procesů, snižování spotřeby energií a surovin.
Významnou součástí je vývoj nových katalyzátorů. V oblasti zlepšení účinnosti výrobních procesů je cílem maximalizovat využití všech zdrojů, které vstupují do systému, včetně primárních a sekundárních surovin, vody a energie prostřednictvím zlepšení účinnosti procesu zpracování ropných frakcí (např. zlepšené katalyzátory včetně biokatalyzátorů, zintenzivnění procesů, IT a modelování), recyklace zdrojů na výrobních místech, zvýšení účinnosti zdrojů a sdílení energie mezi různými výrobními místy / sektory prostřednictvím průmyslové symbiózy. Také modernizace aparátů např. nový systém ohřevu pyrolýzy, výměna izolace etylenového splitteru, propylenové splitterové vařáky a další.

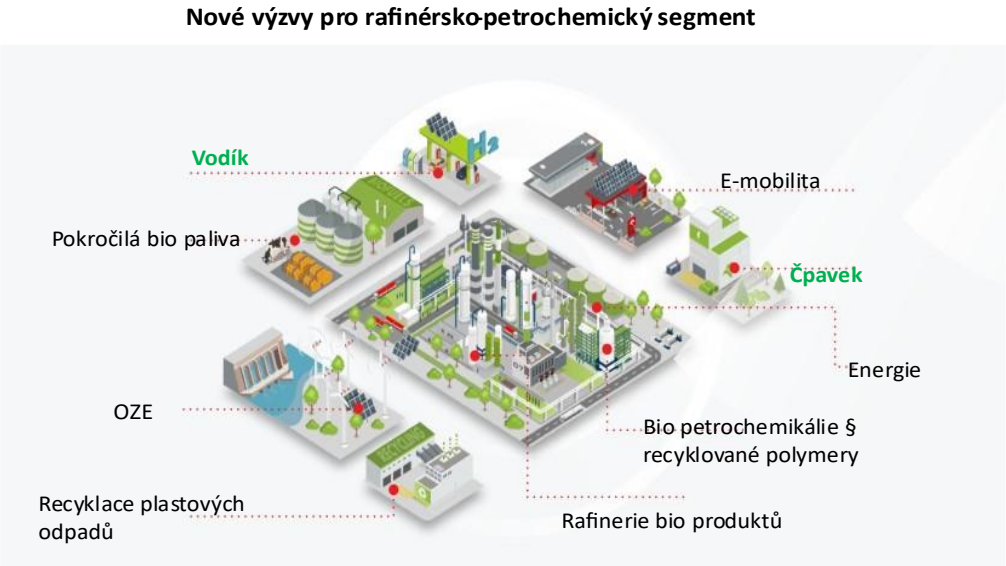
9.2. Transformace rafinérsko-petrochemického sektoru na potenciální nástup neuhlovodíkové mobility – trendy ve výrobě paliv

K ekologizaci oboru v Orlen Unipetrol budou řešeny následující klíčové příspěvky**: 2)**

- Zvýšení kapacity etylenové jednotky o 12 % (z 543 kt/r na 613 kt/r)
- Odstraňování úzkých míst a vylepšení výkonu

- Chemická recyklace odpadních plastů
- Integrace pyrolýzních olejů z recyklace odpadních plastů do petrochemických produktů
- Rozvoj výroby a distribuce zeleného vodíku

Obr. č. 12: Nové výzvy pro rafinérsko- petrochemický segment



Cílem využití alternativních surovin je částečně omezit závislost výrobních procesů a produktů na ropě a zemním plynu. Mezi alternativní suroviny v tomto kontextu patří například zemědělské suroviny (pěstované nikoli na úkor potravinových zdrojů), druhotné zemědělské suroviny (lignocelulózová biomasa, jako je dřevní štěpka a sláma z různých zemědělských plodin), biotechnologie (zaměřené zejména na využití bakteriálních efektů, využití řas apod. pro syntézu různých uhlovodíků), výhledově i komunální odpad nebo CO_2 z průmyslových spalin, které by mohly být použity jako alternativní uhlíkové zdroje pro výrobu pohonných hmot.

Rozšíření alternativních pohonů, sdílená mobilita a autonomní vozy budou mít významný vliv na budoucnost sektoru dopravy. Elektromobilita roste rychleji, než se ještě před několika lety předpokládalo. Podle IEA (Global EV Outlook 2026) se v roce 2025 celosvětově prodalo přes 20 milionů elektromobilů, tj. zhruba čtvrtina všech nových osobních aut. Podíl elektromobilů na prodejích činil v Číně přibližně 55 %, v Evropě 28 % a v USA asi 10 %. Pro rok 2026 se očekává 23 milionů prodaných elektromobilů (27–28 % trhu). Elektromobily již v roce 2025 nahradily spotřebu přibližně 1,7 mil. barelů ropy denně a do roku 2030 se má tato hodnota zhruba ztrojnásobit na 5 mil. barelů denně. Autonomní vozidla se v USA a Číně začínají komerčně provozovat v podobě robotaxi.

Spotřeba pohonných hmot v silniční dopravě by podle BloombergNEF (Electric Vehicle Outlook 2026) měla dosáhnout vrcholu kolem roku 2029 a následně začít klesat. Do roku 2040 má elektrifikace vozového parku snížit celosvětovou poptávku po silničních palivech o přibližně 26 mil. barelů denně. Spalovací motory však z vozového parku nezmizí rychle:

elektromobily mají početně převážit nad vozy se spalovacím motorem až kolem roku 2047. I v roce 2040 bude na silnicích přes miliardu vozidel se spalovacím motorem, a kapalná paliva, včetně biopaliv a syntetických paliv, si proto udrží významnou roli ještě řadu let.

Na trhu s ropou se bude zvyšovat podíl rop s větším obsahem těžkých frakcí, síry a dalších nečistot. Současně lze očekávat, že část klasické ropy bude postupně nahrazena syntetickou ropou vyrobenou petrochemicky Fischer-Tropschovou (FT) syntézou, především na bázi zemního plynu (technologie GTL). Odhaduje se, že realizace technologie GTL bude ekonomicky ekvivalentní objevu několika desítek miliard tun nové ropy. Projekty tak umožní využívat zemní plyn jako surovinu v rafinérsko-petrochemickém průmyslu ve významně větší míře, než tomu bylo dosud.
Z hlediska rozvoje rafinérských technologií jsou za perspektivní považovány především hydrokrakování a hydrogenační rafinace. Tyto technologie naleznou uplatnění jak v nových, tak i modernizovaných rafineriích. Využity budou pro hydrogenační konverzi ropných zbytků, výrobu „bezsirných" motorových paliv a v neposlední řadě i pro konverzi biomasy na komponenty do motorových paliv, resp. pro její společné zpracování („coprocessing") s ropnými frakcemi na motorová paliva. S ohledem na pokroky technologické i pokroky ve vývoji hydrorafinačních katalyzátorů bude u konverzních procesů výhodnější rafinovat surovinu než produkty získané její konverzí a rozšířit si tak zdroje surovin. Vodík pro hydrogenační technologie v rafinerii bude místo z katalytického reformování stále více získáván parním reformováním lehkých uhlovodíků (alternativní uplatnění např. pro benzinové uhlovodíky) nebo elektrolýzou.

Pro udržení konkurenceschopnosti budou třeba následující změny: **5)**

- Postupné zavádění výroby produktů a používaných surovin na bázi bio-komponent při společném zpracování s ropou, resp. fosilními surovinami. Toto uspořádání se označuje jako koprocesing. (Pozn.: Tuto situaci lze srovnat se situací let 1945 až 1962, kdy se základní rafinérská výroba čistě na bázi uhlí postupně krok za krokem transformovala na čistě ropu zpracovávající),
- snižování emisí CO_2 spojené s technologiemi pro separaci a záchyt oxidu uhličitého a jeho využití jako doplňkové suroviny do stávajících procesů,
- nové katalyzátory umožňující provozování rafinérských procesů při nižších teplotách, tlacích s vyšší konverzí a selektivitou,
- Intenzifikace procesů produkujících vodík s využitím elektrické energie vyráběné z obnovitelných zdrojů,
- náhrada fosilních paliv při výrobě procesního tepla za OZE.
- využití metod chemické (především termochemické) recyklace jako zdroje nefosilního uhlíku

Patrná je zejména snaha dosáhnout co nejvyššího zhodnocení nízkohodnotných ropných zbytků. Jako příklad lze doložit tuto reorientaci rafinérií na dvou klíčových procesech – fluidním katalytickém krakování a konverzi zbytků postupem H-oil. Pokud se týká jednotek FCC, budou do budoucna modifikovány tak, aby byly významnými producenty lehkých složek – olefinů a lehkého benzinu. Přímá produkce propylenu z procesu FCC činí dnes již téměř třetinu z celkové výroby (zbytek tvoří převážně pyrolýza a částečně též procesy PDH –

dehydrogenace propanu). Jednotky FCC upravují své procesní podmínky a používají „olefin selektivní“ katalyzátory, čímž se stávají do budoucna významnými producenty petrochemikálií. V procesech konverze ropných zbytků se do budoucna bude klást důraz na výtěžek lehkých benzinů. Lehký benzin totiž představuje základní petrochemickou surovinu – lehčí část benzinu je velmi výhodnou surovinou pro ethylenové pyrolýzní jednotky, zatímco těžší část benzinu je nejvýhodnější surovinou pro aromatické komplexy. Značný počet plánovaných projektů v oblasti transformace rafinérií na rafinérsko-petrochemické komplexy je založen na technologiích typu H-oil vybavených reaktory s vroucím ložem katalyzátoru. Hlavním cílem těchto postupů je konvertovat těžké nástřiky s vyšším obsahem kovů, síry a dusíku na lehčí destiláty a využití flexibility procesu pro požadovaný výtěžek benzinu, popř. plynového oleje.

9.2.1 Biopaliva

EU stanovila dodavatelům PHM povinnost dodávat pokročilá biopaliva takto (směrnice RED II a RED III):

- 0,2 % v roce 2022
- 1,0 % v roce 2025
- 5,5 % v roce 2030 (společný subcíl RED III pro pokročilá biopaliva, bioplyn a paliva RFNBO, z toho nejméně 1 % RFNBO)

U biopaliv druhé generace už plodiny nerostou na orné půdě, ale biopalivo je vyráběno z dřevní biomasy nebo zemědělských odpadů. Je sice možné pěstovat plodinu na poli, ale využít se musí její odpad. To znamená odpadní oleje, sláma, bagasa a podobně.

Rafinérie tak budou pravděpodobně některá pokročilá biopaliva vyrábět s využitím svého stávajícího zařízení, neboť půjde obvykle o procesy vysokotlaké probíhající v přítomnosti vodíku. Tyto procesy pak bude často možné provozovat v režimu tzv. koprocesingu, kdy se obnovitelné suroviny zpracují spolu s ropnou surovinou na stávajícím zařízení. Příkladem je pro náš rafinérský sektor použití stávajících hydrogenačních a hydrokrakovacích kapacit pro využití (též použitých kuchyňských) olejů (triglyceridů) jejich hydrodeoxygenací na uhlovodíky s uhlíkovým číslem C12 až C20. Takto lze odpadní suroviny konvertovat na hydrogenované oleje (označení HVO), které zlepšují některé parametry základního ropného dieselového paliva (nízký obsah síry, vyšší cetanové číslo).

Největším českým výrobcem biopaliv z řepky je firma Preol, která spolu s další dceřinou společností Agrofertu, firmou Primagra, dlouhodobě dodává polovinu biosložek pro státního distributora paliv Čepro.

9.2.2 Syntetická paliva

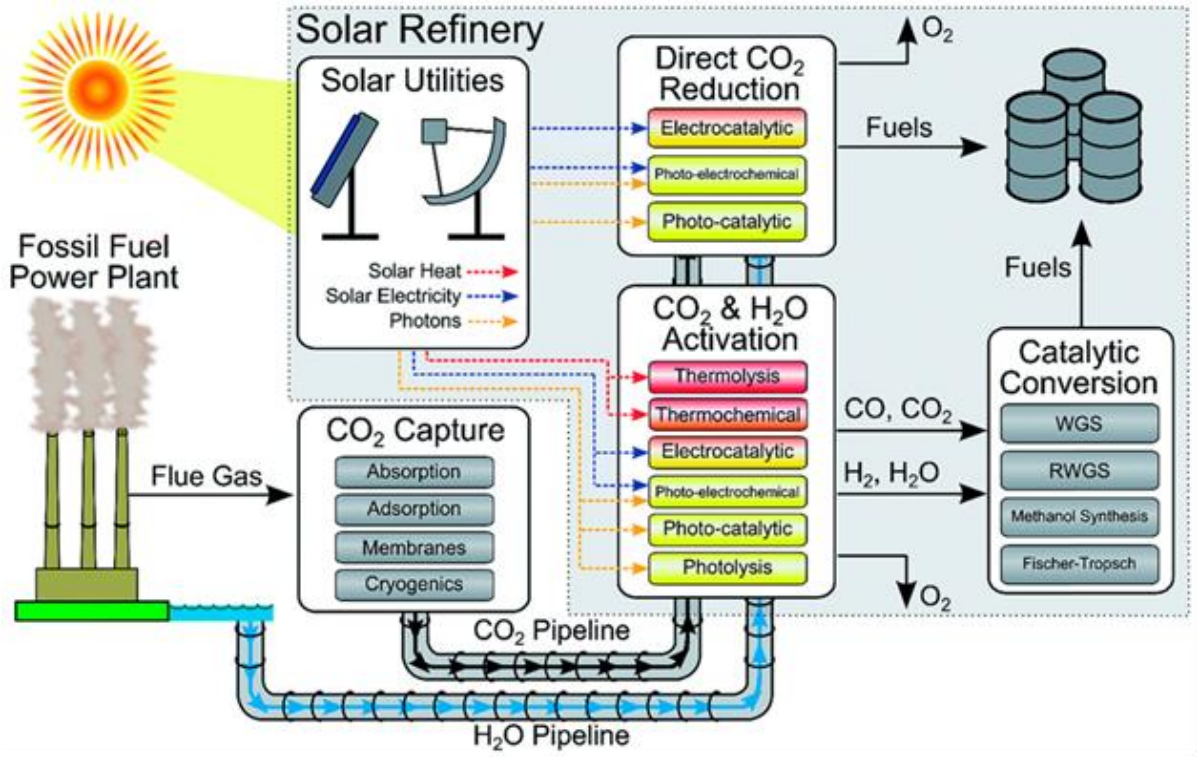
Rozvoj využívání syntetických paliv si vyžádá úpravu klasických spalovacích motorů, nicméně bude možné využívat současnou čerpací infrastrukturu. Syntetická paliva považujeme za

jednu z reálných cest k udržitelné mobilitě. Zatímco běžné palivo vzniká rafinací ropy, syntetická paliva vznikají chemickou reakcí nejčastěji elektrolýzou vody na kyslík a vodík, následně sloučení vodíku s CO_2. Jejich spalování produkuje výrazně čistější emise (bez síry a aromatických uhlovodíků), využití CO_2 pro výrobu (odpad z průmyslové výroby nebo přímo ze vzduchu) z nich může dělat téměř uhlíkově neutrální palivo – ovšem pouze tehdy, jsou-li vyráběna s využitím energie z obnovitelných nebo jiných nízkoemisních zdrojů. Syntetická paliva se mohou stát příměsí klasických paliv, nebo se mohou spalovat zcela samostatně.

Vodíková strategie významně ovlivní vývoj rafinérsko-petrochemického sektoru, který je doposud hlavním producentem vodíku. Vodík je vedlejší produkt v rafinérských procesech např. reformování nebo při výrobě ethylenu vysokoteplotní pyrolýzou, účelová výroba vodíku se u nás děje především parciální oxidací (zplyňováním) primárních ropných zbytků nebo zbytkových frakcí ze štěpných procesů (visbreaking). Klasické procesy výroby vodíku jsou však spojeny s emisemi CO_2. Nové strategie předpokládají jak výrobu zeleného vodíku (velké fotovoltaické elektrárny a elektrolýza), ale také využití vodíku v procesech CCU.

Bezemisní či nízkoemisní vodík nemusí být vyroben pouze elektrolýzou vody za využití obnovitelných zdrojů energie, ale lze jej vyrobit také například parním reformováním bioplynu nebo jako vedlejší produkt při dalších chemických výrobách. S pokračujícím vývojem technologií se rozšiřují možnosti uplatnění takto vyrobeného vodíku v rafinérsko-petrochemických kombinátech, např. při výrobě plastů či klasických vysoce rafinovaných (odstranění síry, aromátů, alkenů atd.) kapalných paliv.

Schéma této nové strategie znázorňuje obr. č. 13. **6)**



Konverze oxidu uhličitého se stala hlavním výzkumným tématem jeho smysluplné a efektivní transformace v programech řešení klimatických změn (po SOx, NOx, se v budoucnu otevřela ale i otázka emisí methanu).

Nedílnou součástí transformace rafinérsko-petrochemického odvětví je uplatnění cirkulární ekonomiky zejména jako zdroje nových surovin v náhradě fosilních zdrojů.
Výroba plastů a potenciální využití produktů jejich recyklace je opět jedna z oblastí využití rafinérsko-petrochemického sektoru.
Termochemický rozklad (pyrolýza) odpadních polymerů – jedna z možností, jak realizovat chemickou recyklaci. Za určitých předpokladů z nich lze z výstupních materiálů vyrobit opět plasty v tzv. virgin kvalitě. Termochemické zpracování odpadních plastů emituje o cca 50 % menší množství CO2 než jejich spalování. Výzkum a vývoj je v této oblasti také nejdále a jsou připraveny technologie využitelné pro komerční nasazení.

Petrochemický sektor v ČR je obdobně jako jinde ve světě postaven na základních třech pilířích – olefinech, aromátech a vodíku. Pro výrobu těchto komodit se v ČR spotřebuje cca 2 miliony tun ropy, popř. uhelných dehtů. Olefiny, to je zejména etylen a propylen, se v ročním množství cca 500 kt, resp. 250 kt vyrábějí pyrolýzou lehkých ropných směsí a též procesem FCC (fluidní katalytické krakování) těžkých ropných směsí.
Aromáty – především nejdůležitější benzen – je vyráběn separací z produktů etylenové pyrolýzy ropných frakcí a černouhelného dehtu. Vodík využívaný dnes pro zušlechtění paliv a syntézy (u nás především amoniaku) je, kromě toho že je důležitým rafinérským vedlejším produktem (reformování, pyrolýza), vyráběn cíleně parciální oxidací těžkých/zbytkových ropných surovin. Pro účely prognózy petrochemie, následných organických syntéz a v následné výrobě polymerů lze zdůraznit:

- petrochemické výroby budou nadále založeny na uvedené trojici komodit – olefiny, aromáty, vodík,
- pro tyto výroby (jakož i další organické syntézy) budou postupně využívány obnovitelné suroviny,
- produkce CO_2 bude dále trvat, půjde ovšem o CO_2, jehož množství bude bilančně shodné s jeho spotřebou pro fotosyntézu. Petrochemie založená na obnovitelných zdrojích tak bude emisně neutrální,
- obdobně jako chemický průmysl jako celek, bude petrochemická výroba procházet obdobím tzv. koprocesingu, kdy se bude k ropné surovině připojovat využití zemního plynu, biomasy popř. výstupů z termochemické recyklace (pyrolýzní oleje). S časem bude váha obnovitelných surovin stoupat – koncovým stavem může být „petrochemie“ bez fosilních surovin, tedy s nulovou (fosilní) uhlíkovou stopou,
- nefosilní petrochemie bude ovšem spojena s nutností produkovat zelený vodík, a tedy bude podmíněna dostatkem energetických zdrojů s omezenou emisní zátěží,
- výroba základních petrochemických komodit bude propojena s pokroky v technologiích v rámci oběhového hospodářství (cirkulární ekonomiky),
- uhlíkovou surovinou pro organické syntézy bude potenciálně i produkovaný oxid uhličitý.

Z výše uvedeného sumárního pohledu na budoucnost petrochemie lze učinit předpoklad, že v konečné fázi bude možné vyrábět potřebné komodity pro polymerní syntézy pouze z obnovitelných surovin. Jelikož je produkce komodit základem českého chemického průmyslu, který zabezpečuje konkurenceschopnost strojírenských výrob, stavebnictví i potravinářského sektoru, je jednoznačným imperativem pro tuzemský výzkum a vývoj v rámci mezinárodní spolupráce na procesech zelené petrochemie intenzivně pracovat.

Dále jsou uvedeny některé principiální postupy, které vedou od obnovitelných surovin k olefinům, aromátům a vodíku:

9.2.3 Zelený etylen 5)

K etylenu z obnovitelných surovin vede několik cest, nejnadějnějšími jsou:

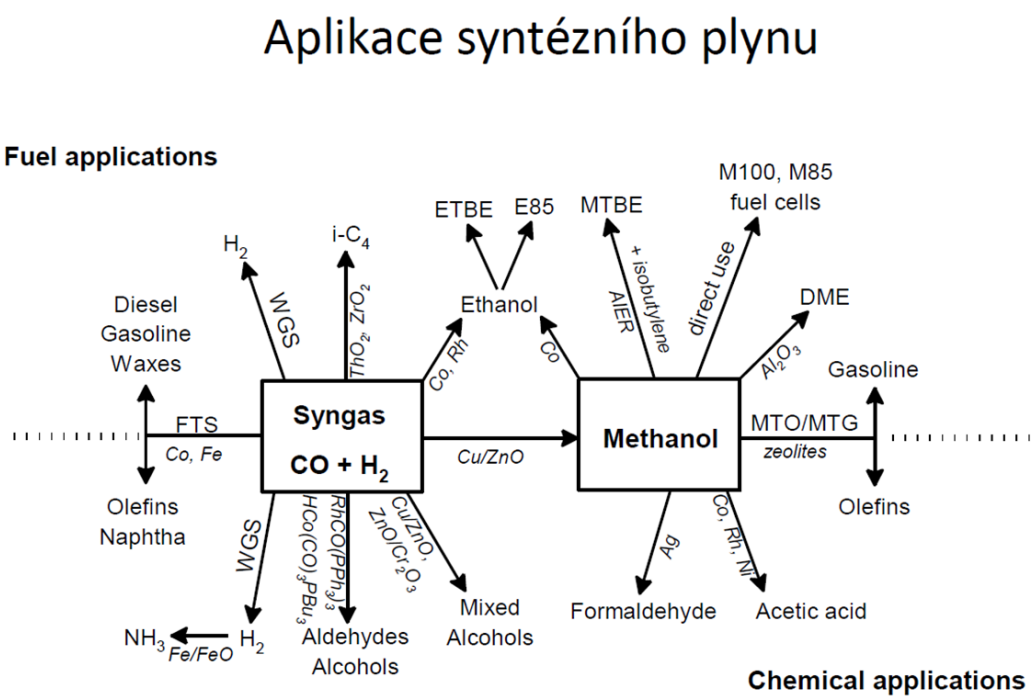
- pyrolýza hydrogenovaných rostlinných olejů,
- dehydratace bioetanolu získaného fermentačně ze škrobových nebo cukerných substrátů,
- pyrolýza produktů Fischerovy a Tropschovy syntézy vedené na výšemolekulární parafíny,
- katalytická transformace biometanolu.

V prvé technologii je klíčovou surovinou v tuzemsku pěstovaná řepka olejná. Řepka je po pšenici ozimé druhou nejpěstovanější plodinou, pěstuje se na cca 16 % celkové osevní plochy. Roční sklizeň olejnatého řepkového semene činí u nás průměrně 1,3 mil. tun. Při možném výtěžku 45-48 % oleje lze teoretickou dispozici řepkového oleje v ČR odhadovat na úrovni cca 600 tis. tun. Je možné pracovat s úvahou, že pro petrochemické využití na etylen by bylo možné uvolnit cca 100 tis. tun oleje. S tímto množstvím lze uvažovat pro následnou katalytickou hydrodeoxygenaci vedoucí k výtěžku asi 80 tis. tun lineárních uhlovodíků C14 až C18, při jejichž pyrolýze lze získat cca 40 tis. tun etylenu.

Již dnes se v některých oblastech světa s vysokou nadvýrobou škrobových plodin vyrábí kvasný etanol též pro účely jeho katalytické dehydratace kvasného lihu. Při použití vhodného katalyzátoru může probíhat dehydratace etanolu za nízkých teplot (200-300 °C). Dehydratace etanolu na etylen je endotermická reakce nultého řádu. U reakce je důležitá doba kontaktu. Při velmi nízkých kontaktních časech se etanol přednostně převádí na etylen. Zvyšující se kontaktní doba vede ke vzniku jiných druhů látek, jako jsou CO, CO_2, CH_4 a H_2. Jistou obtíží je tedy dosti komplikovaná separace polymeračně čistého etylenu z primárního produktu katalytické dehydratace. Lze zde ovšem uvážit možnost stávající „ropné“ etylenové jednotky, která je vybavena potřebnou separační a čisticí řadou. Pokud bychom tedy v kombinaci s předchozím postupem použili bioetanol, bylo by možné z typického lihovaru s kapacitou 80 tis. tun lihu/rok získat cca 45 tis. tun etylenu, který by se dále ve stávající etylenové jednotce vhodně spojil s proudem „ropného“ etylenu. Ekonomický efekt takovéhoto využití lihu je jednoznačně vyšší, než je jeho použití v motorových palivech.

Pro další rozvoj palivářského i petrochemického průmyslu je klíčový proces objevený Fischerem a Tropschem. Tato syntéza (FTS) byla původně navržena jako nepřímé zkapalňování uhlí. Principem je zplyňování především pevných uhlíkových substrátů pomocí kyslíku na syntézní plyn, který je dále na vhodných katalyzátorech transformován na uhlovodíky. Proces je dle volby katalyzátorů (na bázi kobaltu nebo železa), dle podmínek (nízkoteplotní a vysokoteplotní FTS) a reaktorového uspořádání (trubkové reaktory, fluidní, slurry) velmi flexibilní a lze ho nastavit na produkci výševroucích lineárních uhlovodíků, které na již dnes instalovaných etylenových jednotkách poskytují výtěžek etylenu na 40 % (srovnejme s dnes typickou hodnotou cca 30 % z ropných surovin).

Speciální roli v petrochemických, resp. organických syntézách může hrát metanol získaný z obnovitelných zdrojů jako biometanol. K němu vede cesta přes zplyňování odpadní biomasy (dřevní štěpka, rostlinné zbytky, odpadní oleje, recykláty v rámci cirkulární ekonomiky apod.) na syntézní plyn. Ten se již dnes známými postupy katalyticky transformuje na metanol. Zvláštní role metanolu bude dále růst v souvislosti s možností pro jeho výrobu použít namísto oxidu uhelnatého odpadní oxid uhličitý. Zde jen uveďme, že tato produkce je v řádech desítek milionů tun ročně a pro produkci komoditních olefinů by byla dostatečná. O metanolu je pak možno mluvit jako o univerzální surovině pro výrobu klíčových chemikálií, zeolitovou katalýzou též na olefiny. Nejlépe je to patrné z obrázku č. 14.



Olefiny jsou ústředními meziprodukty v chemickém hodnotovém řetězci. V současné době se vyrábějí v etylenových jednotkách vysoce účinným procesem. Je však energeticky náročný a je velkým zdrojem emisí CO2, zejména díky velkým objemům výroby. Rozvíjí se výroba nízkouhlíkových olefinů na bázi zemního plynu a CO_2. Suchým reformováním zemního plynu (CH_4 + CO_2) vzniká syntézní plyn (CO + H_2), který se pak jako meziprodukt přeměňuje na olefiny prostřednictvím dimethyletheru (DME). Selektivní aktivace metanu byla dlouho výzvou. Byl vyvinut první průmyslový katalyzátor obsahující dva nové materiály spinelového

typu na bázi niklu a kobaltu a k jeho komercializaci došlo v roce 2020. Kromě toho byla úspěšně ověřena koncepce katalytického systému pro přímou konverzi syntézního plynu na DME. Katalyzátory nové generace jsou uváděny na trh ve spolupráci se společností Linde.

Výroba aromátů z obnovitelných surovin

Produkci aromátů by bylo možné zajistit v našich podmínkách následujícími postupy:

- Separací a transformací aromátů z bio-olejů,
- přímou nebo nepřímou separací aromátů z produktů zpracování odpadních plastů a elastomerů,
- termokatalytickou cyklizací nízkomolekulárních uhlovodíků.

Pro české podmínky je možno především uvažovat s postupy separace aromátů z kapalného produktu pyrolýzy odpadních plastů. Aromatické struktury v polystyrenech, SBR elastomerech, relevantních polyesterech, epoxidech, polyuretanech, polykarbonátech zůstávají během pyrolýzy zachovány a lze je (nikoli zcela jednoduchým způsobem) získávat pro další využití. Kapalné produkty nízkoteplotní pyrolýzy polyolefinů lze naopak po rafinaci použít jako nástřik pro vysokoteplotní (etylenovou) pyrolýzu a získat základní monoaromáty jako významný vedlejší produkt shodně, jak je tomu v případě nástřiků na bázi ropných frakcí.

Obdobně lze aromáty po rafinačních úpravách a extrakci (kapalinové, destilační) získávat z bio-olejů, tedy z produktů pyrolýzy odpadní biomasy. Ta je vždy bohatá na lignin, který představuje surovinu převážně aromatického charakteru. Výroba benzenu, popř. fenolu je schůdná, nikoli nepodobná postupům, které jsou dnes realizovány při zpracování černouhelných dehtů (např. v a.s. DEZA).

9.3. Využití zeleného vodíku v petrochemii 7), 8)

Podle aktualizované Vodíkové strategie ČR i evropských předpisů má být obnovitelný a nízkouhlíkový vodík přednostně využíván v odvětvích, která nelze přímo elektrifikovat – tedy především v průmyslu (chemie, rafinérie, hutnictví) a v těžké dopravě. Směrnice RED III stanoví, že v roce 2030 musí 42 % vodíku spotřebovaného v průmyslu pocházet z obnovitelných zdrojů.
Můžeme uvést alespoň dvě technologie, o nichž se uvažuje, že budou v rámci transformace začleněny do petrochemické části rafinérsko-petrochemického komplexu.

- elektrolýza vody (viz strategie Orlen Unipetrol)
- produkce biovodíku parciální oxidací.

U elektrolýzy je nanejvýš nutné chemicky zhodnotit vznikající kyslík (produkovaný ve značném hmotnostním přebytku oproti vodíku). Kyslík z elektrolýzy tak může být použit pro řadu procesů, kde je jeho použití výhodnější oproti vzduchu. Zejména to platí o zplyňování, které je nutné realizovat s čistým kyslíkem (dnes frakcionací zkapalněného vzduchu, popř. jednotkami PSA nebo membránami).

Zplyňování biomasy procesem POX nebo s využitím bioplynu, kde je metan pro proces značně znečištěn sulfanem a oxidem uhličitým, vůči kterým je proces POX tolerantní, vede k produkci biovodíku. Spojení elektrolýzy a zplynění procesem POX tak může představovat komplexní integrovanou jednotku produkující vodík z vody a biomasy. Je zřejmé, že tato varianta ovšem vyžaduje propojení takovéhoto komplexu se zdrojem obnovitelné energie.
Další přímé vazby s petrochemií souvisí s technologiemi na využívání CO_2.

9.4 Recyklace plastových a dalších odpadů

Stěžejní součást strategie transformace je podrobně řešena Českou technologickou platformou Plasty a Svazem chemického průmyslu ČR.
Cílem je dosažení přeměny odpadních polymerů na produkty znovu využitelné v rámci chemického průmyslu.
Pyrolýza (nebo také termolýza, popř. termochemická recyklace) je proces chemické přeměny vyvolané působením tepla bez přístupu kyslíku, jejímž výsledkem jsou zpravidla menší molekuly (rozklad). Termochemické procesy mohou probíhat při různých podmínkách (teploty, doby zdržení, tlaky, přítomnost reaktivních plynů, kapalin a katalyzátorů). Pro základní dělení procesů se používá teplota (3 skupiny procesů) a přítomnost katalyzátoru:

- Nízkoteplotní (pod 400 °C)
- Středněteplotní (400–600 °C)
- Vysokoteplotní (>600 °C)
- Katalytická (s cíleně přidávaným katalyzátorem).

Katalyzátor pomáhá ke snížení tzv. aktivační energie. Zjednodušeně lze říct, že se jedná o jeden z „ovládacích prvků“ reakce.
Plynné produkty

- Hlavní složky: C1 – C4 uhlovodíky (nasycené i nenasycené), H_2, H_2O, HCl, CO, CO_2, N2, C4+ uhlovodíky

Využití: energetické, při dostatečné instalované kapacitě lze separovat jednotlivé složky (vysoká hodnota).
Kapalné produkty

- Hlavní složky: s teplotou varu do 550 °C, nasycené, nenasycené i molekuly obsahující heteroatomy, charakterizuje se pomocí skupinového složení a destilačního rozmezí, funkcí procesu a vstupní suroviny.
- Využití: zdroj uhlovodíků pro rafinérskou a petrochemickou výrobu.

Pevné produkty

- Hlavní složky: těžké podíly (>550 °C), častěji nenasycené molekuly až elementární uhlík, méně často nasycené molekuly, veškeré inertní komponenty, zbytky katalyzátorů, kovy…
- Využití: potenciální zdroj uhlíku (výroba sorbentů, jako aditivum ve stavebnictví), výroba sazí

Termochemická recyklace (pyrolýza) odpadních polymerů je tedy jedna z možností, jak realizovat chemickou recyklaci. Za určitých předpokladů lze při ní získat produkty, z nichž lze vyrobit opět plasty v tzv. virgin kvalitě.

9.5 Zelený amoniak 7), 8)

Bylo dosaženo technologické zralosti současné průmyslové technologie výroby čpavku (TRL 8-9), ale protože je to výroba vysoce energeticky náročná, produkuje i velké množství emisí CO_2. Alternativní nízkoemisní procesy jsou založeny na dodávce vodíku z elektrolýzy vody nebo pyrolýzou metanu. Stechiometrický požadavek na vodík pro amoniak je 177,5 kg / t. U obou alternativních variant procesu se kromě emisí souvisejících s energií zabrání tvorbě 1,2 tuny CO_2 na tunu amoniaku z metanu.
Při syntéze amoniaku z vodíku získaného vodní elektrolýzou, která nahrazuje parní reforming, není nutné čištění CO_2, ale čistý dusík musí být dodáván samostatně, protože v sekundárním reformátoru není ze vzduchu odstraněn kyslík. To obvykle vyžaduje zařízení na oddělování vzduchu jako další investici. Nevyrábí se však již pára, jako je tomu v případě procesu na bázi zemního plynu. Celková energetická potřeba procesu je 10,89 MWh / t NH_3 (39,2 GJ / t) a dominuje v ní elektrolýza vody, která představuje více než 80 % energetické potřeby. Neexistují žádné složky surovin z hlediska emisí CO_2, protože se nepoužívá žádné fosilní palivo. Vzhledem k tomu, že samotný amoniak neobsahuje žádný uhlík, nevznikají na konci životnosti produktu žádné emise CO_2. Emise tedy zcela souvisejí s elektřinou a jsou odvislé od použitého energetického mixu.
Specifické investiční náklady ve výši přes 1 800 EUR / t tvoří elektrolýza, separace vzduchu, čpavkové reaktory a další energetická zařízení, přičemž dominuje elektrolýza. Investiční náklady jsou v současné době 2,7krát vyšší než u běžného systému.

Je nutné ale upozornit na vyšší celkovou spotřebu energie (cca 39 GJ/t oproti cca 28–33 GJ/t u moderní konvenční výroby) a zejména na obrovskou potřebu elektřiny, takže bez dostatečných zdrojů levné bezemisní energie není takový proces ekonomicky udržitelný. Výroba amoniaku z obnovitelného vodíku zatím v Evropě existuje jen v demonstračním měřítku. Její rozvoj podpoří směrnice RED III, podle níž musí v roce 2030 pocházet 42 % vodíku spotřebovaného v průmyslu, tedy i při výrobě amoniaku, z obnovitelných zdrojů.

9.6 Elektrifikace chemického průmyslu 7)

Pro výrobu olefinů a aromatických látek chemický průmysl v současné době používá především primární benzin (tzv. naftu, angl. naphtha). Vedlejší produkty krakování jako např. metan, vodík a těžký olej byly dosud používány k pokrytí energetických požadavků procesu. V důsledku toho přímo vznikají emise CO_2.
Tomu se má v budoucnosti zabránit zavedením ohřevu elektřinou. Emisní faktor závisí na použitém energetickém mixu. Příkladem řešení je elektricky vyhřívaná krakovací jednotka. Demonstrační elektricky vyhřívaná krakovací pec BASF, SABIC a Linde je v provozu od dubna 2024 v Ludwigshafenu (viz kap. 14.6); podle Roadmap Chemie 2050 je však široké komerční uplatnění z technických, a hlavně ekonomických důvodů reálné až po roce 2045.

Výzkumné náměty pro český chemický výzkum:

Pro tuzemský výzkum bylo v CM SUSCHEM CZ doporučeno intenzivněji se věnovat těmto tématům:

- Záchyt a čištění vodíku + spolupráce v oblasti membránových separací malých molekul
- konverze a reverzní konverze syntézního plynu,
- syntéza metanolu ze zeleného vodíku a směsi CO/CO_2,
- Rozvoj průmyslové aplikace Fischerovy-Tropschovy syntézy včetně zpracování produktů na čistá paliva a petrochemikálie

Další výzkumné náměty:

- Dokončit vývoj procesů termického a termicko-katalytického rozkladu odpadních makromolekulárních látek
- Vývoj separačních technologií na zdrojích CO_2,
- výroba zeleného metanu metanizací CO_2,
- výroba ethanolu s využitím CO_2 (homologací metanolu),
- procesy zušlechtění pyrolýzních kapalin pod tlakem vodíku nebo bez využití vodíku,
- postupy zhodnocení pyrolýzních kapalin v rámci rafinérsko-petrochemického komplexu,
- výzkum zušlechtění a využití pyrolýzních zbytků.
- vývoj produkce biovodíku parciální oxidací

Zdroje:

1) *Vizevropského rafinérského průmyslu (FuelsEurope, Clean Fuels for All / Vision 2050)*

2) *Herink T.: Development trends of the Orlen Unipetrol Group, ICCT konference Mikulov 2022*

3) *CM SUSCHEM CZ 2020*

4) *Vörös F.: přednáška na Konferenci k aktuální problematice plastů Kralupy 10.6.2021*

5) *Lederer J.: Zpracování ropy a petrochemie, podkladová studie pro CM SUSCHEM CZ, 2019*

6) *Gál L.: Problematika CO_2, Konference Cirkulární ekonomika a recyklace plastů, Kralupy 9. 12. 2021*

7) *Roadmap Chemie 2050, Eine Studie von DECHEMA und Future Camp für den VCI.2019*

8) *Fütterer M. A. a kol.: Nuclear process heat application options: Highlights from the European GEMINI+ project https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111879*

10. Udržitelné zemědělství

Základním dokumentem EU v oblasti zemědělství a potravin byla strategie Z farmy na vidličku (Farm to Fork, 2020) 1), která je součástí Zelené dohody pro Evropu. Strategie je formálně stále platná, její legislativní naplňování se však výrazně zpomalilo:

- návrh nařízení o udržitelném používání přípravků na ochranu rostlin (SUR), který měl provést cíl snížit používání pesticidů o 50 %, Evropský parlament v listopadu 2023 zamítl a Komise ho v únoru 2024 stáhla,
- ohlášený rámcový zákon o udržitelných potravinových systémech ani rámec pro označování udržitelnosti potravin Komise dosud nepředložila.

Dne 19. 2. 2025 představila Komise novou Vizi pro zemědělství a potraviny (COM(2025) 75), která je dnes hlavním strategickým rámcem pro období 2025–2029. Vize klade důraz na:

- atraktivitu a předvídatelnost zemědělství a spravedlivé příjmy zemědělců,
- konkurenceschopnost a odolnost sektoru,
- ochranu půdy, vody, ovzduší a biodiverzity,
- živé venkovské oblasti.

Místo plošných redukčních cílů se soustředí na zjednodušení předpisů a na rovné podmínky vůči dovozu. EU má například posoudit, zda neuznávat limity reziduí u dovážených potravin pro pesticidy, které jsou v EU zakázány, a omezit vývoz v EU zakázaných pesticidů. Podle Komise přitom Vize cíle strategie Farm to Fork neruší.

10.1. Využití biologického oběhového hospodářství

Např. pokročilé biorafinerie, které vyrábějí bio-hnojiva, bílkovinná krmiva, bioenergii a biochemikálie, nabízejí příležitosti pro přechod na klimaticky neutrální hospodářství a vytváření nových pracovních míst v prvovýrobě. Zemědělci by se měli chopit příležitostí rozvojem výroby obnovitelné energie a investicemi do anaerobních vyhnívacích jednotek pro výrobu bioplynu ze zemědělského odpadu a zbytků, jako je hnůj. Farmy mají také potenciál produkovat bioplyn z jiných zdrojů odpadu a zbytků, např. z potravinářského a nápojového průmyslu, splašků, odpadních vod a komunálního odpadu. Zemědělské budovy a stodoly jsou často ideální pro umístění solárních panelů.

10.2. Omezení používání chemických pesticidů v zemědělství

Snížení jejich použití, které přispívá ke znečištění půdy, vody a ovzduší, ztrátě biologické rozmanitosti a může poškodit necílové rostliny, hmyz, ptáky, savce a obojživelníky. Strategie Farm to Fork (2020) předpokládala snížit do roku 2030 celkové používání a riziko chemických pesticidů a používání nebezpečnějších pesticidů o 50 %. Navrhované nařízení o udržitelném používání pesticidů (SUR), které mělo tento cíl provést, bylo po zamítnutí v Evropském parlamentu v únoru 2024 staženo (viz kap. 10.8). Strategie počítala s tím, že Komise posílí ustanovení o integrované ochraně před škůdci (IPM) a podpoří větší využívání bezpečných alternativních způsobů ochrany sklizně před škůdci a chorobami. IPM podpoří používání alternativních kontrolních technik, jako je střídání plodin a mechanické odstraňování plevele,

a bude jedním z hlavních nástrojů snižování používání chemických pesticidů. Komise rovněž usnadní uvádění pesticidů obsahujících biologicky aktivní látky na trh a posílí posuzování rizik pesticidů pro životní prostředí.

10.3. Racionálnější využívání živin.

Přebytek živin (zejména dusíku a fosforu) v životním prostředí, vyplývající z nadměrného využívání a skutečnosti, že ne všechny živiny používané v zemědělství jsou účinně absorbovány rostlinami, navíc je dalším významným zdrojem znečištění ovzduší, půdy a vody a dopadů na klima. Komise si stanovila cíl snížit ztráty živin alespoň o 50 % a zároveň zajistit, že nedojde ke zhoršení úrodnosti půdy. Do roku 2030 se tak má snížit používání hnojiv nejméně o 20 %. Toho má být dosaženo prosazováním příslušných právních předpisů v oblasti životního prostředí a klimatu, uplatněním vyváženého hnojení a udržitelným hospodařením s živinami a lepším hospodařením s dusíkem a fosforem v průběhu jejich životního cyklu. Komise společně s členskými státy vypracuje akční plán integrovaného řízení živin s cílem řešit znečištění živinami u zdroje a zvýšit udržitelnost odvětví živočišné výroby. Komise bude rovněž spolupracovat s členskými státy na rozšíření používání přesných technik hnojení a udržitelných zemědělských postupů, zejména v oblastech intenzivního chovu hospodářských zvířat a recyklace organického odpadu na obnovitelná hnojiva.

10.4. Snížení emisí skleníkových plynů. Transformace živočišné výroby jako významného zdroje emisí methanu

Zemědělství bylo podle strategie Farm to Fork (údaje za rok 2018) zodpovědné za 10,3 % emisí skleníkových plynů (CO_2, methan, oxid dusný) v EU a téměř 70 % z nich pochází ze živočišného sektoru. S cílem snížit dopad živočišné výroby na životní prostředí a klima je třeba podpořit pokračující přechod k podpoře nejudržitelnějších a uhlíkově nejúčinnějších metod živočišné výroby. Zemědělci by se měli chopit příležitostí ke snížení emisí metanu z hospodářských zvířat. Evropská komise plánuje usnadnění uvádění udržitelných a inovativních doplňkových látek do krmiv na trh. Prozkoumá pravidla EU s cílem snížit závislost na kritických krmných surovinách (např. sója pěstovaná na odlesněné půdě) podporou rostlinných bílkovin vypěstovaných v EU a také alternativních krmných surovin, jako je hmyz, mořské krmivo (např. řasy) a vedlejší produkty biohospodářství (např. rybí odpad).
Schéma vazeb jednotlivých opatření v rámci strategie Farm to Fork ukazuje obrázek č. 15.

Extrémní zvyšování cen energií, hnojiv, PHM, krmných směsí a agrochemikálií, dopady války na Ukrajině, klimatické změny a další negativní jevy výrazně zvyšují strategický význam zemědělsko-potravinářského sektoru pro udržitelný vývoj.
Významnou roli musí sehrát i chemický průmysl jako tradiční dodavatel hnojiv, agrochemikálií, uživatel produktů ze zpracování biomasy. Navíc se může opřít o poměrně rozvinutou základnu VaV. Na druhé straně se musí vyrovnat s rostoucím nedostatkem kvalitních fosforečných surovin. Chemický výzkum řeší i otázku ochrany rostlin, revitalizace zemědělské půdy, vodní hospodářství a efektivní využívání biomasy.

Oběhová biologická ekonomika má pro zemědělce významný potenciál. Například pokročilé biorafinérie, které vyrábějí biohnojiva, bílkovinná krmiva, bioenergii a biochemikálie, nabízejí vytváření nových pracovních míst v prvovýrobě. Před zemědělci stojí významné výzvy ve snížení emisí metanu z hospodářských zvířat, v rozvoji výroby obnovitelné energie a v investicích do anaerobních vyhnívacích jednotek pro výrobu bioplynu ze zemědělského odpadu a zbytků, jako je hnůj. Farmy mají také potenciál produkovat bioplyn z jiných zdrojů odpadu a zbytků, např. z potravinářského a nápojového průmyslu, splašků, odpadních vod a komunálního odpadu.

Hnacími silami při realizaci přechodu k udržitelnému zemědělství, zdravým a inkluzivním potravinářským systémům jsou výzkum, inovace, a investice. V rámci programu Horizont 2020 vyhlásila Komise v roce 2020 výzvu Green Deal v celkové výši přibližně 1 miliardy EUR. V rámci Horizontu Evropa (2021–2027) je na klastr 6 „Potraviny, biohospodářství, přírodní zdroje, zemědělství a životní prostředí“ vyčleněno téměř 9 miliard EUR na výzkum a inovace v oblasti potravin, biohospodářství, přírodních zdrojů, zemědělství, rybolovu, akvakultury a životního prostředí, jakož i využívání digitálních technologií a přírodních řešení pro zemědělsko-potravinářské účely. V moderním českém zemědělství se využívá automatizovaná technika, včetně dronů. Dokáží monitorovat území, zjišťovat aktuální stav polí, řídit výsev nebo sklizeň, vyhledávat škůdce, a dokonce k nim dopravit predátora. Dálková vosa sklízí ovoce, robotický roj pečuje o stromky.

Za klíčové oblasti výzkumu považuje EU mikrobiom, potraviny z oceánů, městské potravinové systémy jakož i zvyšování dostupnosti a zdrojů alternativních proteinů, jako jsou rostlinné, mikrobiální a mořské proteiny a náhražky masa. Další projekty se mají zaměřit na vývoj řešení pro obnovu zdraví a funkcí půdy.

Základním dokumentem v ČR je Strategický plán Společné zemědělské politiky (SZP) pro období 2023–2027 2), schválený Evropskou komisí v listopadu 2022, který respektuje reálnou situaci v našem zemědělství a mění jej směrem k lepší péči o půdu a krajinu, ke zdravější vodě a zdravějším potravinám. Byla schválena míra kofinancování Programu rozvoje venkova v nové SZP. Komise v červenci 2025 navrhla pro období po roce 2027 začlenit SZP do jednotných národních a regionálních partnerských plánů v rámci nového víceletého finančního rámce 2028–2034. Podpora by měla být srovnatelná s dalšími státy EU a umožnit českým zemědělcům zůstat na celoevropské úrovni konkurenceschopnými.
Podle CM SUSCHEM CZ **3)** předpokládaný vývoj ve využívání výrobních technologií pro výrobu minerálních hnojiv bude v budoucnu nutné směřovat k následujícím cílům:

- Snižování znečišťování ovzduší, vody a půdy (legislativa EU)
- Zvyšování úrovně bezpečnosti provozování (legislativa EU)
- Využívání alternativních surovinových a energetických zdrojů (legislativa EU – „Cirkulární ekonomika“)
- Efektivnější využívání surovinových a energetických zdrojů (tlak na ceny surovin i produktů)
- Zavádění nových produktů (tlak na inovace s cílem zajistit vyšší komfort pro konečného uživatele).

10.5. Výroba syntetických minerálních hnojiv 4)

Zabezpečení dostatečného množství potravin pro existující a budoucí populaci v našem regionu je jedním z klíčových cílů z hlediska udržitelnosti životní úrovně, hospodářského růstu, potravinové soběstačnosti a také národní bezpečnosti. Poptávka po potravinách má rostoucí charakter, a to nejen díky zvyšování lokální spotřeby, ale i kvůli exportu potravin do jiných, rychle se rozvíjejících částí světa. Výměra zemědělské půdy v regionu nemá potenciál dalšího růstu. Naopak, dochází k relativně dramatickému snižování výměry zemědělské půdy využíváním na jiné než zemědělské aktivity, anebo k pěstování plodin na jiné než potravinářské účely. Příkladem je výstavba průmyslových zón v okolí měst nebo produkce biopaliv ze zemědělských produktů. Z těchto důvodů není možné zabezpečit dostatek potravin extenzivním způsobem hospodaření na zemědělské půdě a je nevyhnutelné zvyšovat hektarové výnosy zemědělských plodin. Jednou ze základních podmínek zvyšování výnosů zemědělské produkce je zabezpečení dostatečného množství živin pro potřeby výživy jednotlivých zemědělských plodin, a to bez negativního dopadu na kvalitu půdy, vody, ovzduší a také zdravotního stavu obyvatel. Důležité je také zaměření na snižování ztráty živin do okolního prostředí, mimo jiné s ohledem na kvalitu ovzduší a vody. Účinným nástrojem ke snižování ztrát živin je zaměření se mimo jiné na nejlepší způsoby hnojení, šíření podpůrných technologií a služeb či podporu vyspělých hnojiv zaměřených na určité plodiny, to vše spojené s metodami chytrého zemědělství, novými nástroji a daty v reálném čase.

Největším výrobcem hnojiv v ČR je Lovochemie a.s. V současné době je hlavním zaměřením Lovochemie, a.s. výroba a prodej dusíkatých a vícesložkových hnojiv v pevné i kapalné formě. ČR v minulosti ztratila vlastní výrobu fosforečných hnojiv zejména ztrátou dodavatelů vhodných fosfátů. Objemově omezená výroba N–P–(K) hnojiv v ČR využívá pouze hotové fosforečné produkty dovezených ze zahraničí. Fosfor je ve všeobecnosti považovaný za

nedostatkovou surovinu a již dnes se o něm hovoří jako o „živině budoucnosti“, která by mohla při jejím nedostatku limitovat v budoucnu výkonnost zemědělské produkce. Již řadu let se vyvíjejí technologie zajišťující fosforečné suroviny z druhotných zdrojů. Zdrojem fosforu jsou v tomto případě čistírny odpadních vod nebo bioplynové stanice. Aktuálně je potřebné vyvinout nové postupy získávání vhodné formy fosforu, a to bez kontaminace nežádoucími biologicky aktivními látkami a těžkými kovy. Zároveň je potřebné docílit takové výše výrobních nákladů, které mohou konkurovat konvenčním zdrojům. Fosfor získaný alternativními technologiemi, které vyhovují současné legislativě EU, může pokrýt jen malou část potřeby fosforu v zemědělství. Fosfátová hornina i fosfor jsou na seznamu kritických surovin EU. Hlavním zdrojem fosforu pro výrobu minerálních hnojiv v EU tak zůstává dovoz.

Vápník je důležitou živinou, která současně plní řadu agronomických a ekologických funkcí. Pravidelné vápnění pozitivně ovlivňuje chemické, fyzikálně-chemické i biologické procesy v půdě. Jde zejména o úpravu pH, eliminaci působení toxických iontů, vytváření koloidů a udržování půdní struktury. Vhodné pH pozitivně ovlivňuje aktivitu mikroorganizmů, mineralizaci i tvorbu kvalitního humusu. Vyšší hodnoty pH omezují přijatelnost těžkých kovů a jejich průnik do potravinového řetězce. Zdroje těchto vápenatých, případně hořečnatých surovin jsou v našem regionu dostatečné, a to i v horizontu do roku 2030. Kvalita těchto surovin je ale různá. Zde se otevírá prostor pro podporu výzkumu a vývoje nových technologií, které umožní zpracovat i takto organickými látkami znečištěné a jinak z pohledu anorganického velmi kvalitní suroviny.

U dusíkatých hnojiv existují dva zásadní problémy. Prvním je prudký nárůst jejich cen na trhu v důsledku raketového růstu cen energií. Od 1. 1. 2026 se na dovoz dusíkatých hnojiv do EU vztahuje definitivní fáze mechanismu CBAM a že EU zavedla cla na hnojiva z Ruska a Běloruska (2025) Druhým problémem je přehnojování průmyslovými dusíkatými hnojivy. Oxid dusný, který se tak do atmosféry uvolňuje, je navíc skleníkovým plynem zhruba desetkrát účinnějším než metan a téměř třistakrát (GWP_{100} = 273) silnějším než CO_2. Míra aplikace dusíkatých hnojiv je na podobné úrovni jako v 80. letech na rozdíl od hnojení fosforem (protože fosfor je drahý a vydrží v půdě docela dlouho, zatímco dusičnany se velmi rychle vypláchnou).

Ke snížení spotřeby průmyslových hnojiv a environmentální zátěže, včetně eutrofizace vod, mohou sloužit hnojiva s řízeným uvolňováním živin.

Jako příklad řešeného projektu v ČR jsou Nové formulace agrochemikálií na bázi polyhydroxybutyrátu (PHB) společností Nafigate a rozvíjené v rámci NCK PolyEnvi 2K 5).
Nové formulace hnojiv a pesticidů s prodlouženým účinkem jsou založeny na nosiči a povlaku z PHB. Granule nebo pelety s PHB tvoří matrici pro účinné agrochemikálie, které se z ní uvolňují do půdy postupně a rovnoměrně v čase. Díky nové formulaci jsou hnojiva a pesticidy zadržovány v půdě delší dobu, což umožní snížení celkového množství agrochemikálií potřebných k výživě plodin a ochraně rostlin. Užívání hnojiv vede k jejich splachování z polí do vodních ekosystémů a nadměrnému růstu řas a sinic. Hnojiva s prodlouženým účinkem zajistí dostatek živin pro rostliny, zatímco se sníží kontaminace okolních vod. Aplikace pesticidů postřikem často vyžaduje použití vysokých dávek, které jsou pro rostliny toxické.

Nové formulace jsou šetrnější nejen k životnímu prostředí, ale i k samotné plodině. Díky prodlouženému efektu se sníží četnost dávek a forma granulí či tablet usnadní manipulaci.
Polyhydroxybutyrát patřící do skupiny polyhydroxyalkanoátů je biodegradabilní a biokompatibilní přírodní polymer. To znamená, že se rozkládá v přírodních podmínkách, aniž by docházelo k uvolňování toxických látek. V půdě se degraduje za působení mikroorganismů a je zcela neškodný stejně jako případné meziprodukty rozkladných procesů. Bakterie postupně v půdě zpracují PHB na oxid uhličitý a vodu. Rozklad PHB v půdě prostřednictvím mikroorganismů je také mechanismem jeho účinku. Matrice (granule nebo peleta) z PHB, která nese pesticid nebo hnojivo, se v půdě pomalu odbourává. Jak bakterie narušují strukturu polymeru PHB, dochází k uvolňování agrochemikálie.
Již byly testovány formulace na bázi PHB vyvinuté pro herbicid metribuzin, fungicid tebukonazol a hnojiva močovinu a dusičnan amonný. Pelety a granule jsou často doplněné o výplň z přírodního materiálu jako je rašelina, dřevo nebo jíl, které urychlují degradaci. Typ výplně, tvar a velikost matrice a poměr jednotlivých složek určují, jak rychle se bude chemikálie z matrice uvolňovat – zda několik týdnů nebo až několik měsíců. Lze tak připravit formulaci „na míru“ konkrétním potřebám. Jednotlivé formulace byly testovány v laboratoři v půdních mikroekosystémech.

K nasazení těchto řešení do praxe je třeba vyřešit několik důležitých problémů:

- Kvalita, cena a dostupnost PHB – technologie výroby PHB ovlivňuje jeho finální vlastnosti v několika procesních krocích. Zejména použitá metoda extrakce řídí čistotu a molekulovou hmotnost výstupního polymeru. Tyto vlastnosti jsou klíčové pro jeho další použití a vhodnost pro návazné aplikace. PHB pro coating hnojiv nemusí dosahovat čistoty potřebné třeba pro plastikářské nebo medicínské nebo kosmetické aplikace. Jeho molekulová hmotnost však musí vyhovovat požadavkům na roztoky s filmotvornou schopností a dostačujícími mechanickými a bariérovými vlastnostmi finálního povlaku.
- Rozpouštědlový systém pro coating PHB je klíčový z pohledu dopadu technologie výroby takových hnojiv na životní prostředí. Protože za normálních podmínek je pravým rozpouštědlem PHB pouze chloroform a některá další chlorovaná rozpouštědla, jejichž použití je z ekologického důvodu nevhodné, je třeba hledat systém ekologičtějších rozpouštědel fungujících za jiných podmínek a tyto aplikovat i při procesu nanášení coatingu.
- Vlastní technologie coatingu PHB na pelety s účinnými agrochemikáliemi je komplikovaná v tom, že agrochemikálie jsou termicky nestabilní nad teplotami tavení PHB. Nelze proto použít taveninu ani tepelné sintrování prášku PHB. V případě použití rozpouštědel je třeba dořešit regeneraci rozpouštědla, otestovat jeho stabilitu a samozřejmě reprodukovatelnost vlastností produktu.
- Je nutná optimalizace kinetiky uvolňování agrochemikálií těchto produktů na míru potřeb dané vegetace a testování ve vegetačních a polních testech tak, aby se prokázal pozitivní dopad na kvalitu a výnos pěstované plodiny

10.6. Organická hnojiva

Rostoucí tlak na snížení používání chemických hnojiv znamená, že organická hnojiva budou ještě více využívána. Jedním z cílů EU je dosáhnout podílu 25 procent zemědělsky využívaných ploch obhospodařovaných v režimu ekologického zemědělství. Snižování počtu chovaných hospodářských zvířat je proto podle zemědělců výrazně problematické.

Organické bio-hnojivo je vyráběno smícháním stájových odpadů z chovu skotu, prasat a rostlinné výroby, následně anaerobně fermentováno v bioplynových stanicích, poté usušeno a slisováno do granulí. Při procesu sušení je zbaveno klíčivých semen plevelů a choroboplodných zárodků. Na rozdíl od klasického hnoje je možné fermentovaná granulovaná hnojiva používat nejen na podzim, ale i na jaře a během celého vegetačního období. Další známé biohnojivo je založeno na dusík fixujících bakteriích, jako jsou Rhizobium nebo sinice (Cyanobacteria). Používají se i různé biostimulátory.

Vysoký účinek pro úrodnost půdy má obohacení humusem a stabilizaci jejího pH. Vysoký obsah živin je vázán na organickou hmotu a nedochází k ztrátě živin vyplavováním.

U hnojení organickými hnojivy se nedodržují technologické postupy, selský rozum a hospodaření. Často je problém skladování, kdy dochází k obrovským ztrátám ve formě všech tří plynů (oxidu uhličitého, metanu i oxidu dusného). Hnůj se má zaorat do několika hodin, ale to se často neděje. Hnůj se často nechá ležet, než za dva tři dny dojede traktor. Podstatná část dusíku a uhlíku tak unikne do vzduchu, protože hnůj není zapravený do půdy.

Hospodářská zvířata mají v zemědělském systému zcela zásadní úlohu, a tou je výroba organických hnojiv, jako je hnůj, kejda a podobně. Tím, že se snížily stavy hospodářských zvířat, tak klesla i produkce organických hnojiv na polovinu, ale do půdy se jich dostává ještě méně, protože se část zpracovává v bioplynových jednotkách. Pro uchování půdy v dobrém stavu a kondici je jí třeba živiny vracet do půdy. Nedostatek hnojiv tak ještě více přispívá k další degradaci půd.
Za řádově větší problém než metanové emise považujeme právě nedostatek organické hmoty v půdě, tento problém souvisí s redukcí živočišné výroby.

10.7. Problém emisí metanu

Metan v atmosféře má až 84x větší oteplovací efekt za období asi dvaceti let než nejznámější skleníkový plyn na světě, tedy oxid uhličitý.
Zdroji metanových emisí jsou fosilní paliva, odpad a zemědělství. Celosvětově zhruba jednu třetinu emisí metanu vyprodukovaných lidskou aktivitou má na svědomí chov dobytka. Podle dat EU je se zemědělstvím spojeno 53 % emisí metanu, za které může lidská činnost (za dalších 26 % může odpad a za 19 % energetika; údaje strategie EU pro metan z roku 2020).

Jeden z přídavků do krmiva – přípravek Bovaer (3-NOP, DSM-Firmenich), který má omezit u krav tvorbu emisí metanu, byl v listopadu 2021 kladně posouzen Evropským úřadem pro bezpečnost potravin (EFSA) a v roce 2022 povolen v EU. Dosavadní proces se týká krav

chovaných na mléko, přičemž EU je druhý největší producent mléka na světě. Stejný přípravek už byl schválen, a to i pro skot na maso v Brazílii, která je v produkci hovězího masa na první příčce. Přípravek Bovaer může emise snížit o 30 %, uvádí jeho výrobce.

Emise metanu by mohlo snížit i lepší krmení hospodářských zvířat kvalitními a dobře stravitelnými jetelo-travními směsmi nebo správným skladováním hnoje a jeho používání.
Strategie EU Farm to Fork nicméně o zemědělci zmiňovaném snižování počtu hospodářských zvířat přímo nemluví. Zdůrazňuje naopak nutnost snížit podíl chemických hnojiv a antimikrobiálních látek, což jsou například antibiotika používaná k léčbě zvířat.

10.8. Přípravky na ošetření rostlin – pesticidy

Evropská komise v rámci své strategie Z farmy na vidličku slíbila snížit do roku 2030 používání pesticidů na polovinu, nicméně návrh nařízení SUR, který jej měl provést, byl po zamítnutí v Evropském parlamentu (listopad 2023) v únoru 2024 stažen a dnes není v EU žádný závazný cíl. V ČR platí aktualizovaný Národní akční plán k bezpečnému používání pesticidů pro období 2025–2029. Tento domácí plán se zaměřuje na dobrovolnou ochranu vodních zdrojů, zdraví lidí a půdy, nikoliv na plošné administrativní škrty v chemii.

Přípravků na ošetření rostlin, jak se oficiálně nazývají pesticidy, se v Česku ročně prodá za více než sedm miliard korun. Patří tam herbicidy – na ochranu proti plevelům, fungicidy – proti houbovým patogenům a plísním a insekticidy nebo zoocidy proti živočišným škůdcům. Dají se rozdělit na chemické (syntetické) přípravky a na biologické přípravky založené na mikroorganismech, přírodních látkách nebo feromonech.

Trh si dělí asi osm velkých nadnárodních výrobců, největší jsou švýcarská (čínská) Syngenta, německé společnosti Bayer (od roku 2018 vlastník americké firmy Monsanto) a BASF a americká Corteva. Ta v sedmdesátých letech minulého století objevila herbicid glyfosát, o jehož další používání už byl několikrát sveden boj i na „půdě“ Evropské unie; v listopadu 2023 bylo schválení glyfosátu v EU prodlouženo do roku 2033. Česko zakázalo používání glyfosátu od začátku roku 2019 na předsklizňovou aplikaci u plodin pro potravinářské účely, tedy primárně na obiloviny a veškerou řepku.
Až 95 procent pesticidů se do tuzemska dováží, místním výrobcem podle Výzkumného ústavu rostlinné výroby je pouze Lučební závody Draslovka a.s. Kolín. Malý výrobce nemá prostředky na náklady spojené s výrobou registrovaných pesticidů. Ty se pohybují v desítkách milionů za jednu účinnou látku – od vývoje po zavedení do praxe.
Významným výrobcem surovin pro agrochemikálie v ČR je BorsodChem MCHZ Ostrava, který vyrábí např. ethylcyklohexylamin – je hlavní surovinou pro syntézu herbicidu cykloát (cycloate). Ethylcyklohexylamin přispívá ke zvýšení úrody např. cukrové řepy nebo špenátu, neboť se hojně používá k hubení plevele a trav. Dalším jejich významným výrobkem je diethyl oxalát – jedna ze surovin pro výrobu strobilurinového fungicidu trifloxystrobinu, který je účinnou složkou přípravku Flint. Flint se používá k ochraně rostlin proti houbovému

onemocnění ovocných dřevin, které se projevuje bílými a zdánlivě moučnatými skvrnami na různých částech těl rostlin (květy, plody, listy atd.).

Vývoj pesticidů se v poslední době zpomalil, konkurují jim geneticky modifikované organismy. Regulace Evropské unie týkající se pesticidů postupně snižuje manévrovací prostor velkým výrobcům a zhoršuje jim hospodaření. Ti proto raději než do vývoje nových pesticidů vkládají peníze do výzkumu a vývoje geneticky modifikovaných organismů. Dalším trendem je příklon k biologickým přípravkům na ochranu rostlin, nicméně spotřeba pesticidů se v nejbližších letech razantně snižovat nebude, zejména u komodit ekonomicky atraktivních jako pšenice, kukuřice, cukrovka, nebo řepka.

Největší chemický koncern na světě, německá společnost BASF, dosáhla v agrobyznysu v Česku v roce 2020 podle výroční zprávy tržeb 915 milionů korun. Agrární divize BASF nabízí na českém trhu portfolio, které zahrnuje kromě pesticidů také přípravky pro ekologické zemědělství, mořidla osiv a osiva jako taková. Do značné míry ale závisejí na počasí v dané sezóně a na plodinové skladbě v rámci daného pěstebního roku.

Kromě čtyř světových výrobců patří k velkým hráčům na tuzemském trhu rovněž společnosti Adama a FMC Agro Česká republika. FMC Agro, patřící do americké skupiny FMC Corporation, vykázalo za rok 2020 tržby 514 milionů. Velcí dodavatelé na tuzemský trh jsou sdruženi v asociaci CropLife Česká republika. Ta se prezentuje jako organizace představující „udržitelná řešení v ochraně rostlin“ a jako svůj hlavní předmět činnosti uvádí „koordinovaný postup a ochranu zájmů členů sdružení ve vztahu k orgánům a institucím státní správy a samosprávy v ČR“. Jde o zájmové sdružení, které je členem evropské organizace CropLife Europe se sídlem v Bruselu.

Lobbing je pro výrobce pesticidů důležitý, protože v posledních letech čelí rostoucí regulaci ze strany Evropské unie. Ta tlačí na omezení používání pesticidních přípravků obecně, ale zároveň přibývají na seznamu zakázaných pesticidů další a další přípravky s tím, jak jde vývoj dopředu a prokazují se jejich negativní účinky – ať už na lidské zdraví nebo na životní prostředí. V následujících letech lze očekávat, že bude docházet k úbytku dalších účinných látek, a tak i přípravků, které se v zemědělství používají. Podobně je na tom výrobce Corteva, kdy EU neobnovila registraci přípravku chlorpyrifos a firma jej v roce 2020 přestala vyrábět. Chlorpyrifos-methyl byl nejúčinnějším řešením proti kněžici mramorované (ploštice původem z Asie), která se Evropou rychle šíří. Zemědělci tím přišli o klíčový nástroj, jak svou úrodu ochránit. Podle expertů, především hydrologů, je ale problém, že i když je nějaký pesticid zakázán, neznamená to, že je od něj životní prostředí vyčištěno. Pesticidy či jejich metabolity (produkty rozkladu účinné látky) se totiž ve vodě či v půdě objevují i desítky let poté, co jsou zakázané. Výrobci ale zároveň hledají cesty, kde mizející byznys vykrýt. Jednou z možností, jak chemické pesticidy nahradit, jsou biopřípravky. Jedná se o řešení založená na přírodních mechanismech, jako jsou mikroorganismy, rostlinné extrakty nebo například feromony. V nabídce již je řada nových prostředků především pro ochranu ovoce a zeleniny. Vzhledem k jejich obecně nižší účinnosti se zatím jedná více o společenskou poptávku.

Změna klimatu přináší nové hrozby pro zdraví rostlin. Výzva udržitelnosti vyžaduje opatření k lepší ochraně rostlin před nově se objevujícími škůdci a chorobami a inovace zejména

v prostředcích na ochranu rostlin. Nové inovativní techniky, včetně biotechnologie a vývoje biologických produktů, mohou hrát roli při zvyšování udržitelnosti za předpokladu, že jsou bezpečné pro spotřebitele a životní prostředí a zároveň jsou přínosem pro společnost jako celek. Mohou také urychlit proces snižování závislosti na pesticidech. Udržitelné potravinové systémy také spoléhají na bezpečnost semen a jejich rozmanitost. Zemědělci potřebují mít přístup k řadě kvalitních semen pro odrůdy rostlin přizpůsobené tlakům změny klimatu.

Spotřeba přípravků na ochranu rostlin v ČR dlouhodobě klesá. Podle Eurostatu se prodej pesticidů v Česku v letech 2011–2024 snížil o 44 %, což je největší pokles ze všech 21 zemí EU se srovnatelnými daty. V celé EU klesl prodej za stejné období o 12 %, na přibližně 316 tis. t v roce 2024; po dvou letech poklesu však v roce 2024 meziročně opět vzrostl o 8 %. K poklesu spotřeby v ČR přispěly zejména:

- restrikce ze strany EU, především zákaz venkovního používání tří neonikotinoidů od roku 2018 (spojovaných s negativními dopady na opylovače) a postupné neobnovování schválení dalších účinných látek,
- národní zákaz používání glyfosátu k urychlení dozrávání a vysušování obilovin a řepky platný od roku 2019.

Například již v roce 2018 klesla celková spotřeba přípravků meziročně o 9 % a spotřeba glyfosátu o 25 %.

V povrchových vodách se nacházejí pesticidy v 95 % objektů, v podzemních vodách v 60 % a z toho ve čtyřiceti procentech případů nadlimitně. V podzemních vodách se objevují i rezidua pesticidů, které se dnes už nepoužívají, protože se prakticky nerozkládají, ale objevují se i ty moderní. Například metazachlor, herbicid používaný do řepky a obilí.
Zpráva MŽP uvádí, že v roce 2019 bylo v povrchových vodách nalezeno celkem 161 pesticidů a jejich metabolitů, z toho 38 látek bylo nalezeno ve více než pěti procentech vzorků. Nejčastěji nacházenými byly metabolity herbicidů používaných pro ošetření řepky (v současnosti povolené: metazachlor, dimethachlor, pethoxamid, nebo již zakázané: alachlor, acetochlor), kukuřice (povolené: metolachlor, terbuthylazin, pethoxamid, a zakázané: atrazin, acetochlor), řepy (chloridazon), popřípadě totální herbicid glyfosát a jeho metabolit AMPA.

Biopesticidy dosud tvoří jen jednotky procent trhu přípravků na ochranu rostlin, přičemž chemické pesticidy jsou významným ekologickým polutantem.
Biopesticidy spadají do hlavních kategorií:

- transgenní rostliny, biochemické a mikrobiální.

Transgenní rostliny se díky genovému vybavení samy chrání před škůdci, z mikrobiálních je to např. Bacillus thuringiensis, který produkuje protein, který zabíjí různý hmyz. Benefity biopesticidů jsou pozoruhodné: jsou v podstatě stejně účinné jako chemické, zejména pro ovoce a zeleninu, jsou méně škodlivé, působí specificky, často i v malých množstvích a jsou rozložitelné.

- Bio-insekticidy, bio-fungicidy a bio-nematicidy (proti parazitickým červům) jsou rostoucím artiklem a je jich dostupných již asi 700 druhů. Globální trh biopesticidů byl v roce 2017 asi 3,2 miliardy USD a vzhledem ke snadnější jejich registraci jde o rychle rostoucí trh. **6)**

Přenos této strategie na národní úrovně by měl vycházet ze specifik jednotlivých zemí. Snížit o stejné procento používání přípravků na ochranu rostlin a jejich účinných látek v ČR jako ve Francii, Německu či Nizozemsku, kde je hektarové zatížení zemědělské půdy nepoměrně větší, by bylo pro zemědělce likvidační.

Zabezpečení potravinové soběstačnosti, v posledních letech radikálně ovlivněné nárůstem cen energií, hnojiv a dalších materiálů, dopady války na Ukrajině, pokračujícím růstem populace ve světě a dopady klimatických změn, se stává jedním ze základních pilířů strategie udržitelnosti.

Evropská komise v souvislosti s ruskou invazí na Ukrajinu schválila v roce 2022 ČR program státní podpory primárních zemědělských výrobců v objemu 20,2 milionu eur, tedy 500 milionů korun. Program je v souladu s dočasným krizovým rámcem státní podpory, který Komise přijala 23. března 2022. Pomoc je určena malým a středním podnikům působícím v zemědělské prvovýrobě, které ovlivnil nárůst cen elektřiny, krmiv a pohonných hmot kvůli současné geopolitické krizi související se sankcemi. Na druhé straně roste nebezpečí nedostatku potravin zejména v Africe a Asii, extrémně zvyšuje jejich ceny i v Evropě a spolu s rostoucím nedostatkem vody a prohlubujícími se dopady klimatických změn je vážným rizikem budoucího vývoje, které není dostatečně zohledněno v opatřeních EU.

V CM SUSCHEM CZ jsou definovány následující hlavní směry budoucího vývoje:

- změna struktury zemědělských plodin (snížení požadavku na dusíkatá hnojiva)
- zvýšení podílu geneticky upravovaných plodin (snížení požadavku na pesticidy)
- vývoj chemikálií pro lepší zadržování vody v krajině
- vývoj chytrých hnojiv s malým dopadem na životní prostředí
- vývoj vyspělých hnojiv zaměřených na určité plodiny
- výzkum zaměřený na nechemické způsoby ochrany rostlin

Hlavní výzvy pro český chemický VaV a inovativní investice:

- Vývoj biopesticidů nové generace a bio agrochemikálií k ochraně zemědělských plodin
- Komercionalizace hnojiv s řízeným uvolňováním živin
- Vývoj biohnojiv (dusík fixující bakterie, jako jsou Rhizobium a sinice – Cyanobacteria, a půdní biostimulanty). Od užití bio-hnojiv si slibujeme snížení environmentální zátěže, zejména vodní eutrofizace
- změna struktury zemědělských plodin (snížení požadavku na dusíkatá hnojiva)
- vývoj chemikálií pro lepší zadržování vody v krajině
- vývoj chytrých hnojiv s malým dopadem na životní prostředí
- vývoj vyspělých hnojiv zaměřených na určité plodiny
- výzkum zaměřený na nechemické způsoby ochrany rostlin a na šlechtění odolných odrůd, včetně geneticky upravovaných plodin a plodin získaných novými genomickými technikami (NGT), které mohou snížit potřebu pesticidů. Nové nařízení EU o rostlinách získaných NGT schválila Rada v dubnu 2026 a Evropský parlament v červnu 2026.

Zdroje:

1) *Strategie EU Farm to Fork COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, COM (2020) 381 final Brussels, 20.5.2020*
2) *Strategický plán Společné zemědělské politiky pro období 2023–2027, MZe (schválen EK 2022)*
3) *CM SUSCHEM CZ 2020*
4) *Ulbricht P.: Výroba minerálních hnojiv, podkladová studie pro CM SUSCHEM CZ, 2020*
5) *Mynářová L.: Nové formulace agrochemikálií na bázi PHB, příspěvek pro SVA, Nafigate 2022*
6) *Kumar S.: Biopesticides: A Need for Food and Environmental Safety. Biofertil Biopestici 2012, 3:4DOI: 10.4172/2155-6202.1000e107*

11. Jaderná energetika

Jaderná energetika je jedním ze základních pilířů energetické politiky ČR. V taxonomii EU byla zařazena mezi environmentálně udržitelné přechodné činnosti. V roce 2025 představovala přibližně 42 % hrubé výroby elektřiny v ČR. Podle Vnitrostátního plánu ČR v oblasti energetiky a klimatu, který vláda schválila 19. 12. 2024, má její podíl do roku 2030 činit zhruba 44 % a po dostavbě nových bloků vzrůst do roku 2040 až na 68 %. Uhlí má být z výroby elektřiny a tepla vyřazeno do roku 2033. Platná Státní energetická koncepce z roku 2015 malé modulární reaktory nezmiňuje. Jejich zapojení, včetně podpory vývoje, proto považujeme za jedno z nových důležitých témat připravované aktualizace koncepce. Český chemický VaV se již dlouhodobě v této oblasti angažuje.

Hlavní výzvy pro českou jadernou energetiku:

- Výstavba dvou nových bloků JE Dukovany (smlouva s KHNP podepsána 4. 6. 2025), popř. výstavba dalších jaderných zdrojů
- Vybudování hlubinného úložiště radioaktivního odpadu (výběr finální lokality do roku 2030, provoz od roku 2050)
- Komercionalizace malých modulárních reaktorů
- Zpracování jaderného odpadu
- zvládnutí jaderné fúze (zřejmě až po roce 2060)

11.1. Malé jaderné reaktory (SMR)

Patří mezi ně například lehkovodní malé reaktory chlazené a moderované vodou, vysokoteplotní plynem chlazené malé reaktory, malé reaktory pracující s rychlými neutrony, modulární reaktory chlazené roztavenými solemi. Zajištění stabilních dodávek do české energetické soustavy vyžaduje rychlé zavedení nových jaderných technologií. Podobnou cestu hledají v řadě zemí. 1), 2), 3)
KEPCO E&C, která je součástí skupiny KEPCO (stejně jako KHNP), podepsala memorandum o porozumění s českým jaderným výzkumným ústavem ÚJV Řež. Jihokorejská skupina, která v roce 2025 získala zakázku na dodávku dvou bloků pro elektrárnu Dukovany II, tím potvrdila zájem o spolupráci s českými společnostmi. Cílem memoranda je podpora technické spolupráce na základním a detailním návrhu reaktoru APR1000 tak, aby splňoval přísné evropské požadavky na jadernou bezpečnost.
Společnost ČEZ drží strategický minoritní podíl ve výši přibližně 20 % ve společnosti Rolls-Royce SMR, která vyvíjí malé modulární reaktory o výkonu 470 MWe. V dubnu 2026 uzavřel ČEZ s Rolls-Royce SMR smlouvu o přípravných pracích (Early Works) pro první SMR v lokalitě Temelín; jeho spuštění se očekává ve druhé polovině 30. let.

11.2. Jaderné reaktory čtvrté generace 4)

Cílem těchto systémů je efektivnější využití jaderného paliva, snížení produkce jaderného odpadu a vyhovět velice přísným bezpečnostním podmínkám. Mezinárodní fórum pro IV. generaci vytipovalo 6 nejperspektivnějších reaktorových systémů. Palivový cyklus může být otevřený nebo uzavřený. Druhý zmíněný by zahrnoval přepracování a recyklaci uranu, plutonia a minoritních aktinidů, čímž by došlo k redukci jaderného odpadu, a tak k šetření uranových zásob. Vysokoteplotní systémy mohou být využity na výrobu jak elektřiny, tak tepla pro petrochemický průmysl či výrobu vodíku. Cílem systémů je také vyšší účinnost a nové využití jaderné energie. První demonstrační jednotky takovýchto systémů se očekávají kolem roku 2030. Nové generace reaktorů by měly přijít do komerčního provozu ještě v první polovině tohoto století.

11.3. Nové palivo pro jaderné elektrárny 5), 6)

Hledání alternativních paliv pro jaderné elektrárny je iniciováno současnou nestabilitou trhu s uranem, rostoucími cenami, závislostí na omezeném počtu dodavatelů uranu a rostoucím počtu investičních záměrů na výstavbu nových jaderných elektráren. Ve světě je nyní (září 2026) ve výstavbě přibližně 75–80 nových jaderných reaktorů, z nichž téměř polovina je v Číně. Tyto investiční aktivity mají zásadní vliv na další růst cen uranu. Hlavními producenty uranu jsou Kazachstán (téměř 40 % světové těžby), Kanada, Namibie a Austrálie.
Jedním z nadějných řešení jsou tzv. thoriové reaktory, které jsou příslibem jako alternativa uranu v sektoru jaderné energetiky. Očekává se, že světové energetické potřeby prudce porostou díky růstu populace a vyšší poptávce ze strany rozvojových zemí, díky čemuž jsou thoriové reaktory stále atraktivnější.

Palivo pro tento typ reaktorů se vyrábí z thoria, což je prvek, který se vyskytuje v přírodě daleko hojněji než uran Thoriový palivový cyklus přitom produkuje menší množství dlouhodobě radioaktivních transuranů. Jaderné reaktory nové generace s thoriem jako zdrojem paliva mohou být jedním z nejúčinnějších způsobů dekarbonizace v energetickém sektoru.
Thorium se však nemůže rozštěpit a vytvořit jadernou řetězovou reakci jako uran. Pokud je však ozařováno neutrony ze štěpného materiálu – jako uran-235 nebo plutonium-239 – přemění se na uran-233. Proces vytváří energii a po svém zahájení je soběstačný; štěpení uranu-233 přemění další thorium v okolí na stejné jaderné palivo.
Existuje mnoho složitějších procesů, ale tento vztah mezi thoriem a štěpnými materiály slouží jako základ pro technologii v thoriových reaktorech.

Jako příklad lze uvést nové palivo od společnosti Clean Core Thorium Energy využívající thorium a obohacený uran. Toto palivo se nazývá Advanced Nuclear Energy for Enriched Life (ANEEL). ANEEL má velmi vysokou míru vyhoření paliva, což významně snižuje množství radioaktivního odpadu. Vyžaduje však nasazení v jiných typech reaktorů, než máme v ČR.
Norská společnost Thor Energy testovala thoriové palivo v reaktoru Halden; ve vývoji thoriových technologií však dnes působí řada firem a států po celém světě. Například Indie, která má největší zásoby přírodního thoria, se zajímá o jadernou energii na bázi thoria již po celá desetiletí. Jaderní vývojáři v zemi navrhli pokročilý těžkovodní reaktor, který je speciálně

zaměřen na využití thoria jako paliva. Také Čína je významným hráčem ve vývoji thoriových reaktorů. Experimentální thoriový reaktor s roztavenými solemi TMSR-LF1 (2 MWt) ve Wu-wej dosáhl kritičnosti v říjnu 2023 a v listopadu 2025 jako první na světě prokázal konverzi thoria na uran-233. Do roku 2035 má být dokončen demonstrační reaktor o tepelném výkonu 100 MWt. Čína doufá, že budování komerčního jaderného energetického průmyslu založeného na thoriu jí pomůže splnit její cíl nulových emisí uhlíku do roku 2060.

Reaktory na bázi thoria se však stále potýkají s ekonomickou životaschopností. Uran těžil z desetiletí výzkumu, vývoje a infrastruktury díky jeho dvojím aplikacím ve zbraních a energetice během studené války. Tento výzkum umožnil zemím vytvořit velkou znalostní základnu, díky níž je energie na bázi uranu stále dostupnější možností.

Výzvy pro chemický výzkum v ČR:

- Vývoj malých jaderných modulárních reaktorů
- Využití vyhořelého jaderného paliva

Cílem přepracování vyhořelého paliva je separace uranu a plutonia od štěpných produktů, jejich recyklace a opětovné použití v palivovém cyklu. Přepracování vyhořelého paliva je náročný proces jak z hlediska technologie, tak z hlediska bezpečnosti. Vyhořelé palivo i jeho vodné roztoky jsou během procesu vysoce radioaktivní. Proto se v přepracovacích závodech používají zařízení, která jsou vysoce provozně spolehlivá a dálkově ovladatelná, ale zároveň mají snadnou údržbu. Přepracováním lze znovu získat palivo pro výrobu energie v jaderném reaktoru. Další výhodou je snížení radioaktivity a objemu radioaktivního odpadu, který bude třeba uložit v hlubinném úložišti. Vyhořelé jaderné palivo je možné přepracovat pomocí řady metod. Příkladem jsou procesy REDOX, BUTEX, TRIGLY a především PUREX, nejvíce používaný jak v minulosti, tak současnosti. Tyto metody slouží na extrakci plutonia a uranu, jejich recyklaci (např. ve směsném oxidickém palivu, tzv. MOX) a opětovné užití v palivovém cyklu. Z toho vyplývá, že recyklací se ušetří přírodní uran.
Typický průběh přepracování je následující. Po přijetí paliva následuje rozstříhání jeho povlakového materiálu na kratší kusy, dále je rozpuštěno v kyselině dusičné, čímž se oddělí složky paliva a pouzdra palivových elementů. Vzniklý roztok se čistí ve speciální jednotce, tuhé částečky jsou odstraněny odstředěním a filtrací. Dalším krokem je určení množství štěpného materiálu ve vyčištěném roztoku a separace uranu a plutonia od vysoce radioaktivních štěpných produktů a aktinidů. Získaný uran a plutonium se čistí, zkoncentrují, konvertují na oxidy a uskladní. Stejně tak se zkoncentrují a uskladní štěpné produkty.

Aby mohl být uran znovu použit jako palivo, musel by být obohacen, ale v současné době není třeba obohacovat přepracovaný uran vzhledem k dostatečným zásobám přírodního uranu. V dnešní době je stále levnější použít palivo jednorázově. Přepracováním paliva vznikají další radioaktivní odpady – kapalné, kovové a plynné odpady.

Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým palivem v ČR – vychází především ze strategie přímého uložení v hlubinném úložišti, které je považováno za bezpečné,

nejekonomičtější řešení. Do jeho zprovoznění bude vyhořelé palivo skladováno v meziskladech vyhořelého jaderného paliva v areálech jaderných elektráren.
Hlubinné úložiště radioaktivního odpadu má v Česku stát přes 100 miliard korun; finální lokalita (ze čtyř kandidátních: Březový potok, Horka, Hrádek, Janoch) má být vybrána do roku 2030 a úložiště má být v provozu od roku 2050.

V běhu je i projekt na zpracování vyhořelého jaderného paliva
Cílem je zde prozkoumat možnosti zpracování vyhořelého jaderného paliva s cílem výrazného snížení celkové radioaktivity a poločasu rozpadu klíčových izotopů, nezhoršení možností konzervace a dlouhodobého uložení, nezhoršení toxicity a rizik pro životní prostředí a posouzení ekonomické efektivity separačního procesu.
Předpokládá se kombinace fyzikálních (využití neutronových toků v zatím v ČR neinstalovaných rychlých jaderných reaktorech) a chemických metod (prvková separace, recyklace).

V ČR jsou řešeny i další projekty:

- Vývoj zařízení pro separaci vzácných plynů z helia
- Technologie čištění plynu a těsnění spojů pro pokročilé aplikace v jaderné i nejaderné energetice
- Vývoj materiálů pro pokročilé jaderné reaktory a další energetické aplikace

11.4. Jaderná fúze 7)

Evropská cestovní mapa pro realizaci fúzní energetiky předpokládá, že první prototyp fúzní elektrárny na bázi tokamaku, pracovně nazývaný DEMO, bude zprovozněn v letech 2050–2060.
V jeho vývoji bude hrát zásadní roli úspěch v současné době budovaného výzkumného fúzního reaktoru ITER, který má za úkol prokázat, že lze technologicky realizovat uvolňování energie jadernou fúzí. Tokamak ITER je jedním z největších vědeckých projektů v dějinách lidstva. Předpokládá se spuštění zkušebního reaktoru v roce 2034 a dosažení plných parametrů kolem roku 2039. Fúzní výkon reaktoru by měl dosáhnout 500 MW.

V ČR má klíčovou roli Ústav fyziky plazmatu Akademie věd ČR (ÚFP). Významným milníkem českého fúzního výzkumu bylo přidružení ČR k fúznímu programu Evropského společenství pro atomovou energii (EURATOM) v roce 1999, které výrazně rozšířilo možnosti mezinárodní spolupráce; plným členem Euratomu je ČR od vstupu do EU v roce 2004. Původní tokamak COMPASS, který ÚFP provozoval od roku 2009, uskutečnil přes 21 000 výbojů a v roce 2021 byl odstaven. Na jeho místě v pražské Libni vzniká nový tokamak COMPASS Upgrade s vysokým magnetickým polem, jehož spuštění je podle aktuálního harmonogramu plánováno přibližně na rok 2030. Zařízení je součástí evropského fúzního programu EUROfusion. Má podpořit provoz tokamaku ITER a řešit klíčové otázky návrhu demonstrační elektrárny DEMO, mimo jiné testování nových materiálů první stěny a divertoru s tekutými kovy. Projekt posiluje postavení ČR v evropském fúzním výzkumu a otevírá perspektivu nové generaci českých i zahraničních vědeckých pracovníků. Ke vzdělávání odborníků přispívá také

Laboratoř horkého plazmatu a fúzní techniky (PlasmaLab@CTU) na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.
Významnou část tuzemských aktivit tvoří také materiálový výzkum, v jehož rámci se čeští vědci podílejí na vývoji nových pokročilých materiálů pro fúzní aplikace.
Další zajímavou aplikací v Centru výzkumu Řež je zařízení HELCZA (High Energy Load Czech Assembly), které je určeno pro testování materiálů komponent fúzního reaktoru ITER.

V ČR se výzkumem řešícím výše uvedené výzvy zabývají:
Centrum výzkumu Řež s.r.o.
Laboratoř termojaderné fúze ČVUT Praha
Fakulta elektrotechnická ČVUT Praha (např. Využití vyhořelého jaderného paliva)
VŠCHT Praha
Ústav fyziky plazmatu Akademie věd ČR (ÚFP) Praha
Vědci z Fyzikálního ústavu Akademie věd pomáhají studovat nestability v plazmatu, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT se zase podílí na nezbytném vzdělávání. Odborníků na fúzi je totiž celosvětově nedostatek.

Zdroje:
1. https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/male-a-mikro-reaktory/vyklad
2. https://www.sujb.cz/aktualne/detail/male-modularni-reaktory-jak-je-vidi-sujb
3. https://www.hybrid.cz/vyvoj-malych-modularnich-reaktoru-zrychluje-nuscale-pripravuje-první-projekt/
4. What is Uranium Investing, Investing News Network, duben 2022
5.Are Thorium Reactors the Future of Nuclear Energy? **I**nvesting News Network, 8. 7. 2022
6. What is Uranium Investing News Network 2022
7. Evropská cestovní mapa pro realizaci fúzní energetiky
8. Tiskové sdělení Rady pro výzkum, vývoj a inovace – Úřadu vlády ČR, 2. 9. 2022

12. Průmyslové biotechnologie – nezastupitelná alternativa nových možností a udržitelnosti v chemickém průmyslu

Průmyslové biotechnologie zahrnují celou řadu nových možností, jak řešit výzvy pro zajištění udržitelnosti jako jsou biokatalyzátory, bioreaktory, biopaliva, nová pokročilá léčiva a biofarmaka. Mezi hlavní výzvy zde patří:

- Vyvinout biokatalyzátory, které budou lepší, rychlejší a lacinější než běžné chemické katalyzátory.
- Biologická produkce metanolu z odpadního metanu.
- Komercionalizace biorafinerií 2. generace a vývoj koncepcí biorafinerie 3. generace
- Šlechtění a kultivace nových typů mikroorganizmů pro účinnou a selektivní výrobu nových chemických produktů pro potravinářství, zemědělství, kosmetiku, agrochemii a další odvětví.

Průmyslová biotechnologie zahrnuje praxi využívání buněk k výrobě produktů užitečných v průmyslu. Aktivními látkami jsou enzymy – proteiny, které katalyzují nebo urychlují chemickou reakci. Hlavní výhodou enzymů ve srovnání s dalšími katalyzátory je jejich stereoselektivita a chemoselektivita. Biotechnologické procesy mohou mít potenciál v produkci energie, zvláště pak v náhradě rostlinné biomasy využívané jako zdroj potravy. To bude záviset na schopnosti enzymů degradovat celulózu rostlinné biomasy a na vytvoření metod, jak recyklovat nebo likvidovat spotřebovanou biomasu.
Degradační schopnosti enzymů se aktuálně používají i v oblasti materiálové recyklace pomocí depolymerace některých plastů např. PET, nebo PA, s cílem získat zpět základní stavební bloky pro nové polymery.
V biotechnologii chemického a farmaceutického průmyslu se hojně využívá fermentačních pochodů, biotransformace prekurzorů a biosyntéza léčiv rekombinantními organismy. Příklady fermentace a biotransformace, které se provádějí v průmyslovém měřítku jsou produkce aminokyselin, léčiv a jejich prekurzorů, potravin a kosmetiky, agrochemikálií a rozličných dalších chemikálií. Biotechnologické procesy se používají téměř výhradně k syntéze speciálních chemikálií s vysokou přidanou hodnotou a určených pro asymetrickou syntézu chirálních látek.

V nápojovém a potravinovém průmyslu se biotechnologie již široce využívá, a to především v krocích, které vyžadují enzymy a mikroorganismy. To zahrnuje zejména průmysl mléčných výrobků, produkci syrových uzenin, pečení, výrobu alkoholických nápojů, přídavků do potravin jako např. vitamíny, aminokyseliny či organické kyseliny a přípravu enzymů. Navíc se biotechnologie uplatňuje stále více v analýze potravin. Tradičně se k produkci enzymů využívají bakterie, kvasinky a houby. Aplikace biotechnologických procesů si získává celosvětovou pozornost i v papírenském průmyslu. Ve většině případů se aplikují kombinace biotechnologie, chemických a fyzikálních postupů. Důležité příklady zahrnují např. následující: biopulpace dřevní štěpky (pomocí hub), vylepšování odvodňovacích vlastností, odbarvování.
V textilním průmyslu se biotechnologické postupy mohou aplikovat na následující procesy: předmývání látek, srážení škrobu, bio-barvení při zpracování denimových látek, zlepšování fixace barvy ve vláknech, modifikace povrchu dalších vymývatelných produktů. Potenciál pro aplikaci biotechnologie v kožedělném oboru spočívá v enzymatickém odstranění chlupů, konverzi odpadních látek z produkce kůže na látky, které lze využít ještě dále.
Biotechnologický průmysl je jedním z výzkumně nejintenzivnějších odvětví na světě a typické je, že jde o malé či středně velké podniky zakládané výzkumnými pracovníky ze sféry akademické či průmyslové. Biotechnologické firmy obvykle vyvíjejí a prodávají nové technologie, služby či produkty ze všech odvětví biologických věd. Většina z nich se vyznačuje zaváděním novinek, flexibilitou a rychlostí. Ale také se spoléhají na vládní iniciativy a na klíčové vztahy s akademickou obcí, finančním světem a rizikovým kapitálem anebo, v mnoha případech, s velkými farmaceutickými firmami. Biotechnologické podniky jsou často v regionálních „klastrech“, které umožňují těsnou interakci s dalšími firmami, výzkumnými ústavy a klinikami.
Pro biotechnologický průmysl je charakteristické vysoké riziko. K tomu přispívá třeba okolnost, že jen zlomek testovaných látek se osvědčí jako léčivo a i pak je třeba počítat s nutností překonat vysoké náklady na prověřování bezpečnosti a zdlouhavé registrační řízení.

U biomasy lze předpokládat použití udržitelných surovin, které nejsou vhodné pro potraviny. Vzhledem k tomu, že biomasa je omezený zdroj, který využívají i jiná odvětví, např. bioenergie a biopaliva, úvahy se omezují na dostupná rezidua jako dřevo a lesní zbytky, vedlejší produkty ze zemědělství, komunální odpad, průmyslové zbytky a zbytky z jiných oblastí.

Základní podklady pro tuto SVA poskytli odborníci z Ústavu chemických procesů AV ČR **1)**.

V úvodu svého příspěvku autoři upozornili, že zatímco veřejnost sleduje dopady událostí, jako jsou války, migrace, teroristické útoky či rostoucí kybernetické hrozby, do značné míry se upozaďují problémy, které jsou s nimi srovnatelně závažné. Tyto problémy působí zdánlivě skrytě a neagresivně, ale rychlým tempem, a mohou rozvinuté i rozvíjející se ekonomiky dovést do stavu, kdy zdroje nebudou stačit k pokrytí základních potřeb. Světová populace přitom stále roste: podle OSN (World Population Prospects 2024) se z dnešních přibližně 8,2 miliardy zvýší na zhruba 10,3 miliardy v polovině 80. let 21. století. Růst sice zpomaluje, spolu s rostoucí spotřebou na obyvatele však dále zvyšuje tlak na zdroje. Voda, potraviny, energie, půda, suroviny pro výrobu komodit, a nakonec ani dýchatelný vzduch a zdravé životní prostředí proto nemusí být relativně brzy samozřejmostí. Samotné informační technologie tento stav nevyřeší.

Před lidskou populací tak dnes stojí výzva udržet potřebný rozvoj všech segmentů průmyslu. Udržitelný rozvoj společnosti je zjevně nejobtížnější výzvou, které lidstvo kdy čelilo. Dosažení udržitelnosti vyžaduje řešení mnoha základních problémů na místní, regionální a globální úrovni. Na všech úrovních musí věda a technologie hrát zásadní roli při dosahování udržitelnosti, ale stejně důležitá jsou politická rozhodnutí, podpořená společenskou podporou a koordinovanými politickými přístupy, což se bohužel prozatím ne vždy chápe a k tomu chybí i globální nadhled a vize budoucnosti.

Teoretický postoj k zamezení takového stavu vypadá zdánlivě prostě: musí se snížit výstupy odpadů, aby se dále nekontaminovaly zásoby vody ve všech jejích podobách, půdy a ovzduší, k tomu najít potravinové zdroje s vysokou produktivitou i na ubývajících plochách zemědělských půd, dále najít nové dostatečné zdroje obnovitelné energie a nové materiály, které by nahradily ty neobnovitelné, zejména minerální. Všechny tyto segmenty v podstatě doposud významně saturuje nezastupitelným způsobem chemický a energetický průmysl, metalurgie, strojírenství, zemědělství, ale jejich materiálová, surovinová základna, jak jsme na ní doposud zvyklí, bude ubývat. Obrovskou pozitivní obnovitelnou roli může hrát již v blízkém budoucnu biotechnologický průmysl, využívající obnovitelné přírodní zdroje bio-rafinačním způsobem. Nastupující nové průmyslové oblasti jako jsou mikroelektronika, telekomunikace, informační technologie, a právě biotechnologie, vyžadující méně intenzivně stávající zdroje ve srovnání s tradičními sektory průmyslu, ale samy o sobě udržitelnost zajistí, jen budou-li ekonomicky schůdné, environmentálně kompatibilní a sociálně vstřícné. Modely publikované autory zejména ze zemí OECD jsou teoreticky vypracované, ale zatím čekají na reálné ověření a potvrzení (OECD Action Plan on the Sustainable Development Goals). **2)**

12.1. Role biotechnologie v chemickém průmyslu

Role biotechnologie v těchto budoucích plánech je podstatná a rozprostřená v podstatě do čtyř různých oblastí (Gavrilescu a Chisti, viz práce **3)**.

Nová odvětví genetické inženýrství, proteinové inženýrství, metabolické inženýrství, jejich náplň zvolna se naplňující na základě intenzivního vědního přístupu v posledních letech, a čtvrtá oblast, známá jednoduše jako bioprocesy, které již po dekády se prakticky prezentují dopady, např. v oblasti fermentačních výrob, biopalivech, bioremediacích, přípravě biopotravin atd., tedy všude, kde se uplatňují procesní reakce, na příklad biokatalýza.

Genetické inženýrství zde zjednodušeně uvažujeme jako proces, využívající rekombinantní DNA technologii pro změny genetického setu genů organizmu. Proteinovým inženýrstvím rozumíme procesy přípravy užitečných a cenných proteinů. Metabolické inženýrství chápeme jako praktickou optimalizaci a regulační procesy uvnitř buněk za účelem produkce určitých substancí těmito buňkami biomasy.

Biokatalýza biologickými katalyzátory, enzymy, podporovaná ko-faktory, je odvěký základ mnohých biotechnologických procesů, kdy lidstvo v dnešní podobě ještě neexistovalo, a na Zemi se miliony let utvářel život jako takový. Je to především fotosyntéza, složitý biochemický proces, při kterém se mění přijatá energie světelného záření na energii chemických vazeb. Využívá se tak světelného, např. slunečního, záření k syntéze energeticky bohatých organických sloučenin – cukrů – a to z jednoduchých anorganických látek – především oxidu uhličitého (CO_2**)** a vody za účasti pigmentu chlorofylu, absorbentu záření. Fotosyntéza má zásadní význam pro život na Zemi. Fotosyntéza probíhá v chloroplastech zelených rostlin a mnohých dalších eukaryotických organizmů (různé řasy), ale také v buňkách sinic a některých dalších bakterií. V jednom z kroků fotosyntézy je to právě enzym rubisco aktivující oxid uhličitý, nejrozšířenější protein na Zemi. Fotosyntéza, která funguje dodnes jako první pilíř biotechnologie a vytváří biomasu, kterou exploatujeme biorafinací, a která poskytuje zdroj uhlíku pro mikroorganizmy jako pro druhý pilíř biotechnologie, které již byly ostatně známé a aplikované ve starověku např. při výrobě vína a chleba.

Využití biokatalyzátorů pro chemickou výrobu pokrývá dnes vysoce vyvinutá aplikovaná věda. Enzymy i celé buňky se využívají pro katalýzu organických reakcí, snad nejobecnější případ je kvasinkami zprostředkovaná transformace cukrů na alkoholy. Nejvíce využívanou skupinou biokatalyzátorů jsou lipázy, hydrolyzující tuky na mastné kyseliny, nebo pro syntézu esterů a amidů z nich, což se využívá v potravinářství, syntéze chemikálií a produkci biopaliv. Jako enzymové katalyzátory se hojně aplikují proteázy, celulázy a amylázy, pro hydrolýzu proteinů, celulózy a škrobu. Co je na těch katalyzátorech podstatné? Zajišťují dobré výtěžky, vysokou selektivitu žádaného produktu. Zmíněné proteinové inženýrství se v současnosti bez biokatalýzy neobejde.

Chemický průmysl produkuje obrovské množství produktů, jako jsou základní a speciální produkty z různých surovin včetně rafinace ropy, papíru a celulózy, získávání kovů, pigmentů a syntetických hnojiv a pesticidů, barev, plastů, farmak, produktů osobní péče. Chemický

průmysl zasahuje tak do textilního a automobilového průmyslu a do řady dalších sektorů. Chemické speciality se zaměřují na adhesiva, katalyzátory, aditiva do plastů, produkty osobní péče jako jsou mýdla, detergenty, kosmetika, zubní pasty, ochranné prostředky proti slunečnímu záření, z farmak pak léčiva všech kategorií.

Biotechnologie se uplatňuje ve všech těchto sektorech specifickým způsobem, a to již po několik dekád vyvinutých procesů, jako jsou alkoholy jako etanol a butanol, antibiotika, aminokyseliny, vitaminy, průmyslové enzymy, a platformní chemikálie, jako ethylen glykol, kyselina jantarová, 5-hydroxy-methyl-furfural (5-HMF), kyselina mléčná, levulinová, glutamová, citronová, fenoly, aj.). Nejvíce vyráběných komodit v milionech a stovkách tisíců tun/rok byly v minulých dekádách podle Gavrilescu a Chisti **3)**: uvádějí příklady udržitelných alternativ pro chemické procesy v průmyslovém měřítku ročních produkcí některých komodit, na příklad: bioethanol (26, 000 000), L-glutamová kyselina (1,000 000), citronová kyselina (1,000 000), l-lysin (350.000) a kyselina mléčná (250.000). Je jasné, že bez rozhodujícího příspěvku mikroorganizmů by tyto syntézy nebylo vůbec možné procesovat.

12.2. Příspěvek mikroorganizmů v průmyslové biotechnologii a chemii

Je evidentní, že život na Zemi bez mikroorganizmů není možný. Průmyslově se pak využívají již přes 100 let. Diverzita všech enzymů je obrovská a jejich metabolické dráhy jsou velmi rozličné. V posledních letech byl učiněn pokrok ve znalostech v rekombinantní DNA, který přinesl mnohé změny do průmyslové mikrobiologie. Byly modifikovány biosyntetické dráhy pomocí metabolického inženýrství a získány nové metabolity, zlepšena selektivita a aktivita enzymů, a aplikace geneticky modifikovaných mikroorganizmů přináší nové možnosti získávání chemických látek. Užití mikroorganizmů v chemii není žádný nový vynález, jak jsme zmínili v úvodu. Cíleně aplikované bakterie a houby jsou využívány k produkci chemikálií, farmak a parfémů již dekády. Tyto reakce, často nazývané jako biotransformace, mají řadu výhod nad konvenčními chemickými reakcemi. Zejména jsou vysoce účinné a selektivní, nenákladné pro produkci syntetických analogů, získávaných chemickou cestou. Mikrobiálně katalyzované biotransformace mají zejména významný potenciál pro výrobu strukturně různých organických látek s komplexní strukturou, jako jsou třeba seskviterpenoidy, flavonoidy, steroidy, saponiny. Katalyzují chemo-, regio- a stereospecifické hydroxylace různých substrátů, které je jinak extrémně obtížné provést chemicky. V tzv. zelené chemii jsou biotransformace důležitou metodou pro udržitelné průmyslové procesy, viz 4).
Enzymové biokatalyzátory se uplatňují u více než 500 produktů (Demain a Adrio 5)), zejména v potravinářství, výrobě detergentů a v textilním, kožedělném a papírenském průmyslu. Zatímco v roce 2000 se objem světového obchodu s enzymy odhadoval přibližně na 2 miliardy USD, v roce 2025 dosáhl trh průmyslových enzymů podle odhadů přibližně 8,4 miliardy USD. Celkový trh enzymů včetně speciálních enzymů pro farmacii a diagnostiku činil zhruba 15 miliard USD. Do roku 2030 se očekává růst trhu průmyslových enzymů přibližně o 7 % ročně. Mezi nejvýznamnější výrobce patří Novonesis (vznikl v roce 2024 spojením Novozymes a Chr. Hansen), DSM-Firmenich, IFF, BASF a AB Enzymes. Z hlediska objemu dominují karbohydrázy (amylázy, celulázy, glukózaizomeráza, invertáza, laktáza, α-galaktosidáza), nejrychleji roste poptávka po proteázách. Produkují sekundární metabolity

jako antibiotika, pesticidy, růstové faktory pro rostliny i živočichy, antiinfekční látky a antibiotika zejména rody Streptomyces a vláknitými mikrohoubami. Globální trh s antibiotiky byl v roce 2000 kolem 35 miliard USD. V protinádorových prostředcích to je nejúspěšnější taxol, původně nalezený v rostlinách, ale produkovaný houbou Taxomyces andreanae. Světový trh je opět v jednotkách miliard USD. Jsou to i statiny, prostředky snižující cholesterol, produkované ve výši 15 miliard USD, např. compactin, jako produkt houby Penicillium brevicompactum. Jsou to i imunosupresiva, umožňující transplantaci orgánů, jako cyclosporin z plísně Tolypocladium inflatum. Dále celá řada bioinsekticidů na bázi Bacillus thuringiensis, které jsou údajně až 800 000krát účinnější než chemický pyrethroid. Z primárních metabolitů je to zejména glutamát sodný, kterého se vyrábí kolem miliardy kg/rok fermentací pomocí Corynebacterium a Brevibacterium. Za zmínku stojí i produkce vitaminů, např. B12, průmyslově vyráběný pomocí Propionibacterium shermanii nebo Pseudomonas denitrificans, kterého se vyrábí ročně za 70 milionů USD, nebo kyseliny citronové z Aspergillus niger za 2 miliardy USD/rok.

Bezpečně v této oblasti ale vede etanol, získávaný fermentačně z cukrů, nebo polysacharidů depolymerizovaných na cukry, v případě hexóz pomocí Saccharomyces cerevisiae a Kluyveromyces fragilis nebo Candida sp. z laktóz, nebo pentóz. Jeho zamýšlené užití jako motorové palivo je sice ekologické, ale prozatím velmi drahé. Také technologie rekombinantní DNA má v současnosti jisté úspěchy v úspěšné konverzi na etanol, zkouší se bakterie Zymomonas a anaerobní Clostridium thermocellum k přímé konverzi odpadní celulózy na etanol. Proteázy, lipázy, amylázy, oxidázy, peroxidázy a celulázy jsou přidávány do detergentů. Proteázy v pracích detergentech činí asi 25 % ceny ze všech produkovaných enzymů.

Mikroorganizmy jsou v biotransformačních procesech extrémně účinné. Jako příklad prvního úspěšného procesu, konkurujícího chemickému v petrochemii, je považována konverze akrylonitrilu na akrylamid a produkce nikotinamidu, vitaminu B3, užitím Rhodococcus rhodochrous, který na rozdíl od chemického procesu, nedává vedlejší produkty.

V posledních letech to je zejména rekombinantní DNA technologie, která využívá různé průmyslové mikroorganizmy, např. E. coli, B. subtilis, S. cerevisiae, Pichia pastoris, Hansenula polymorpha, a Aspergillus a Trichoderma jako rekombinantní hostitelé pro řadu farmak, jako jsou inzulin (hormon snižující hladinu cukru v krvi), interferony (proteiny v protivirové obraně), vakcíny proti hepatitidě B, interleukiny (protizánětlivé cytokiny), ale i výroba etanolu, aminokyselin, xantanu, apod. geneticky modifikovanými mikroorganizmy 5).
Specifickou třídou s možností produkce lipidů (potenciálně využitelných pro biopaliva a bioaktivní látky) jsou mikrořasy. V odborné literatuře je jim v tomto směru předpovídaná značná úspěšnost. Mikrořasy obsahují relativně značný obsah lipidů, u některých vyšlechtěných kmenů to může být až 30-40 % jejich hmotnosti. Otevírá to možnost využít lipidy mikrořas známou technologií pro přípravu metylesterů mastných kyselin jako motorového biopaliva. Předpokládá se přitom kultivace řas nejspíše autotrofně na otevřených bazénech, cirkulačních otevřených bioreaktorech typu „běžecké dráhy“, nebo na otevřených plošinách, na kterých teče vrstva řasové suspenze o výšce do cca 6 mm. Donátorem uhlíku je atmosférický oxid uhličitý. Optimismus závěru takových publikovaných sdělení o perspektivě mikrořas pro výrobu motorových biopaliv je však třeba korigovat

ekonomickým pohledem: maximální produktivita lipidů dosahovaná na nejúčinnějších plošinových reaktorech, které byly předmětem našich výzkumů, dosahuje koncentrace mikrořas kolem 20 g sušiny řas/m2 plošiny /den, přičemž např. v zemích střední Evropy je doba sklizně za rok asi 150 dní. Při obsahu lipidů v sušině mikrořas kolem 30 % lze odhadnout plochy takových otevřených bioreaktorů, které by musely být enormní, přičemž výrobní cena za 1 kg takových mikrořas se pohybuje mezi 300-1000 Kč. Ekonomicky je tento způsob zatím neúnosný. Možností by byla heterotrofní kultivace některých vybraných kmenů mikrořas ve velkých aerobních uzavřených bioreaktorech-fermentorech, kde zdrojem uhlíku může být např. odpadní glycerol z procesu transesterifikace, kde koncentrace mikrořas dosahuje během cca 5-6 dní až 80-100 g/litr. Je však třeba zvládnout striktní dodržení sterility takových reaktorů. Nicméně, jsou technické předpoklady pro možnou budoucí výrobu motorových biopaliv z řas i touto technologií a její optimalizaci. V současnosti 2 zahraniční společnosti provozují tyto typy kultivací ve fermentorech objemu cca 10 m3 za účelem získání omega-3-nenasycených mastných kyselin jako výživových doplňků. Rozhodující tedy bude chemicko-inženýrské řešení takových bioreaktorů.

Jaký je význam biotechnologie pro chemii v současnosti a v budoucnosti?
Úspěchy a pokrok genetického inženýrství překonaly možnosti tradiční biotechnologie s neupravenými mikroorganizmy. Světové chemické společnosti jako Monsanto (od roku 2018 součást Bayer) a DuPont (jehož zemědělská divize se v roce 2019 osamostatnila jako Corteva) přešly v řadě výrobků, jako jsou pesticidy či produkty osobní péče, na nové biotechnologie a zvolna opouštějí zaměření na petrochemii. Jistě nelze tradiční petrochemické výroby zcela opustit, jsou prověřené a zaběhnuté, ale postupně je snaha nahrazovat chemikálie na bázi petrochemických zdrojů produkty bio-rafinace. Někteří autoři dospěli k závěru, že je možné v podstatě všechny chemické sloučeniny získané na bázi petrochemických surovin nahradit produkty biorafinace z biomasy 6). Současně však připomínají, že to závisí na prioritách společenského mínění, již zvyklého na pohodlnou konzumaci výrobků na bázi fosilních zdrojů, kterých chemický průmysl využívá asi 10 % současných zásob. Takové výrobky, vyrobené ekologickými technologiemi, mohou být dražší. Taková náhrada není jistě otázkou překotných změn, ale příprava včetně důkladných analýz přechodu je nezbytná a měla by začít. Je to zejména obrovský nárůst plastů v posledních letech (až 100 kg/hlavu/rok ve státech s vyspělou ekonomikou), které jsou založeny na exploataci fosilních surovin, který bude udržovat konzumaci fosilních zdrojů nadále, protože plasty jsou hlavním driverem poptávky po ropě **7)**. Na druhé straně, hromadění odpadních plastů je celosvětový velký problém, stejně jako obava z růstu CO_2, které musí být co nejrychleji řešeny. Některé plasty lze připravovat i biotechnologicky (např. polyhydroxyalkanoáty – PHA), ale jejich masové nasazení není možné očekávat (spíše půjde o specifické oblasti využití).

Co je nutné učinit, aby bio-katalýza, o jejíž přednostech se nepochybuje, byla skutečně v chemických technologiích plně využitelná?
Enzymatické procesy mají sice jasné výhody ve srovnání s jejich chemickými alternativami, je však třeba zintenzivnit výzkum, aby byly i cenově kompetitivní v rozsáhlém chemickém průmyslu. Je třeba investovat do vědy a výzkumu v udržitelných technologiích **8)**.
Byly identifikovány kroky, které musí bio-katalýza dosáhnout, aby se plně uplatnila v udržitelném chemickém průmyslu, jako např. vývoj biokatalyzátorů účinnějších a lacinějších

než jejich chemické srovnatelné katalyzátory, musí být kompatibilní i s rozpouštědly a zvýšit vědní poznání v molekulárním působení enzymů, aby se mohly modelovat a konstruovat nové specifické biokatalyzátory. Opět je nutno zdůraznit nutnost nalézt nové bio-degradovatelné plasty, některé kroky, jako biologicky zvládnutý proces biokonverze akrylonitrilu na akrylamid a dále na polyakrylamid je nadějným příkladem.

Dalším problémem, který je třeba řešit, jsou biopesticidy. Dosud tvoří jen jednotky procent trhu přípravků na ochranu rostlin, přičemž chemické pesticidy jsou významným ekologickým polutantem 9). Podobně známe bio-hnojiva (dusík fixující bakterie, jako jsou Rhizobium a sinice – Cyanobacteria, a půdní biostimulanty). Od užití bio-hnojiv si slibujeme snížení environmentální zátěže, zejména vodní eutrofizace.

Významně se začíná uplatňovat tzv. bio-pulping. Jde o ošetření dřevní štěpky enzymy degradujícími lignin před rozvlákňováním dřeva. Významně snižuje energetické výdaje na mechanické a chemické rozvlákňování pro separace celulózy od ligninu, zlepšuje kvalitu papíru a významně snižuje environmentální dopady, spojené s průmyslem papíru a celulózy. Zejména je enzymová technika účinná při recyklaci potištěného papíru, kdy odstraňuje tisk a barvy.

Rozhodující role při remediaci půd a vod patří bio-remediacím, které tvoří vlastní vědní a aplikační disciplínu environmentálního inženýrství. Je to zaběhnutá technika, aplikovaná po desítky let na dekontaminaci komunálních i průmyslových vod bakteriálním mixem v aerobním i anaerobním modu.

Aplikace biotechnologií v řadě průmyslových sektorů, zvláště v chemickém, přináší ekonomické a environmentální výhody v méně nákladných řešeních, zvýšení kvality produktů, tvorbu zcela nových produktů, přičemž jde o environmentálně zdravější operace. Hlavní hnací síla uvádění biotechnologie do chemického průmyslu je ekonomická výhodnost (ne prozatím vždy splnitelný cíl, ale je předmětem intenzivního řešení) a již řečená jediná možnost splnění fenoménu udržitelnosti. Průmyslová biotechnologie je příležitost, jak změnit cesty výroby energie, chemikálií a jiných žádaných produktů. Genově manipulovaná bio-katalýza umožní nové využití –recyklaci spotřebovaných produktů, dříve nemožné a přípravu nových produktů. Společnost musí být postupně přesvědčena, že genové manipulace odpovědně vedené na vysokém stupni vědního poznání, jsou užitečné, a možná, že v budoucnu jediné možné, jak se vypořádat s rostoucí populací, zejména v rozvíjejících se zemích, a při zvyšujících se životních nárocích. Nepochybně, biotechnologie umožní, aby i zcela nezastupitelný chemický průmysl, se v blízké budoucnosti stal zdravější a kompatibilní s nároky na zdravou planetu Zemi.**10)**

Příklady potenciálních aplikací průmyslových biotechnologií

- Metanol z biomasy
- Bioplyn

Plyn v tuzemsku v současné době pochází převážně z fosilních zdrojů; výroba biometanu však rychle roste (v roce 2025 179 GWh). Do určité míry je možné ho nahradit biometanem, který se získává technologickou úpravou bioplynu. K produkci bioplynu přitom u nás dochází už po desetiletí – vyrábí se zpracováním biologicky rozložitelných materiálů v bioplynových stanicích, například kalů z čistíren odpadních vod, bioodpadů, statkových hnojiv nebo cíleně pěstovaných energetických plodin.

Bioplynové stanice vyrobily v roce 2025 přibližně 2,27 TWh elektřiny. To odpovídá zhruba 3 % celkové výroby elektřiny v ČR a necelé pětině (asi 19 %) výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů. Jejich podíl přitom s rychlým růstem fotovoltaiky klesá. V ČR je v provozu přibližně 574 bioplynových stanic:

- asi 400 zemědělských,
- přes 100 na čistírnách komunálních a průmyslových odpadních vod,
- zhruba 70 stanic využívajících skládkový plyn.

Řada z nich byla postavena v dotačním boomu kolem roku 2011, kdy v ČR vznikl rekordní počet přesahující stovku staveb. Od roku 2015 se nový výkon prakticky nepřidává. Nejstarším stanicím končí garantovaná podpora výkupu elektřiny, proto se očekává jejich modernizace, optimalizace provozu a přechod na výrobu biometanu. Biometan mohou výrobci vtláčet do plynárenské sítě s podporou formou zeleného bonusu, schváleného Evropskou komisí až do roku 2045.

Zemědělské družstvo v Litomyšli se jako jedno z prvních v České republice rozhodlo pro změnu technologie využití bioplynu, který produkuje ve své bioplynové stanici. Namísto výroby pouze elektrické energie a tepla družstvo bioplyn čistí na biometan. Ten zároveň vtláčí do stávající plynárenské rozvodné sítě. Součástí nového projektu byla i stavba čerpací stanice na stlačený zemní plyn (CNG) v přilehlém areálu v obci Dolní Újezd. Prostřednictvím této stanice družstvo vyrobený biometan používá k pohonu svých vozidel a zároveň ho nabízí i veřejnosti. Celou investici za více než 50 milionů korun zrealizovaly společnosti Hutira Brno a Hutira green gas. Tento projekt nastartoval vlnu dalších podobných projektů u provozovatelů současných bioplynových stanic.

Pro úsporu nákladů bioplynových stanic je tedy důležité celkové nastavení řídicího systému a propojení řízení jednotlivých technologií. Tím lze dosáhnout snížení provozních nákladů a zefektivnit tak výrobu elektrické energie a tepla. Sledováním a vyhodnocením vhodných provozních dat je také možné snížit servisní náklady a případné ztráty při neočekávaných odstávkách prostřednictvím plánované údržby nebo výměny jednotlivých částí technologie. Při optimalizaci je tedy velmi důležitá úzká spolupráce a propojení dodavatele technologií a výrobce řídicího systému, a to ideálně v podobě full servisu, kdy se provozovatel se všemi problémy obrací na jednu společnost a konkrétní zodpovědnou osobu. Dalším bonusem ve vývoji nových technologií pro zvýšení efektivity bioplynových stanic je možnost využití nových IoT technologií pro bezdrátový sběr, přenos a analýzu dat. Provozovatelé mohou například sledovat chod souvisejících technologií, hladiny ve vzdálených nádržích nebo zabezpečení areálu, a získat tak centralizované informace dostupné jak na operátorském stanovišti, tak případně na tabletu či chytrém telefonu.

K dosažení cíle plánu REPowerEU – výroby 35 mld. m³ biometanu v EU do roku 2030 – činí odhadované investiční potřeby přibližně 37 miliard EUR.

12.3. Biosuroviny pro výrobu motorových paliv

Technopark Kralupy se společně s Ústavem technologie ropy a alternativních paliv VŠCHT Praha zapojil do řešení projektu BioMates, který je financován z Rámcového programu pro výzkum a inovace EU Horizont 2020. Projekt BioMates byl zaměřen na zpracování nepotravinové biomasy na chemické meziprodukty, které by byly využitelné v konvenčních procesech zpracování ropy. Vývoj procesu, který umožňoval rentabilní a decentralizované zpracování zbytků z rostlinné výroby a nepotravinové biomasy, jako jsou například sláma a vytrvalé traviny, byl klíčovou aktivitou celého projektu. Cílem projektu bylo, aby biosložky z tohoto zpracování biomasy dosahovaly takových vlastností, aby byly slučitelné se současnou surovinovou základnou pro výrobu motorových paliv a mohly tak být zpracovány společně ve stávajících rafinériích, které jsou uzpůsobeny na zpracování fosilních surovin. Vzniklé hybridní palivo by i přes vysoký obsah biosložek mohlo být využíváno v běžných spalovacích systémech.

Hlavním úkolem VŠCHT Praha bylo společně s dalším českým účastníkem, firmou RANIDO, s.r.o., vývoj a testování vhodného katalytického systému pro výše popsané využití. Vedle VŠCHT a RANIDO byl do řešení projektu zapojen Fraunhofer Institute for Environmental, Safety, and Energy Technology UMSICHT, Německo (koordinátor projektu), Centre for Research & Technology Hellas / CERTH – Chemical Process & Energy Resources Institute / CPERI, Řecko, Imperial College London, Velká Británie, Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) Heidelberg GmbH, Německo, Hydrogen Efficiency Technologies (HyET) B.V., Nizozemí a BP Europa SE, Německo.

Návrh témat pro českou chemickou VaV:

- mikrobiálně katalyzovaná biotransformace
- mikrobiální degradace v membránových bioreaktorech
- geneticky upravované obilniny (např. odolné vůči suchu)
- rozkládání netříděných plastových odpadů pomocí chemických metod
- optimalizace výroby motorových biopaliv z řas
- pokročilé procesy čištění biologicky dekontaminovaných vod

Zdroje:

1) Hanika J., Kaštánek F.: Podkladová studie Průmyslové biotechnologie – nezastupitelná alternativa nových možností a udržitelnosti v chemickém průmyslu.

2) *Better Policies for 2030 – An OECD Action Plan on the Sustainable Development Goals http://www.oecd.org/dac/Better%20Policies%20for%202030.pdf*

3) *Gavrilescu M., Chisti Y.: Biotechnology—a sustainable alternative for chemical industry. Biotechnol.Advances 23 (200**5)** 471-499*

4) *Arturo Cano-Flores, Javier Gómez, Iker S. Escalona-Torres, Benjamín Velasco-Bejarano: Microorganisms as Biocatalysts and Enzyme Sources. Open access peer-reviewed chapter. Published: January 16th 2020, DOI: 10.5772/intechopen.90338*
5) *Arnold L. Demain, Jose L. Adrio: Contributions of Microorganisms to Industrial Biology Mol. Biotechnol. 38 (200**8)** 41-55*
6) *Roddy D.J.: Biomass in petrochemical world. Interface Focus. 2013 Feb 6; 3(**1**): 20120038.*
7) *Wörsdörfer M. The Future of Petrochemicals. Mechthild Wörsdörfer, Director of Sustainability, Technology and Outlooks IEA, 7 December 2018, Brussels – EU Refining*
8) *Materiál New Biocatalysts: Essential Tools for a Sustainable 21st Century Chemical Industry (www.eere.energy.gov/biomass/pdfs/biocatalysis_roadmap.pdf)*
9) *Kumar S.: Biopesticides: A Need for Food and Environmental Safety. Biofertil Biopestici 2012, 3:4DOI: 10.4172/2155-6202.1000e107*
10) *Studie dopadů balíčku Fit for 55 na hospodářství ČR–Závěrečná zpráva Deloitte, srpen 2022*

13. Cirkulární ekonomika

Zacházení s odpady, čištění vzduchu a odpadních vod, efektivní provozování technologií s minimalizací výskytu odpadů, využívání odpadů pro materiálové využití, např. chemická recyklace, Green chemistry – efektivní využívání technologií s minimalizací výskytu odpadních vod a možností jejich zpětného využití. - čištění vzduchu, fotokatalytické nátěry, recyklace ohrožených surovin to jsou významné aspekty uplatnění principů cirkulární ekonomiky v ČR. V rámci MSV byl založen hotspot České cirkulární ekonomiky, který má za cíl implementaci cirkulární ekonomiky do českého prostředí. Existuje rovněž nevládní nezisková organizace Institut cirkulární ekonomiky **1)**.
Rozdíl mezi cirkulární a lineární ekonomikou dokumentuje obr. č. 16.

Podle zprávy Global E-waste Monitor 2024 (ITU a UNITAR) vzniklo v roce 2022 celosvětově 62 milionů tun elektronického odpadu, který představuje nebezpečí pro zdraví a životní prostředí; do roku 2030 se má jeho množství zvýšit na 82 milionů tun. Prokazatelně sebráno a recyklováno bylo jen 22,3 %. Elektroodpad obsahuje až 69 prvků periodické tabulky. Tyto materiály můžeme díky recyklaci vrátit do výroby a významně tak snížit produkci skleníkových plynů.

13.1. Recyklace solárních článků 2)

Německo zažilo největší boom solární energetiky mezi lety 2009-2011. Což znamená, že zhruba kolem roku 2029 by se ve skladištích tamních recyklačních dvorů začaly hromadit stovky tisíc tun solárních panelů. Inženýři Fraunhoferova institutu ve spolupráci s recyklační

společností proto vyvinuli metodu, která komplexně řeší materiálovou návratnost. A dokáže i z křemíkových polovodičů získat surovinu pro tvorbu nových solárních článků.

Hmotnost všech momentálně instalovaných solárních panelů v Německu se blíží 5 mil. tun. Tento údaj, názorně dokládající narůstající popularitu OZE, současně demonstruje váhu problému, s nímž se v dohledné době budou potýkat specializovaná recyklační zařízení. Nejen v Německu, ale i ve světě, kde se hmotnost solárních instalací blíží dalším 55 milionům tun. Solární panely sice nabízejí čistou energii, ale jejich životní cyklus se zatím bohužel nedal považovat za zcela uzavřený nebo dlouhodobě provozně udržitelný. Tři objemově nejpatrnější komponenty solárních panelů – sklo, hliník a plasty – sice recyklovat umíme, ale pořád tu ještě zůstával velmi výrazný podíl nezpracovaného křemíku, a strategických nedostatkových surovin, jako jsou stříbro, měď a indium.
Křemík je surovinou pro výrobu polovodičů solárních článků, s jejíž materiálovou návratností se dosud příliš neoperovalo. Inženýrům Fraunhoferova institutu v partnerské spolupráci s vývojáři z Centra pro křemíkovou fotovoltaiku CSP a techniky z oddělení Systému solární energetiky ISE, v návaznosti na německý recyklační gigant Reiling GmbH & Co. KG, se podařilo vyvinout metodu procesního zpracování křemíku, znovu-použitelného pro výrobu nových solárních panelů.
Princip recyklace solárních článků tkví v separaci fragmentů solárních článků, oddělených během mechanického drcení. Následuje třístupňové chemické „mokré“ čištění, při němž jsou například odstraňovány stopy povrchových filmů. Takto ošetřený křemík je pak zpracováván do podoby ingotů (buď monokrystalické nebo kvazi-monokrystalické), z nichž se pak „krájí“ plátky (wafery), které je možné znovu využít při výrobě dalších solárních panelů bez dalších příměsí a dodatečných doplňků jakostního křemíku.
Inženýři Fraunhoferova institutu z tohoto recyklátu vytvořili nové PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) solární články. Jejich konverzní efektivita během zkoušek dosahovala 19,7 %, což je sice pod hranicí 22,2 %, které v té době dosahovaly úplně nové PERC solární články, ale je to výrazně nad limitem efektivity, s níž pracují staré solární panely. Velký přínos německých inženýrů tkví hlavně v tom, že přišli s metodou recyklace křemíku škálovatelnou na reálná měřítka průmyslové recyklace. Navržené procesní zpracování umožňuje recyklaci všech typů krystalických křemíkových modulů, bez ohledu na jejich typ konstrukce, původ, výrobce. Je to metoda technicky univerzální.

13.2. Recyklace lithiových baterií 3)

Když lithium-iontová baterie dosáhne konce své životnosti, podstoupí baterie mechanickou metodu předběžné úpravy, při které vznikne černý materiál obsahující lithium, nikl, mangan, kobalt a nežádoucí nečistoty, jako je fluorid. Tyto nečistoty mohou způsobit významné problémy s korozí a kontaminací v následných krocích hydrometalurgického zpracování.

Předmětem probíhajících výzkumů je nalézt dostupnou techniku ke snížení kontaminace fluoridy na konzistentní úroveň, která by umožnila efektivnější integraci černé hmoty do navazujícího hydrometalurgického procesu zpracování.

Podle studie Evropské federace pro dopravu a životní prostředí by více než pětina lithia a také přes 60 % kobaltu potřebného k výrobě baterií mohla v roce 2035 pocházet z recyklace.

13.3. Recyklace lopatek větrných turbín 4)

Turbíny se z většiny skládají z betonu a oceli (90-95 %), zbytek tvoří kovy, PVC, elektrošrot, mechanické kapaliny a kompozitní materiály. Většina součástí větrné turbíny – včetně věže, převodovky a generátoru je vyrobena z materiálů, které jsou již dnes jednoduše recyklovatelné. Z hlediska recyklace a následného opětovného využití představují jedinou skutečnou výzvu lopatky rotoru. Ty se vyrábějí z vyztuženého sklolaminátu či uhlíkového vlákna, tedy kompozitních materiálů, které je technologicky složité recyklovat. Na rozdíl od termoplastů není tyto složité polymery možné roztavit.
Životní cyklus větrné turbíny je přibližně 20–25 let. Asociace WindEurope v roce 2020 odhadovala, že do roku 2023 bude třeba v Evropě odmontovat přibližně 14 000 lopatek větrných turbín; s postupným dožíváním turbín instalovaných po roce 2000 bude toto množství dále růst. Přibližně 85 % větrných turbín je již recyklovatelných. Tradičně se průmysl vypořádává se zbytky větrných turbín jejich ukládáním na skládky nebo spalováním v cementárnách – a spalování skleněných vláken také není pro životní prostředí dobré. Od roku 2020 společnost Veolia přeměňuje lopatky větrných turbín GE Renewable Energy na surovinu pro použití při výrobě cementu, čímž nahrazuje uhlí, písek a jíl potřebné k výrobě cementu. Výsledkem je snížení emisí CO_2 o 27 %. Ve hře je také využití termochemických metod recyklace např. plazmového zplyňování.

13.4. Recyklace elektroniky 5)

V ČR se v roce 2024 sebralo rekordních 194 tisíc tun odpadních elektrických a elektronických zařízení, tj. 17,8 kg na obyvatele. Úroveň sběru dosáhla 67 % a překročila tak cíl EU 65 %. Při recyklaci elektroodpadu však nejde o prosté znovuvyužití základních desek a dalších součástek, nýbrž o získání cenných materiálů, jako jsou drahé a kritické kovy. Jejich získávání je nejen finančně výhodné, ale zčásti také snižuje potřebu těžby. Podle studie univerzit Tsinghua a Macquarie z roku 2018, založené na datech čínských recyklačních firem, bylo získávání zlata a mědi z elektroodpadu až 13krát levnější než jejich těžba z přírodních zdrojů. Recyklací tedy chráníme životní prostředí před nebezpečnými látkami a zároveň šetříme primární suroviny. Vzhledem k tomu, že elektronika obsahuje řadu materiálů a součástek, je proces recyklace mnohastupňový a náročný.

Hlavním cílem je získat zpět drahé kovy. To se provádí extrakcí v tavenině, kyanidovým louhováním, sulfáto-nitrátovou cestou nebo elektrolýzou. Jedná se o poměrně náročné technologie, které často nejsou příliš ekologicky šetrné.
Chytré telefony jsou zdrojem mnoha znovu využitelných materiálů. Jeden chytrý telefon obsahuje cenné kovy v hodnotě přibližně 130 korun (při cenách kovů v září 2026), z toho zhruba tři čtvrtiny připadají na zlato. Recyklací jednoho milionu mobilních telefonů je možné získat až 16 tun mědi, 350 kg stříbra, 34 kg zlata a 15 kg palladia. Míra opětovného získání použitých kovů činí více než 90 %. Konkrétně jde o 99 % u mědi, 98 % u zlata a 90 % u stříbra, palladia a platiny.

Jedním z praktických příkladů aktivit v ČR je Centrum CirkTech, které se zaměřuje na lithium a technologie pro cirkulární ekonomiku. **6)**
VŠCHT Praha otevřela 24. června 2021 výzkumné centrum CirkTech, které se zabývá výzkumem pokročilých mechanických a chemických procesů pro cirkulární ekonomiku. Prvním úkolem bude ověření vlastní patentované technologie na získávání nedostatkového kovu lithia. Centrum je součástí Technoparku Kralupy a sídlí v areálu společnosti Holcim Česko (dříve Lafarge Cement) v Čížkovicích nedaleko Lovosic. Jeho klíčovým zařízením je experimentální rotační pec.
VŠCHT vybudovala CirkTech z vlastních prostředků ve výši 40 milionů korun, roční provozní náklady se mají pohybovat kolem 20 milionů. CirkTech plánuje v první fázi úzkou spolupráci se společnostmi Lafarge Cement, a.s. (dnes Holcim Česko, a.s.) Čížkovice, ČEZ, a.s., Geomet s.r.o., VÚHU, a.s. Most, ale i s Ústeckým krajem nebo Univerzitou J. E. Purkyně.
V současném světě se rychle prosazují principy cirkulární ekonomiky, která produkuje minimum odpadů a udržuje zdroje co nejdéle v oběhu. Jde o byznys model budoucnosti. Cirkulární ekonomika má nahradit stávající lineární systém „vytěžit-vyrobit-vyhodit" modelem hospodářství, kde se už při navrhování výrobků počítá s jejich recyklovatelností nebo remanufacturingem a téměř veškerý odpad nachází nějaké využití. Hlavní brzda rozvoje cirkulární ekonomiky v ČR – skládkování – bude podle zákona o odpadech nahrazeno do roku 2030 spalováním a především recyklací.
VŠCHT Praha dlouhodobě patří mezi vedoucí vědecko-výzkumné instituce v oblasti chemicko-fyzikálních technologií se zaměřením na bezodpadové a ekologické technologie v rámci projektů cirkulární ekonomiky.

13.5. Lithium

Technologie získávání lithia vyvinutá centrem CirkTech je ve zkušebním provozu od května 2021. Prvotním cílem je ověřit v poloprovozním měřítku vlastní patentovanou technologii InCeMet. Podstata technologie spočívá v synergické integraci metalurgického postupu s cementářskou výrobou pro ekonomicky efektivní získávání lithia (a dalších hodnotných složek lithných slíd) společně s ceněnými nízkoalkalickými slínky nebo nedostatkovou granulovanou struskou, které jsou surovinami cementářských výrob. Postup je krytý 2 národními patenty a mezinárodním patentem.
Technologie přináší také univerzální bezodpadový postup vhodný především pro získávání kovů z různých velkoobjemových odpadů (plasty, keramika, popílky apod.), je použitelná pro ekologickou recyklaci různých kovů nebo využití druhotných surovin, jako jsou například elektrárenské popílky, na komerční výrobky.
Výhodou je, že technologii je možné aplikovat ve stávajících velkokapacitních cementářských pecích bez nutnosti zásadních technologických úprav. V blízké budoucnosti se chtějí zaměřit na zpracování různých odpadů, které jsou dnes spalovány nebo skládkovány, především kovonosných materiálů.

Aktuálně připravované projekty centra CirkTech

- Procesy spojené se získáváním lithia (Li_2CO_3**)** a jeho následným zpracováním
- Recyklace Li baterií

- Získávání kovů z druhotných surovin (odpadů)
- Využití elektrárenských popílků jako zdrojů kovů a suroviny pro vysokopecní strusku
- Zpracování severočeských jílů – zdroje kovů a vysokopecní strusky
- Likvidace/přepracování odpadů a studium vlivu těchto procesů na výsledný cementářský slínek a životní prostředí
- Procesní inženýrství – vytváření bilančních modelů a jejich zpětná verifikace v praxi pro nejrůznější materiály a provozní podmínky

Další výzkumná témata

- Procesy spalování různých paliv
- Recyklace – zpracování solárních panelů
- Emise – sledování emisí a jejich snižování
- Výzkum odpařování těkavých škodlivin a těžkých kovů v rotační peci
- Možnost odstraňování těkavých škodlivin ze suroviny vysokoteplotním výpalem
- Experimentální výpaly různých druhů slínku

Návrh výzkumných témat pro českou chemickou VaV:

1. Poloprovozní ověření technologie získávání lithia a jeho následné zpracování

2. Vývoj technologií pro recyklaci baterií

3. Vývoj technologie recyklace solárních článků

4. Vývoj technologie získávání vzácných kovů z recyklace elektroniky

5. V rámci strategie transformace zařadit konkrétní úkoly cirkulární ekonomiky

Zdroje:

1) *Institut cirkulární ekonomiky (incien.org) 9. 5. 2022*

2) *Punathil L. a kol.: Recovery of Pure Silicon and Other Materials from Disposed Solar Cells International Journal of Photoenergy, Volume 2021, Article ID 5530213 https://doi.org/10.1155/2021/5530213*

3) *RecycLiCo Battery Materials Receives Funding for Feasibility Study on Black Mass Material from End-of-Life Lithium-ion Batteries, Investing News Network, 17. 8. 2022*

4) *FACT SHEET RECYKLACE VĚTRNÝCH TURBÍN, TAČR https://hub.cirkularnicesko.cz/wp-content/uploads/2020/01/12_info_recyklace_vetrnych_turbin.pdf*

5) *Bolt CH. Electronics Recycling: Get Rid of Old Electronics Environmental Conservation Company Green Citizen 2021-10-03*

6) *Petrák M.: Příspěvek k SVA o zaměření Centra CirkTech, březen 2022*

14. Průmysl 4.0

Záměry v oblasti klimatických změn, bezpečnosti ve využívání chemikálií, rostoucí deficit kritických surovin a vody, ale také rostoucí populace vyžadují zásadní urychlení technologického vývoje na vyšší technologické úrovni a zcela nové koncepce.
Čtvrtá průmyslová revoluce – Průmysl 4.0 je označení pro současný trend digitalizace, s ní související automatizace výroby, využívání umělé inteligence, ale také změn obchodních modelů, změn na trhu práce. Využívání digitalizace, robotizace, umělé inteligence, nových obchodních modelů a dalších nástrojů průmyslu 4.0 je nutností v dnešním hyperkonkurenčním prostředí. Průmysl 4.0 se všemi svými nástroji významným způsobem mění ekonomiku, způsob našeho myšlení i našeho života. Koncept průmyslu 4.0 tedy nepředstavuje pouze vznik a používání nových technologií, nýbrž úplně novou filozofii transformující celou společnost.

V ČR již v roce 2016 schválila vláda Iniciativu Průmysl 4.0 1) a v roce 2018 program Digitální Česko 2). Aktuální rámec tvoří Národní strategie umělé inteligence ČR 2030, kterou vláda schválila v roce 2024. Strategie se opírá o sedm pilířů, mezi něž patří výzkum a inovace, vzdělávání, bezpečnost a podpora zavádění AI v průmyslu a malých a středních podnicích, a na její realizaci je vyčleněno přibližně 19 mld. Kč. Na evropské úrovni stanoví pravidla pro vývoj a používání AI nařízení (EU) 2024/1689 o umělé inteligenci (AI Act). Jeho povinnosti nabíhají postupně; požadavky na vysoce rizikové systémy AI byly v roce 2026 odloženy na 2. 12. 2027 (samostatné systémy), resp. na 2. 8. 2028 (systémy zabudované do výrobků). Pro chemický průmysl je zásadní Evropský akční plán pro chemický průmysl z 8. 7. 2025. Reaguje na vysoké ceny energií, nekalou mezinárodní konkurenci a slabou poptávku a obsahuje:

- zřízení Aliance pro kritické chemické látky (zahájena v říjnu 2025),
- opatření na snížení cen energií,
- nástroje na podporu poptávky po nízkouhlíkových a cirkulárních chemikáliích,
- zjednodušující legislativní balíček (tzv. 6. omnibus), který má průmyslu ušetřit přibližně 363 mil. EUR ročně.

Současné trendy Průmyslu 4.0:

- Uplatnění umělé inteligence – díky IoT budou veškeré senzory, kamery, vysílače zařízení a čtečky kódů komunikovat a do jisté míry řídit výrobu samy, roli hrají velká data, jejich zpětné využívání a efektivní recyklace znalostí.
- Systémové inženýrství – spolupráce a propojení více inženýrských profesí při výrobě komplexního výrobku
- Robotizace
- Reverzní inženýrství – 3D skenování výrobku a jeho převod z reálné podoby do 3D modelu
- Aditivní výroba – podporující end-to-end vizi Průmyslu 4.0 ve výrobě prototypů díky 3D tisku a aditivní výrobě
- Změna business modelů – propojování výrobní činnosti s poskytováním služeb zákazníkům.

Co přináší digitalizace:

• Zkrácení času potřebného k uvedení nového výrobku na trh a větší diferenciaci a vyšší flexibilitu produkce podle potřeb jednotlivých zákazníků bez ztráty kvality.
• Vyšší kvalitu a prodloužení životnosti výrobků – k zajištění vysoké kvality výrobků a splnění právních požadavků musí firmy zavést takové systémy řízení kvality, které umožní zpětně vysledovat výrobní procesy a dohledat informace o výrobku.
•Zvýšení efektivity – nejen produkty musí být šetrné k životnímu prostředí. Trvale udržitelná musí být také výroba. S tím souvisí zvyšování energetické a materiálové účinnosti a efektivita průmyslové výroby. To představuje významnou konkurenční výhodu.
• Změnu business modelu – Digitalizace umožňuje chemickým společnostem shromažďovat rozsáhlá data, která lze vyhodnotit a využít ke zlepšení provozních procesů a budování nových obchodních modelů.
• Zvyšování bezpečnosti.

Uplatnění konceptu Průmysl 4.0 v chemickém průmyslu je mimořádné. Podrobněji se tímto tématem zabýváme v Aktualizované CM SUSCHEM CZ. Obvykle mluvíme o konceptu Chemistry 4.0. Ten zahrnuje digitální procesy, přepracování designu, recyklace, snižování dopadu na životní prostředí, odstraňování zbytků a další**. 4)**
Investice do digitalizace mají zásadní význam pro růst všech průmyslových firem bez ohledu na jejich velikost nebo odvětví. Je to velká příležitost pro MSP, jak to prokázaly některé firmy se zavedenou aditivní výrobou při pandemii a operativně byly schopné přinést na trh potřebné výrobky.

Navrhovaná opatření pro českou VaV:

- Zapracování Chemistry 4.0 do dlouhodobé strategie transformace. To se týká nejenom výrobních podniků, ale i vysokých škol a výzkumných pracovišť s respektováním jejich specifik.
- Podpora těch českých firem, které mají úspěchy s vývojem a implementací moderních řídicích systémů (např. společnost ZAT a.s**.** Příbram, Easy Software Praha a další)
- Přehodnocení studijních programů na vysokých školách
- Rozvoj aplikací digitalizace a umělé inteligence při vývoji nových materiálů pro AM
- Podporovat vytváření klastrů mezi řešiteli výzkumných úloh a potenciálními investory, zejména z oblasti inovativních MSP
- V souvislosti s digitalizací a automatizací výrob je třeba se zaměřit na provozní a počítačovou bezpečnost.
- Zvyšování energetické a materiálové účinnosti procesních technologií

Zdroje:

1. Iniciativa Průmysl 4.0, schválená vládou v roce 2016
2. Program digitální Česko schválený vládou 3. října 2018
3. Welcome to chemistry 4.0, https://www.chemistryworld.com › 4013370.article Mar 29, 2021
4. Aktualizovaná Cestovní mapa průmyslové modernizace a zavádění pokročilých technologií v chemickém průmyslu ČR.SUSCHEM CZ listopad 2022

14.1. Pokročilé procesy a zařízení

Světová globalizace znamená pro výrobce nutnost neustále optimalizovat své výrobní postupy. Změny, ke kterým dochází v rozhodujících mezinárodních koncernech, jsou obzvláště patrné v chemickém průmyslu. Intenzifikace procesů je účinným nástrojem pro udržení konkurenceschopnosti nejenom chemických výrob, ale i v jiných, navazujících průmyslových odvětvích. Intenzifikace procesů představuje soubor radikálně inovativních principů při navrhování procesů a zařízení, které mohou přinést významné výhody z hlediska efektivity procesů a hodnotového řetězce, kapitálových a provozních nákladů, kvality produkce, spotřeby energií, vody a surovin, minimalizace odpadu, zvyšování bezpečnosti procesů a také zlepšení firemní image ve veřejnosti inovací výroby, přívětivé z pohledu ochrany životního prostředí. Různé chemické procesy využívá nejenom chemický průmysl, ale také řada dalších odvětví jako energetika, vodní hospodářství, farmacie, zpracování odpadů, potravinářský průmysl a další. Aplikace využívající nejrůznějších fyzikálně-chemických procesů patří mezi hot topic současné vědy a výzkumu a je jedním z KETs technologií. Hlavním požadavkem současné doby je snižování energetické a materiálové náročnosti výroby. Více než 85 % chemických procesů využívá katalyzátory. V průmyslové chemii se realizují především exotermní procesy a využití reakčního tepla nabízí mnoho možností úspor.

Chemické procesy jsou jednou z klíčových znalostních domén a česká VaV se touto problematikou intenzivně zabývá. Mezi špičková pracoviště v tomto oboru patří Ústav chemických procesů AV ČR, v. v. i., ale také VŠCHT Praha, ORLEN UniCRE Ústí nad Labem a další. Jsou řešeny otázky v oblasti chemického inženýrství, fyzikální chemie, chemické technologie a biotechnologie, katalyzátorů, petrochemie, cirkulárních technologií pro zpracování odpadů na bázi biomasy a plastových odpadů.

Za pozitivní trend považujeme, že řada projektů je řešena ve spolupráci s konkrétními budoucími uživateli z průmyslu. **1)**

14.2. Optimalizace procesů

Jednou ze základních cest ke zvýšení konkurenceschopnosti a udržitelného rozvoje jsou procesy intenzifikace stávajících výrobních procesů v chemickém průmyslu, energetice, farmacii a v dalších odvětvích. Jejich cílem je výrazné zvýšení efektivnosti využívání zdrojů z hlediska spotřeby materiálu a energií, což má zajistit další ekonomickou udržitelnost procesů do budoucna. Potřeba účinnějších procesů, včetně dalších flexibilních konstrukčních návrhů a současně zvýšení bezpečnosti a snížení environmentálního dopadu těchto procesů, vyvolává požadavky na nový výzkum v této oblasti. Zlepšení transportních procesů v chemických reaktorech hraje klíčovou úlohu při intenzifikaci procesů, povede rovněž ke kompaktnějším a efektivnějším zařízením a umožní lepší integraci procesů, což zase vede ke snížení počtu procesních kroků (např. multifunkční reaktory). Intenzifikace procesů katalýzou a integrace katalýzy s jinými technologiemi (např. membránovými technologiemi) povede rovněž ke snížení počtu kroků procesu.

Optimalizace surovin a výrobních technologií může přinést zvýšení cirkulace, je součástí postupné náhrady fosilních surovin.

Jedním z řešení, které by se mohlo vypořádat s vysokou spotřebou energie, je zvýšení rekuperace tepla v průmyslových procesech a jeho přesměrování tam, kde je potřeba (integrace procesů tepla a elektřiny). Příkladem je zpětné získávání odpadního tepla napodobující přirozené chemické reakce v místě výroby polyolefinů.
Snížení spotřeby materiálů může přinést vývoj procesů, které fungují v bezvodých médiích, stejně jako snížení a rekuperace škodlivých rozpouštědel a činidel používaných ve výrobních procesech.
Silný a mnohonásobný dopad může být generován podporou implementace stávajících procesů (např. integrace procesů s rozpouštědlem) nebo optimalizací a intenzifikací procesů, podpořenou vyčerpávající in-line implementací zcela nových chemických řešení PAT (Process Analytical Technologies).
Další skupinu optimalizačních řešení představují substituce nebezpečných procesů. Procesy, které jsou ze své podstaty nebezpečné, lze zcela nahradit nebo upravit. To může pomoci řešit také zvýšení bezpečnosti, snížení prašnosti a emisí.
Podrobně jsme tuto oblast zpracovali ve Strategické výzkumné agendě IV včetně přehledu doposud řešených projektů a technických základů možností intenzifikace procesů a zařízení. **2)**

V CM SUSCHEM CZ jsou uvedeny očekávané přínosy z realizace řešených projektů. Jako příklad lze uvést: **2)**

- Snížení spotřeby neobnovitelných primárních surovin až o 20 % ve srovnání se současnou spotřebou zvýšením výtěžků chemických a fyzikálních transformací a / nebo použitím sekundárních surovin (prostřednictvím optimalizovaných recyklačních procesů) a obnovitelných surovin
- Nové bio založené produkty v průměru sníží emise CO_2 nejméně o 50 % ve srovnání s jejich fosilními alternativami
- Rekuperace 15 % ztrát tepla a s tím spojené snížení nákladů na energii a emisí CO_2 prostřednictvím optimalizace procesu
- O 10 až 20 % nižší výrobní čas a 10 % méně off-gradů prostřednictvím senzorů a použitím nejlepších žáruvzdorných materiálů.

V chemickém průmyslu je optimalizace metodou, která se snaží vyřešit problém minimalizace nebo maximalizace účelové funkce, která spojuje proměnnou pro optimalizaci s konstrukčními a provozními proměnnými. Kritéria pro analýzu funkce ekonomického cíle zahrnují splnění procesních kritérií, omezení podmínek návrhových rovnic a respektování limitů proměnných. Většina problémů v chemickém inženýrství má mnoho řešení. Optimalizace souvisí s výběrem možnosti, která je nejlepší v řadě účinných možností, ale je jediná, která se nejvíce blíží ekonomickému optimálnímu výkonu a provozu.**3)**
Příklady z ČR:
Orlen Unipetrol úspěšně zavedl výrobu dicyklopentadienu z lehkého pyrolýzního benzinu. Technologii vyvinuli výzkumní pracovníci ORLEN Unipetrolu ve spolupráci s Vysokou školou chemicko-technologickou v Praze v rámci dlouhodobého strategického projektu efektivního využití vedlejších produktů ethylenové jednotky. Nový produkt má vyšší přidanou hodnotu a otvírá další možnosti pro rozvoj výroby udržitelných polymerních materiálů, pryskyřic a chemických specialit s širokým uplatněním (včetně optických vláken, speciálních čoček, lékařských komponent, automobilových komponent).

Spolchemie řešila změnu vstupní suroviny pro výrobu epichlorhydrinu používaného pro přípravu epoxidových pryskyřic. Doposud se vyráběl z omezeného fosilního zdroje – propylenu. Nový postup vychází z glycerínu, který vzniká při výrobě bionafty. Tak se podařilo připravit světově první a zatím jedinou epoxidovou pryskyřici certifikovanou v environmentálním systému EPD (LCA) Environdec.
Současně se snížily dopady na životní prostředí a uhlíková stopa. Tento projekt je součástí konceptu Zelená Spolchemie.

Modernizací technologie výroby titanové běloby v Precheza a.s. bylo dosaženo intenzifikace výroby o 280 % na stávajících kalcinačních pecích.

14.3. Pokročilá zařízení a aparáty

Touto problematikou se podrobně zabýváme v SVA SUSCHEM CZ 4. **1)**. Doplnění si vyžádalo zejména zařazení Jaderné energetiky do současné SVA a zařízení související s postupnou elektrifikací chemického průmyslu.

14.4. Malé jaderné reaktory

Světový vývoj v řadě zemí se orientuje na SMR s významnou finanční podporou státu (např. USA, Velká Británie, Kanada, Japonsko, Jižní Korea, Čína, Polsko, Litva a další).

SMR (small modular reactors, malé modulární reaktory) jsou většinou definovány jako sériově vyráběné reaktory s výkonem do 300 MW a s poloměrem ochranné zóny do 300 metrů. Za SMR se většinou nepovažují reaktory, fungující v jaderných ponorkách.

Vzhledem k jejich velikosti se nabízí umístění do průmyslových závodů jako hlavního a spolehlivého energetického zdroje. SMR mohou být využity pro výrobu elektřiny, tepla, nebo vhodného energetického nosiče, například vodíku – výroba vodíku může být využívána např. pro regulaci výkonu SMR.

Obecně se očekává vysoká míra recyklace vyhořelého jaderného paliva – vyhořelé palivo bude možné dále energeticky využívat v tzv. rychlých reaktorech (ať již budou splňovat definici malého jaderného reaktoru, nebo ne), čímž dojde k produkci energie i k mnohonásobnému snížení radioaktivity suroviny. Další výhodou rychlých reaktorů je možné využití štěpitelných (fertilních) izotopů uranu-238 a thoria-232, a tedy mnohonásobné zvětšení dostupné suroviny pro jaderné reaktory.

14.4.1. Srovnání SMR a velkých jaderných reaktorů

Mezi výhody SMR patří sériová výroba v továrně a výrazně jednodušší převoz modulů a následně jejich bezproblémové sestavení na místě.

- Charakteristickým znakem SMR je jejich rozčlenění na moduly, které se z větší části konstruují již ve výrobním závodě a na místě instalace zdroje se jednoduše pospojují do funkčního celku.
- Modularita pomůže významně zkrátit dobu výstavby – komponenty budou na lokalitu dopraveny již jako celky a na místě pouze propojeny. A to je důležité i z hlediska zajištění kvality, kdy výroba v ideálních podmínkách tovární haly zajišťuje snazší dosažení kvality než kompletace z jednotlivých součástek na staveništi.
- Dalším důležitým aspektem SMR je možné prodloužení palivové kampaně na několik let až desetiletí a přesunutí operací spojených s výměnou paliva do specializovaných závodů. Modul reaktoru by se kvůli výměně odvezl do závodu a v elektrárně by se nahradil jiným – s novým palivem. SMR poskytují vyšší míru bezpečnosti, obvykle s prvky tzv. inherentní bezpečnosti, s cílem omezit zónu havarijního plánování, ideálně na hranici elektrárny. SMR aplikují zejména pasivní bezpečnostní systémy, potřebnost aktivních bezpečnostních systémů je minimalizována.

Při umístění SMR na plovoucí platformu mohou vznikat plovoucí jaderné elektrárny, použitelné v oblastech poblíž mořského pobřeží. Uvažuje se rovněž o umístění modulů na železniční vagony nebo na kamiony, kterými by se jaderné zdroje a technologie dopravily do míst, kde bylo postavení jaderné elektrárny doposud nemyslitelné. Své výhody budou mít i stacionární zdroje založené na malých modulárních reaktorech. Většina nebo část jaderné technologie může být umístěna pod zem včetně kontejnmentu. Podobný jaderný zdroj bude možné umístit například do lokality vyřazené uhelné elektrárny.

14.4.2. Vyvíjené SMR 4, 5)

Mezinárodní agentura pro atomovou energii vydala v roce 2020 ucelený celosvětový přehled projektů SMR. Z více než 70 projektů byl tehdy komerčně využíván pouze jeden (KLT-40S na plovoucí elektrárně Akademik Lomonosov – Rusko), dva projekty měly charakter výzkumných reaktorů (HTR-10 v Číně a HTTR v Japonsku) a dva byly v realizační fázi (CAREM v Argentině a HTR-PM v Číně). Čínský vysokoteplotní HTR-PM je v komerčním provozu od prosince 2023; výstavba CAREM byla v roce 2024 opět zastavena. Všechny zbylé projekty, včetně dvou z ČR, jsou v různých fázích návrhů, eventuálně posuzovány dozornými orgány.
Zkušenosti ze zahraničních projektů SMR ukazují, že dotažení koncepčních projektů SMR do realizační fáze trvá řádově desítky let (CAREM – vývoj od roku 1984, provoz dosud nezahájen; KLT-40S – od roku 1998 do května 2020, kdy byl zahájen komerční provoz; NuScale (USA) – vývoj od roku 2003, první projekt UAMPS byl v roce 2023 zrušen).

Nejdále ve vývoji SMR pokročily firmy z jaderných mocností, jejichž vlády pokrok v oblasti jaderných technologií různými způsoby přímo podporují. Týká se to USA, Ruska, Číny, Francie

i Velké Británie. Technologie SMR vyvíjí rovněž Kanada, Jižní Korea, Indonésie, Argentina a Saudská Arábie.

Kalifornská společnost Oklo získala v roce 2019 od ministerstva energetiky USA povolení k umístění rychlého mikroreaktoru Aurora (1,5 MW) v Idaho National Laboratory; žádost o licenci však americký dozor NRC v roce 2022 zamítl. Přepracovaný reaktor Aurora o výkonu 75 MWe začala firma stavět v září 2025 v rámci pilotního programu ministerstva energetiky, spuštění plánuje na rok 2028; počítá se i s dodávkami pro datová centra. V roce 2020 se SMR americké firmy NuScale Power stal prvním projektem tohoto druhu, který obdržel od NRC schválení projektu (standard design approval). Jeho první realizace pro UAMPS však byla v roce 2023 z ekonomických důvodů zrušena.

V březnu 2021 slíbila kanadská vláda 45 milionů USD (téměř jednu miliardu korun) na podporu vývoje 300MW solného reaktoru společnosti Moltex Energy Ltd. V srpnu 2026 uzavřela kanadská společnost Nuclea Energy (Ontario) konečnou dohodu o převzetí celého technologického portfolia Moltexu (80 patentů, reaktor SSR-W a recyklační proces WATSS); dokončení transakce podléhá schválení podle britského zákona o národní bezpečnosti a investicích. V roce 2026 došlo ke schválení masivní podpory SMR v rámci nové jaderné strategie Kanady. Nejdále je projekt OPG v Darlingtonu u Toronta, kde se staví první ze čtyř plánovaných reaktorů BWRX-300 od GE Vernova Hitachi. Licenci k výstavbě první jednotky vydal kanadský dozor CNSC v dubnu 2025, připojení k síti se plánuje do konce roku 2030. Tento model mimochodem detailně studuje i český ČEZ. Mezi projekty v kanadském licenčním řízení patří například mikroreaktor v Chalk River (Ontario). Původně ho připravovala společnost Global First Power s vysokoteplotním plynem chlazeným reaktorem MMR americké firmy USNC. Po bankrotu USNC v roce 2024 převzala Global First Power v říjnu 2025 americká společnost NANO Nuclear Energy. Ta projekt přepracovává na svou technologii KRONOS MMR a připravuje žádost o licenci k přípravě lokality. Dalším projektem je sodíkem chlazený reaktor ARC-100 o výkonu 100 MWe v lokalitě Point Lepreau (New Brunswick). Jeho projekt v červenci 2025 úspěšně prošel 2. fází předběžného posouzení kanadským dozorem CNSC. Žádost o licenci k přípravě lokality podaná v roce 2023 je stále v řízení a uvedení do provozu je plánováno kolem roku 2029, v závislosti na povolení.

V dubnu 2021 schválila první projekt SMR o výkonu 125 MW také čínská vláda. Výstavba je dokončena: čínský projekt Linglong One (technologie ACP100) v jaderné elektrárně Čchang-ťiang v ostrovní provincii Chaj-nan se aktuálně nachází ve fázi uvádění do provozu (komisioningu) a spuštění je naplánováno na konec roku 2026. Jedná se o vůbec první komerční malý modulární reaktor na světě na bázi tlakovodní technologie (PWR), který byl postaven na pevné zemi. Na rozdíl od klasických velkých elektráren (jako je Temelín) má Linglong One parogenerátory, hlavní oběhová čerpadla i kompenzátor tlaku integrované přímo uvnitř jedné jediné reaktorové nádoby. To dramaticky snižuje riziko havárií spojených s prasknutím vnějšího potrubí a umožňuje kompletní montáž v továrně a následný dovoz na staveniště jako jeden celek. Kromě výroby elektřiny pro zhruba 526 000 domácností bude elektrárna využívána k odsolování mořské vody, dálkovému vytápění a dodávkám průmyslové páry pro přilehlý chemický park v provincii Chaj-nan. Francouzský energetický gigant EDF musel v polovině roku 2024 přiznat, že původní, technologicky velmi inovativní design reaktoru Nuward (který se skládal ze dvou integrovaných 170MW bloků) narazil na

vážné inženýrské překážky a neúměrně vysoké náklady. Odhadovaná cena elektřiny z tohoto zdroje hrozila překročit kritickou hranici 120 USD/MWh. Projekt byl proto dočasně pozastaven, původní vedení bylo vyměněno a došlo k úplnému restartu celé produktové strategie. Původní koncept dvou menších provázaných reaktorů byl zcela opuštěn. Nový, zjednodušený design Nuward SMR počítá s jedním monoblokem, který nabídne elektrický výkon až 400 MWe doprovázený možností kogenerace (dodávky tepla) o výkonu 100 až 115 MWt. V lednu 2026 byla oficiálně zahájena třetí fáze společného předběžného hodnocení bezpečnosti (Joint Early Review) reaktoru Nuward. Na tomto unijním procesu se podílí osm evropských jaderných regulátorů včetně francouzského ASNR (dříve ASN), nizozemského ANVS a českého Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Cílem je harmonizovat legislativu, aby reaktor získal licenci pro celou Evropu bez nutnosti měnit projekt v každé zemi zvlášť.

14.4.3. Rozdělení SMR 6) 7)

SMR je možné rozdělit podle několika kritérií, podle pracovního oběhu například takto:
1. LEHKOVODNÍ MALÉ REAKTORY CHLAZENÉ A MODEROVANÉ OBYČEJNOU VODOU
Do této skupiny spadá většina malých reaktorů, vycházejících z osvědčených projektů tlakovodních (PWR) a varných (BWR) reaktorů. Jedná se dnes o nejvyspělejší technologii, známou z provozovaných velkých reaktorů, která je doplněna o prvky pasivní bezpečnosti a využívá v určité míře zjednodušení a integraci komponent primárního okruhu do prostoru tlakové nádoby.

2. VYSOKOTEPLOTNÍ PLYNEM CHLAZENÉ MALÉ REAKTORY
Skupina perspektivních reaktorů, umožňujících kromě výroby elektřiny dodávku vysokopotenciálního tepla pro potřeby průmyslových aplikací, výrobu vodíku nebo kogeneraci.

3. MALÉ REAKTORY PRACUJÍCÍ S RYCHLÝMI NEUTRONY
Inovativní návrhy a koncepce rychlých reaktorů chlazených sodíkem, roztaveným kovem nebo plynem.
4. MALÉ MODULÁRNÍ REAKTORY CHLAZENÉ ROZTAVENÝMI SOLEMI
Specifická skupina reaktorů využívající pokročilé technologie účinného chlazení aktivní zóny směsí tekutých (obvykle fluoridových) solí.

Udržitelnost

- co nejefektivnější využití jaderného paliva, které je k dispozici
- možné využití thoria a plutonia z jaderných zbraní jako alternativních jaderných paliv
- minimalizace množství radioaktivního odpadu
- generace jaderného odpadu jen s pokud možno krátkou dobou poločasu rozpadu

Při využití pokročilých palivových cyklů a intenzivní recyklaci paliva, pomocí metod, které jsou vyvíjeny, se předpokládá, že množství odpadu pro konečné uložení bude možné snížit o několik řádů.
Hospodárnost

- nižší náklady oproti jiným druhům zdrojů energie (při zohlednění celého produkčního cyklu)
- srovnatelné finanční a technické riziko s ostatními druhy zdrojů energie
- hospodárné využití tepelné energie k výrobě vhodných energetických produktů, tj. konverze uhlí na uhlovodíky a výroba vodíku
- hospodárné využití tepelné energie k dálkovému vytápění

Bezpečnost

- vysoké bezpečnostní standardy
- velmi nízká pravděpodobnost těžkých poškození reaktorů
- eliminace potřeby externího nouzového zásobování energií
- pokud možno neatraktivní zdroj pro odcizení nebo zneužití štěpného materiálu
- pro provoz by nemělo být nutné obohacování uranu
- maximální úroveň zabezpečení proti teroristickým útokům
- kontejnment by měl být naplněn inertním plynem, pro vyloučení možnosti požáru

14.4.4. Vývoj SMR v ČR

ÚJV Řež je od roku 2010 zapojen do mezinárodního projektu vysokoteplotního reaktoru ALLEGRO s rychlým spektrem neutronů, chlazeného heliem. Řeší se s maďarskými, slovenskými a polskými partnery na jedné straně a francouzskou společností CEA na straně druhé. Další projekt HeFASTo, heliem chlazený rychlý reaktor, je v podstatě koncovou energetickou realizací demonstrátoru ALLEGRO. S komerčním nasazením reaktoru HeFASTo, tj. rychlého heliem chlazeného reaktoru o tepelném výkonu 200 MW s výstupní teplotou chladiva kolem 900 °C, se počítá hlavně v souvislosti s růstem poptávky po masové výrobě vodíku a také s potřebou zpracování nahromaděného vyhořelého paliva z lehkovodních reaktorů, tedy výhledově po roce 2040. Reaktor je zatím ve fázi předkoncepčního vývoje. Jeho realizace navazuje na demonstrátor ALLEGRO, který ÚJV Řež připravuje společně s partnery z Maďarska, Slovenska, Polska a s francouzskou CEA.
Další práce probíhají například ve firmě Czechatom ze skupiny Witkowitz.
Oblast základního výzkumu je soustředěna především do FJFI ČVUT Praha, popřípadě do VŠCHT Praha.

14.5. Jaderné reaktory čtvrté generace

Mezinárodní fórum pro IV. generaci (GIF) je výzkumné sdružení s cílem výzkumu a vývoje budoucích jaderných elektráren. Tyto jaderné elektrárny takzvané čtvrté generace (GIV) by měly splňovat vysoké nároky na bezpečnost, udržitelnost a hospodárnost. První by měly být schopny provozu od roku 2030.

Pohled velké energetické firmy

ČEZ připravuje výstavbu prvního malého modulárního reaktoru Rolls-Royce SMR v lokalitě Temelín (smlouva o přípravných pracích z dubna 2026); spuštění se očekává ve druhé polovině 30. let. Jako další lokality pro SMR byly vytipovány areály stávajících elektráren (např. Tušimice, Dětmarovice).

SMR ve Státní energetické koncepci (SEK)
Platná Státní energetická koncepce z roku 2015 počítá s jadernou energetikou na obecné úrovni jako se součástí energetického mixu, například obsahuje i výběr další lokality pro nový jaderný zdroj. O malých modulárních reaktorech (SMR) však nehovoří, a to ani v oblasti vědy, výzkumu a inovací. Jejich role se od té doby výrazně posílila:

- vláda schválila Cestovní mapu pro rozvoj malých a středních reaktorů v ČR,
- v srpnu 2024 stát uzavřel se společností ČEZ bezpečnostní smlouvu, která mu umožňuje chránit bezpečnostní zájmy při výběru dodavatele SMR,
- v říjnu 2024 zahájil ČEZ posuzování vlivů na životní prostředí (EIA) pro první SMR v lokalitě Temelín,
- v dubnu 2026 uzavřel ČEZ se společností Rolls-Royce SMR smlouvu o přípravných pracích.

Zapojení malých modulárních reaktorů, včetně podpory jejich vývoje a zapojení českého průmyslu a výzkumu, proto považujeme za jedno z důležitých témat připravované aktualizace SEK.

Pohled Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, SÚJB **8)**

SÚJB považuje a bude považovat SMR za jaderné zařízení, obdobně jako jakékoli jiné zařízení obsahující energetický nebo výzkumný jaderný reaktor, nezávisle na jeho tepelném nebo elektrickém výkonu. Z tohoto důvodu je nutno při návrhu SMR vycházet ze všech legislativních požadavků kladených na jaderné zařízení. To se týká i jednotlivých správních řízení pokrývajících celý životní cyklus jaderného zařízení, od jeho umístění, přes výstavbu, uvádění do provozu, provoz až po vyřazení z provozu. Nelze proto předpokládat, že dojde k jakémukoli zmírnění legislativních požadavků a výraznému zrychlení správních řízení. Právě naopak! Všechny zkušenosti z provozu stávajících zařízení, včetně využití zpětné vazby z nehod typu Fukušima nebo Černobyl, musí být v projektech SMR zohledněny.

Pohled prezidenta České nukleární společnosti:

„Vnímáte jako velkou překážku rozvoje SMR skutečnost, že produkují měrně větší množství (resp. aktivitu) jaderných odpadů? (kvůli odlišné geometrii aktivní zóny SMR) nebo to do značné míry vyřeší očekávaný budoucí rozvoj rychlých reaktorů a jejich schopnost přepracovat vyhořelé jaderné palivo?“

„K první části otázky – nemyslím si, že by to byl problém a ani jsem nezaznamenal, že by tuto otázku někdo příliš řešil nebo považoval za problém. Osobně si nemyslím, že SMR jsou efektivním zdrojem výroby elektřiny (a vychází to i z fyzikálních a technických faktů) – tím jsou velké zdroje. Malé reaktory jsou vhodným řešením pro odlehlé oblasti se slabou infrastrukturou nebo mohou posloužit jako zdroje zásobování teplem ve městech, ale neměly by být chápány jako zdroje, které v budoucnu nahradí velké elektrárny.

Druhá část otázky – ano, rychlé reaktory mohou zajistit uzavření palivového cyklu a do budoucna udržitelnost jaderné energetiky.

Iniciace VaV projektu
Provedení předběžné studie proveditelnosti možností a omezení umístění SMR v areálu středně velkého chemického podniku (cca 1000 zaměstnanců) s dostatečnou spotřebou elektrické a tepelné energie. Bezpečnostní aspekty (ochranná zóna jaderného reaktoru vs. zóny havarijního plánování chemického podniku), výkon SMR vs. potřeba podniku (elektřina, teplo), kvalita dodávek energie (teplota a tlak vyvíjené páry), likvidace odpadů z provozu SMR, logistické aspekty (doprava nového a odvoz dožitého zařízení, závoz jaderného paliva), chlazení SMR vč. zvážení možností využití existujících chladicích systémů, způsoby regulace výkonu SMR např. formou akumulace energie ve vodíku, nebo jiném energetickém nosiči. Náklady cca 30 mil. Kč, 3 roky.

Spolupráce s podnikatelskou sférou v oblasti SMR:

MPOWER Engineering, a.s. vývoj komponent pro rychlé reaktory a pro aplikaci v jaderné fúzi
ESTCOM CZ a.s**.** Materiály pro pokročilé jaderné reaktory a další energetické aplikace (vývoj keramických a kovových konstrukčních materiálů s cílem dosáhnout lepší odolnosti; porovnání odolnosti vysokoteplotních slitin dodaných ze sléváren se stejnými slitinami vyrobenými z vratného materiálu po výrobě vysokoteplotních komponent metodou vytavitelného modelu).

ALVEL, a.s. – výzkum a vývoj technologie povrchových úprav povlakových trubek palivových elementů jaderných reaktorů pro zvýšení jejich odolnosti v provozních i havarijních podmínkách a při dlouhodobém skladování.

Škoda JS sleduje situaci v oblasti SMR a je připravena zapojit se do jejich vývoje.
Centrum výzkumu Řež rozvíjí několik konceptů SMR.

Polské Národní agentuře pro atomovou energii byly předloženy dvě žádosti o posouzení technologie malých modulárních reaktorů. Žádost výrobce mědi a stříbra KGHM Polska Miedź SA vychází z návrhu elektrárny VOYGR SMR od společnosti NuScale, zatímco žádost společnosti Orlen Synthos Green Energy počítá s reaktorem BWRX-300 od společnosti GE Hitachi Nuclear Energy.
Orlen Synthos Green Energy (BWRX-300): Tento projekt je v Polsku nejdále. V únoru 2026 podepsaly společnosti GE Vernova Hitachi a OSGE dohodu o generálním polském designu (PGDA), která přizpůsobuje dokumentaci polským předpisům. Dne 29. 6. 2026 podala OSGE žádost o státní podporu ve formě rozdílových smluv (CfD) pro 14 bloků ve třech lokalitách (Włocławek, Stawy Monowskie, Stalowa Wola). Nový harmonogram: První polský komerční reaktor BWRX-300 vyroste v lokalitě Włocławek, jeho spuštění se však z roku 2029 posunulo na rok 2032.

KGHM (NuScale VOYGR): Tento projekt se potýká s velkými komplikacemi. Poté, co společnost NuScale koncem roku 2023 kvůli drastickému zdražení zrušila svůj vlajkový projekt v USA, muselo polské těžařské konsorcium KGHM celý záměr přehodnotit. Oficiálně projekt s upraveným plánem na 6 modulů VOYGR sice stále běží (KGHM schválilo masivní investiční rozpočet do roku 2030), avšak reálné přípravy jsou výrazně zpomaleny. Termín 2029 je v tomto případě již utopií a odhaduje se nejdříve polovina 30. let.

14.6. Elektricky vyhřívaný katalyzovaný reaktor 9)

Dá se předpokládat, že elektricky vyhřívaná krakovací jednotka nebude nový samostatný závod, ale spíše konverze stávajícího konvenčního systému. Tím se ekonomické srovnání liší od ostatních technologií. Emisní faktor takového zařízení pak závisí na energetickém mixu.
Hlavním technologickým problémem je zajistit přenos tak vysokého množství energie v poměrně malém prostoru reaktoru.
Společnosti BASF, SABIC a Linde podepsaly společnou dohodu o vývoji a demonstraci řešení pro elektricky vyhřívané parní krakovací pece. Partneři již společně pracovali na konceptech využití obnovitelné elektřiny namísto fosilních paliv, které se obvykle používají pro proces vytápění. S tímto inovativním přístupem zaměřeným na jeden z klíčových procesů petrochemického průmyslu se strany snaží nabídnout slibné řešení, které významně přispěje ke snížení emisí CO2 v chemickém průmyslu.
K řešení tohoto vývoje je třeba spojit rozsáhlé know-how z vývoje chemických procesů spolu s dlouholetými zkušenostmi a znalostmi v provozu etylenových jednotek s odbornými znalostmi ve vývoji a stavbě technologií parních krakovacích pecí.
Tento technologický skok bude milníkem na cestě k nízkoemisnímu chemickému průmyslu. Nejde jen o vývoj zcela nového konceptu elektrického ohřevu pro etylenové jednotky, ale také o prokázání spolehlivosti klíčových komponent pro použití v tomto typu vysokoteplotních reaktorů. Důležitým předpokladem pro včasné rozšíření a průmyslovou implementaci této technologie bude investiční podpora a konkurenceschopné ceny obnovitelné energie. Je to součást procesu elektrifikace chemického průmyslu.

Přestože se start oproti původnímu odhadu (2023) mírně opozdil kvůli doladění extrémně náročných komponent, 17. dubna 2024 byla tato světově první elektrická krakovací jednotka slavnostně uvedena do provozu. Projekt získal finanční podporu ve výši 14,8 milionu eur od německého Spolkového ministerstva pro hospodářství a ochranu klimatu (v rámci programu Dekarbonizace v průmyslu). Jednotka v Ludwigshafenu je plně integrovaná do stávajících parních krakovacích jednotek BASF. Spotřebovává 6 MW obnovitelné elektřiny a zpracuje zhruba 4 tuny uhlovodíkové suroviny za hodinu. Testují se v ní dva koncepty ohřevu: přímý, kdy elektrický proud prochází přímo krakovacími trubkami, a nepřímý, kdy trubky ohřívá sálavé teplo topných těles. Projekt podpořilo německé Spolkové ministerstvo hospodářství a ochrany klimatu částkou 14,8 mil. EUR. Při napájení z obnovitelných zdrojů může elektrický ohřev snížit emise CO_2 z krakování nejméně o 90 % oproti konvenčním pecím. Hlavním limitem pro masové nasazení velkých elektrických krakovacích jednotek zůstává ekonomika.

Aby tyto pece dokázaly konkurovat běžným fosilním, potřebuje chemický průmysl v Evropě stabilní a levné dodávky elektřiny z obnovitelných či nízkoemisních zdrojů. Ceny energií jsou proto jedním z hlavních témat Evropského akčního plánu pro chemický průmysl z července 2025.
Materiál SCHP Opportunities and Challenges Brought by Fit for 55 to the Chemical Industry – the Czech Example z r. 2020 **10)** zmiňuje i další potřebné investice na elektrifikaci chemického průmyslu. V rámci politiky EK a politiky dodávek zemního plynu se očekávaly problémy i v dodávkách elektřiny a jejich nestabilita, spojená s dopadem na cenu a následné oslabení konkurenceschopnosti chemické výroby v ČR. Rozhodnutí o elektrifikaci chemického průmyslu významně ovlivní budoucí vývoj. Celková spotřeba chem. průmyslu v ČR je 80 TWh, požadavek na elektrifikaci představuje 12-15 TWh s přicházejícím tlakem na odstavení uhelných elektráren (např. v Litvínově). Prioritní investice podniků budou zaměřeny na přebudování energetického sektoru, což významně ovlivní především vývoj v oblasti dodávek plynu. Při současném vývoji cen elektřiny a nedostatku zdrojů OZE není elektrifikace českého chemického průmyslu v dohledné době ekonomicky přijatelná.

Výzvy pro český chemický VaV:

a.) Ve střednědobém horizontu

- Vývoj membránových bioreaktorů a chemicko-inženýrské řešení bioreaktorů. Jednou z potenciálních možností, které je nutno rychle vyvíjet, by mohly být i mikrobiální degradace v tzv. membránových bioreaktorech
- Vývoj účinnějších separačních procesů, jako jsou destilace, membránové separace, filtrační nanomateriály
- Progresivní návrhy syntetických postupů samotných, mikroprocesních technologií, integrace a intenzifikace procesů kombinovaných s novými katalytickými koncepty a technologiemi „in silico“
- Vývoj elektrolyzérů o vyšší kapacitě (300-500 MW)
  Jako příklad lze uvést společný vývoj společnosti Orlen Unipetrol s Technickou univerzitou v Košicích.
- Vývoj molekulární katalýzy
  Tento relativně nový výzkumný obor byl původně ovlivněn katalytickým systémem, který na rozdíl od klasických chemických reakcí využívá nekovalentní interakce, jako je vodíková vazba, interakce kation-π a hydrofobní síly k dramatickému urychlení rychlosti reakce nebo umožnění vzniku mimořádně selektivních reakcí. V důsledku toho, že enzymy jsou strukturálně sofistikované a obtížně se mění, molekulární katalyzátory nabízejí jednodušší model pro lokalizaci faktorů podílejících se na účinnosti přirozeného působení supramolekulárních systémů.
- Dokončit dlouholetý vývoj malých jaderných reaktorů
- V rámci energetické a nízkouhlíkové transformace chemického průmyslu je uvažován vývoj intenzifikace procesů pomocí molekulární katalýzy
- Vývoj nových bezpečnějších kontejnerů pro jaderný odpad z SMR

b.) V dlouhodobém horizontu

- Elektricky vyhřívaný reaktor

- Jaderná fúze (po roce 2060)

Zdroje:
1) *Strategická výzkumná agenda SUSCHEM CZ 4, 2019*
2) *Cestovní mapa průmyslové modernizace a zavádění pokročilých technologií v chemickém průmyslu, 2021*
3) *Customer oriented process development and optimization: https://www.genosynth.com/process-optimization*
4) *https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/male-a-mikro-reaktory/vyklad*
5) *https://www.energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs*
6) ***https://www.hybrid.cz****/vyvoj-malych-modularnich-reaktoru-zrychluje-nuscale-pripravuje-prvni-projekt/*
7) *Advanced Small Modular Reactors Office of Nuclear Energy Reactor Technologies, https://www.energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs*
8) *https://www.sujb.cz/aktualne/detail/male-modularni-reaktory-jak-je-vidi-sujb*
9) *Roadmap Chemie 2050, Eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI.2019*
10) *Souček, Reiss, Suchý, Behenský: Opportunities and Challenges Brought by Fit for 55 to the Chemical Industry – the Czech Example, 2020.*

15. Předpokládané výdaje a zdroje

Na investicích do velké tranzice na bezemisní a digitální ekonomiku se musí podílet EU, vlády, banky, soukromý sektor a společně hledat řešení.

I když uvažujeme, že některé špičkové technologie pro realizaci transformace budou zakoupeny ze zahraničí, v lepším případě v rámci mezinárodní spolupráce ve výzkumu a vývoji, bez mobilizace české VaV a její orientace na prioritní úkoly nelze dosáhnout požadovaných cílů. Je evidentní, že budou podporovány zejména úlohy aplikovaného výzkumu zaměřené na dosažení cílů Fit for 55, Strategie udržitelnosti chemických látek, naplňování Vodíkové strategie, zabezpečení udržitelnosti zemědělství a další při zachování potřebné podpory základního výzkumu.

V CM SUSCHEM CZ 1) byly potřebné výdaje na výzkum v letech 2021-2030 jen pro chemický průmysl odhadnuty na 30 mld. Kč, z toho 70 % z veřejného sektoru a 8 % z prostředků EU. Kromě toho se uvažuje s 11,4 mld. Kč na vývoj nanotechnologií a 54,2 mld. Kč pro oblast biotechnologií. Dlouhodobě sledovaným ukazatelem v rámci mezinárodního srovnání je podíl výdajů na výzkum na HDP.

Absolutní výše celkových výdajů na výzkum v roce 2024 činila 146,9 mld. Kč, tj. 1,82 % HDP. K dlouhodobému růstu celkových výdajů na VaV v ČR přispívá zejména trvalý růst podnikatelských zdrojů, v roce 2024 činily přibližně 94 mld. Kč, veřejné domácí zdroje 43,1 mld. Kč a zdroje EU 9,2 mld. Kč. 2)

Strukturální fondy EU jsou prostřednictvím jednotlivých operačních programů jedním ze stěžejních veřejných zahraničních zdrojů finanční podpory aktivit spojených s VaVaI. Z pohledu českého výzkumu a vývoje jsou aktuálně nejvýznamnější především Operační program Technologie a aplikace pro konkurenceschopnost (OP TAK) a Operační program Jan Amos Komenský (OP JAK), ze starších operačních programů pak OP Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost a OP Výzkum, vývoj a vzdělávání.

Pro období do roku 2050 pro výzkum a vývoj v chemickém průmyslu ČR byly předběžně oceněny požadované finanční zdroje na 114 mld. Kč.

Z hlediska zdrojů financování výzkumu lze uvést:

1) Na výzkum, vývoj a inovace mohla ČR čerpat v rámci Národního plánu obnovy více než 13 mld. Kč (plnění milníků Nástroje pro oživení a odolnost končí 31. 8. 2026). EU požaduje, aby tyto prostředky byly vynaloženy na projekty:

- výzkum a vývoj pokročilých materiálů pro aplikace v energetice, stavebnictví, mobilitě, zdravotnictví, zemědělství a elektronice;
-

- výzkum, vývoj a zavádění nízkouhlíkových a environmentálně šetrných opatření s dopadem na procesy chemické a materiálové výroby;
- výzkum a vývoj inovativních obchodních modelů k zajištění efektivnějšího využívání chemikálií a jiných zdrojů.

2) Ze státního rozpočtu

Rok 2024: Celkové výdaje na VaV v ČR činily 146,9 mld. Kč (vč. soukromého sektoru). Ze státního rozpočtu bylo na VaV vynaloženo 40,0 mld. Kč, tj. 0,50 % HDP – nejnižší podíl od roku 2008.

Střednědobý výhled: Návrh výdajů státního rozpočtu na VaVaI na rok 2027 (září 2026) počítá s 46,95 mld. Kč a s výhledem 51,43 mld. Kč na rok 2028 a 52,89 mld. Kč na rok 2029; návrh ještě musí schválit vláda. Agenda RVVI přešla v roce 2026 z Úřadu vlády na MPO.

Výhled do roku 2030: Inovační strategie ČR 2019–2030 stanoví cíl 1 % HDP z veřejných zdrojů; při současném vývoji (0,50 % HDP ze státního rozpočtu v roce 2024) se Česko tomuto cíli nepřibližuje.

Stále uvažujeme, že se podaří přiblížit politickým cílům – celkovým výdajům na VaV ve výši 3 % HDP (cíl EU) a veřejným výdajům ve výši 1 % HDP.

Vzhledem k významu chemického průmyslu pro českou ekonomiku jsou výdaje na chemický výzkum dlouhodobě nedostatečné. V roce 2024 chemický průmysl vytvořil produkci ve výši 787,8 mld. Kč, výdaje na výzkum přitom činily pouze 1,124 mld. Kč tj. přibližně 0,14 % produkce 7).

15.1. Výdaje na modernizaci stávající výrobní základny chemického průmyslu ČR

Potřebné investiční výdaje na modernizaci stávající výrobní základny chemického průmyslu ČR do roku 2050 a v SVA navrhované inovace nebyly dosud komplexně odhadnuty.

V CM SUSCHEM CZ 1) je uvedeno, že do roku 2030 bude potřeba 455 mld. Kč pro investice. Např**.** Orlen Unipetrol předpokládá, že do roku 2030 bude muset na transformaci vynaložit 35 mld. Kč.
Ne všechny uvažované modernizační a inovační technologie budou založeny na vlastním výzkumu, řadu ověřených technologií a speciálních zařízení bude nutno dovézt. O realizaci strategických investic rozhodují majitelé výrobních firem, z nichž významnou část tvoří zahraniční majitelé. Důvodně lze předpokládat, že do roku 2050 přesáhnou potřebné investice 1 bilion Kč v závislosti na naplňování uvažovaných projektů, ale také na disponibilních zdrojích.
Cefic v Economic Analysis of the Impacts of the Chemicals Strategy for Sustainability z prosince 2021 uvádí, že postupné zavádění Strategie udržitelných chemických látek si vyžádá zvýšení poměru CAPEX k obratu v období 2023–2040 oproti základní linii v průměru o

2–5 %, což je způsobeno především dodatečnými investičními požadavky na substituci nebo přeformulování výrobků a výrobních procesů. Podobně se odhaduje, že poměr OPEX k obratu se za stejné období zvýší oproti základní linii v průměru o 1,5 % až 3 % v důsledku zvýšených regulačních požadavků a případně vyšších provozních výdajů.3)
Existuje studie předpokládaných investičních výdajů na vytvoření adekvátních pracovních míst jako náhrada za zaniklá místa vlivem zelené transformace ekonomiky. V adaptivním modelu ve výchozím scénáři byly potřebné prostředky odhadnuty až na 216,9 miliardy Kč v letech 2023-2030. Studie je zpracována ve třech úrovních scénáře, které uvažují se ztrátou 11 328 až 32 450 pracovních míst. Celková zátěž pro veřejné rozpočty v letech 2023 až 2030 byla odhadnuta v rozmezí 43,4 miliardy Kč až 216,9 miliardy Kč v závislosti na zvolené míře participace podniků. 4)
Při realizaci opatření balíčku Fit for 55 jsou největší investice očekávány v oblasti snižování spotřeby a instalace FVE. Kumulované investice v tomto scénáři za období do roku 2030 představují celkem 1 581 mld. Kč. Touto výpočetní metodou tudíž vychází dopad balíčku Fit for 55 z pohledu investic 568 mld. Kč. 5)

V období 2026–2050 uvažuje SVA s postupnou realizací některých velkých inovačních investic v ČR. Jedná se např. o výstavbu velkých zdrojů zeleného vodíku (náklady jen v Litvínově 1,5 mld. Kč), malých modulárních jaderných reaktorů a další. Samotný projekt těžby a zpracování lithia na Cínovci vyžaduje podle finální studie proveditelnosti (prosinec 2025) investici přes 42 mld. Kč; záměr velké továrny na baterie (gigafactory) v ČR se v současnosti nerealizuje.

Studie ČVUT „Capital Raising Strategy for Czechia“ z roku 2021 upozorňuje na skutečnost, že současný systém nefinanční a finanční podpory, ani nastavení parametrů tohoto systému, nevede ani k dostatečnému rozvoji projektů GND a OZE tak, aby byly nejen splněny cíle do roku 2030, ani k transformaci celého hospodářství směrem k účinnému nízkouhlíkovému systému. Průměrná roční výše investic do sektoru dodávek energie z obnovitelných zdrojů potřebná ke splnění klimatických a energetických cílů pro rok 2030 je podle této studie 690 milionů EUR. 6)

Zapojení bank
Banky se do financování transformace zapojují především posilováním kapitálu a závazků v souladu s evropskými požadavky (zejména MREL), a to vydáváním zelených a udržitelných dluhopisů, a dále nabídkou udržitelných investičních fondů. Zájem investorů o tyto nástroje je silný, protože klienti hledají udržitelné investiční příležitosti. Od prosince 2024 navíc mohou emitenti využívat dobrovolný standard evropských zelených dluhopisů (EuGB). Například Raiffeisenbank vydala v roce 2021 jako první banka v ČR zelený dluhopis v objemu 350 mil. EUR a v roce 2023 udržitelný dluhopis v objemu 500 mil. EUR. Banky zároveň působí jako aranžéři zelených emisí svých klientů. Například developer CTP umístil v roce 2024 zelený dluhopis v objemu 750 mil. EUR při 5,5násobném převisu poptávky.Emise dluhopisů by měly být v souladu s principy ICMA Green Bond Principles, resp. se standardem evropských zelených dluhopisů (nařízení (EU) 2023/2631, účinné od prosince 2024), které definují kategorie zelených projektů, na které mohou být finanční prostředky z těchto dluhopisů využity. Podobně ČEZ vydal zelené dluhopisy.

Příklad podpory velkých podniků

ORLEN Unipetrol nabízí spolupráci startupům, malým a středně velkým firmám v rámci investičního programu v hodnotě desítek milionů.

Zdroje:

1) Cestovní mapa průmyslové modernizace a zavádění pokročilých technologií v chemickém průmyslu, SUSCHEM CZ, 2021,

2) Český statistický úřad: Výdaje na výzkum a vývoj ve vztahu k HDP stagnují (údaje za rok 2024), 2025; Analýza stavu výzkumu, vývoje a inovací v ČR a jejich srovnání se zahraničím v roce 2020, RVVI 2021

3) Economic Analysis of the Impacts of the Chemicals Strategy for Sustainability, CEFIC 12.2021

4) Peterka a kol.: Studie proveditelnosti a dopadu Zelené dohody pro Evropu a dekarbonizace průmyslu do chemického sektoru ČR – s akcentem na zaměstnanost, konference Podpora sociálního dialogu v chemickém průmyslu ČR, Praha 2020

5) Ročenka 2021 o vývoji chemického průmyslu v ČR, SCHP ČR

6) Valentová, Dunovski, Knápek: Capital Raising Strategy for Czechia Buildings and renewable energy Supply, ČVUT únor 2021

7) SCHP ČR – Ročenka o vývoji chemického průmyslu v ČR 2025 / MPO – Panorama zpracovatelského průmyslu ČR 2024

16. Horizontální témata

Dosažení klimatické neutrality, cirkulace, zdravých potravinových systémů a udržitelnosti v zemědělství, dopravě, stavebnictví, balení, elektronických zařízeních, tepelných izolací a také dokončení přechodu na obnovitelné zdroje energie patří k největším výzvám, kterým dnes lidstvo čelí. OECD odhaduje, že celosvětová spotřeba zdrojů vzroste do roku 2040 až o 40 % a do roku 2060 téměř o 90 % **1)**. Protože většina klíčových surovin, které evropský chemický průmysl potřebuje, se vyrábí mimo Evropu, zažívá evropský průmysl rychle rostoucí globální konkurenci při zajišťování přístupu ke zdrojům. Pandemie covidu-19 a zejména válka na Ukrajině zasáhly evropské hodnotové řetězce a ukázaly jejich křehkost a slabiny. Zdůraznily závislost Evropy na jiných regionech a naléhavou potřebu urychlit dvojí (zelenou a digitální) transformaci a řešit zranitelnost našich hodnotových řetězců. Na to reaguje Evropský akční plán pro chemický průmysl (červenec 2025), který mj. zřizuje Alianci pro kritické chemické látky.

Jedním z nejdůležitějších nástrojů pro potřebnou transformaci je vývoj pokročilých materiálů a pokročilých technologií. Nejde jen o to, že některé dnes používané materiály jsou již na svém technickém maximu (např. křemík pro mikroelektroniku) nebo k jejich výrobě je potřeba řady vzácných surovin (CRM). Naopak vědci postupným zvládáním manipulace s atomy jsou schopni připravit zcela nové materiály. Digitalizace (např. mikroelektronika), energetické technologie a technologie mobility se budou stále více komplikovat, což bude vyžadovat kratší a agilnější vývojové cykly. To bude vyžadovat intenzivní úsilí ve vývoji pokročilých materiálů a nové moderní přístupy ke snížení nákladů na uvedení na trh a na snížení doby uvedení na trh. To vyžaduje rozšířit mezioborovou, a hlavně mezinárodní spolupráci a spojit dosud roztříštěné síly.

Problematika pokročilých materiálů a technologií je podrobně rozebrána ve Strategické agendě IV **2)**.

Navzdory tomu, že chemický průmysl ČR charakterizuje řada známých velkých společností, většinu chemického odvětví tvoří malé a střední podniky. Ty se často vyznačují větší odvahou k inovacím jak v oblasti pokročilých materiálů, tak nových technologií. MSP čelí společným výzvám, jsou obzvláště vystaveny dvojí transformaci, vysokým cenám energií a materiálů, rozkolísaným dodávkám, drahému financování. Mají problém získat kvalitní pracovní sílu a čelí tlakům zaměstnanců na zvyšování platů. Často jsou závislé na jednotlivých chemických produktech a omezených portfoliích. Přístup k finančním prostředkům EU a ČR na inovace je pro MSP také složitější, a to z administrativních důvodů a personálních důvodů. Přitom MSP se podílejí na HDP ze 40 %. MSP mají obvykle přístup k méně příznivým výpůjčním podmínkám než větší průmyslová odvětví a jsou často vystaveny většímu riziku selhání, zejména pokud se pokoušejí být průkopníky v oblasti nových produktů a procesů. Požadavky na podávání zpráv v rámci takového financování mohou být rovněž obtížné a pokyny pro taxonomii složité. Lepší pomoc místních a regionálních orgánů by rovněž mohla umožnit vyšší míru úspěšnosti přístupu MSP k veřejnému financování. Byl předložen návrh na vytvoření fondu na míru pro malé a střední chemické podniky, podporovaného konsorciem všech hlavních komerčních bank EU, aby bylo možné podporovat investice MSP, které jsou páteří ekonomiky.

Přijímáme nové paradigma „Safe-and-Sustainable-by-Design“, včetně zřízení podpůrné sítě a rozvoje kritérií, kterými se bude řídit vývoj „chemie zítřka“. Bude důležité zajistit, aby byl přístup navržen tak, aby umožnil většině průmyslu úspěšně zvládnout tento přechod a nadále dodávat výkonné produkty. Bezpečnost produktu musí být potvrzena v rané fázi vývoje produktu. Na základě databáze REACH a dalších nástrojů existuje příležitost vyvinout nástroje prediktivní toxikologie pro urychlení testování chemické bezpečnosti při minimalizaci testování na zvířatech a pro podporu přechodu na méně nebezpečné chemické látky tam, kde je to technicky a ekonomicky možné, zejména s ohledem na zvýšený oběh chemických látek a potřebu snížit spotřebu energie, surovin a vody.
Samotný zákaz nebo omezení používání chemikálií na základě jejich nebezpečných vlastností nebere v úvahu úplný obraz. Může to být dokonce kontraproduktivní vůči cílům udržitelnosti. Namísto toho musí posouzení udržitelnosti produktu zohlednit celý životní cyklus a v maximální možné míře zahrnovat cirkulaci (včetně trvanlivosti), účinnost zdrojů, spotřebu energie, vody a půdy, příspěvek ke snížení emisí skleníkových plynů a další hlavní společenské potřeby, kromě informací o nebezpečnosti, použití a expozici. Různé hodnotové řetězce mohou vyžadovat různá kritéria. Toto hodnocení by mělo vycházet z metodik hodnocení udržitelnosti produktů, které již evropské chemické společnosti vyvinuly. Kromě funkčních požadavků a bezpečnosti by při rozhodování o náhradě mělo být klíčovým prvkem jakéhokoli alternativního hodnocení posouzení udržitelnosti. Kromě snížení celkové ekologické stopy by tato strategie měla přispět k posílení bezpečné recyklace a opětovného použití materiálů, aby se udržely v oběhovém hospodářství, a to řešením „starších látek“, zkoumáním inovativních digitálních řešení a norem pro sledování těchto látek podél hodnotových řetězců a umožněním výroby vysoce kvalitních recyklovaných materiálů. Kromě toho musí chemická strategie pro udržitelnost jít ruku v ruce s iniciativou pro udržitelné produkty.
EU klade značný důraz na „nebezpečné“ látky bez náležitého zvážení použití a expozice. Například vysoce výkonné a odolné materiály, jako jsou materiály potřebné pro pobřežní větrné turbíny, často spoléhají na perzistentní chemikálie. Důležité je, že takové chemikálie nejsou emitovány na úroveň, která by nyní nebo v budoucnu způsobovala škody, nerozkládaly se a mohly být na konci své životnosti recyklovány.
První prioritou budoucí chemické strategie pro udržitelnost by proto měla být práce na potřebách zlepšení identifikovaných v těchto přezkumech a kontrolách způsobilosti: zefektivnění tam, kde je to možné, za účelem dosažení větší konzistence a odstranění duplicit, řešení některých problémů s implementací s cílem konsolidovat stávající regulační základ (zejména REACH) a zintenzivnění vymáhání, zejména u dovozu, spolu se zajištěním vymahatelnosti regulačních opatření.
Právní předpisy o chemických látkách musí podporovat a umožňovat přechod k oběhovému hospodářství a měly by odrážet různé způsoby recyklace. Aby se umožnila výroba vysoce kvalitních recyklovaných materiálů, jsou zapotřebí řešení, která řeší obavy týkající se nebezpečných látek, které by mohly být překážkou mechanické recyklace. Recyklátoři by měli mít dostatek informací, aby jejich pracovníci mohli bezpečně fungovat. Je třeba podporovat jednotný trh s odpady a různé předpisy musí podporovat rychlé rozšiřování trhů s druhotnými surovinami prostřednictvím chemické recyklace.
Při vývoji nové látky čelí chemický průmysl velké regulační nejistotě ohledně možného zákazu nebo omezení. Toto odvětví vyžaduje vysoké kapitálové výdaje na počáteční investice a často zvýšené investiční náklady na úpravu svých operací a výrobních procesů. V mnoha

případech vyžaduje dovybavení velkých zařízení, dlouhodobé plánování a velké kapitálové investice. Regulační nejistota spolu s pomalými schvalovacími postupy pro průmyslové areály následně zvyšuje investiční rizika. V rámci Strategie pro udržitelnost v oblasti chemických látek zveřejnila Komise v roce 2022 Strategický plán výzkumu a inovací pro bezpečné a udržitelné chemické látky a materiály. Současně přijala doporučení, kterým zavedla rámec „bezpečné a udržitelné již od návrhu“ (SSbD); ten se po zkušebním období reviduje. Na tyto kroky navázal v červenci 2025 Akční plán pro chemický průmysl, zaměřený na konkurenceschopnost, ceny energií, vedoucí trhy a zjednodušení regulace. Jeho součástí je zjednodušující balíček Omnibus VI (CLP, kosmetické přípravky, hnojiva) a oznámená cílená revize nařízení REACH. Navrhujeme, aby EU tento vývoj doplnila o rámec pro regulační pískoviště (regulatory sandboxes), v nichž by bylo možné ověřovat potenciálně průlomové technologie, a o opatření, díky nimž budou mít bezpečné a udržitelné chemické látky a materiály na trhu výhodu. Nedostatek údajů, regulatorní nejistota a vysoké kapitálové výdaje zvyšují riziko pro inovativní společnosti v chemickém odvětví. Bezpečná a předvídatelná návratnost investic by zvýšila investice průmyslu do inovativních produktů a podpořila trh s bezpečnými a udržitelnými produkty podle návrhu 3). Další významnou oblastí, která vyžaduje zásadní zlepšení, je povolování staveb v ČR. Dosavadní praxe, kdy povolovací řízení trvalo i několik let, byla v zásadním rozporu s potřebou rychle posilovat energetickou bezpečnost v návaznosti na válku na Ukrajině a zavádět nové zásadní inovace. Od 1. 7. 2024 je účinný nový stavební zákon (č. 283/2021 Sb.), který přinesl digitalizaci řízení a sjednocení postupů. V roce 2025 ho doplnily další novely, mimo jiné zákon č. 249/2025 Sb. o urychlení využívání obnovitelných zdrojů energie, který zavádí akcelerační oblasti s lhůtou pro vydání povolení 60 dnů. Klíčové nyní bude, aby se nová pravidla v praxi skutečně projevila zkrácením povolovacích lhůt, a to i u průmyslových staveb mimo oblast obnovitelných zdrojů, a aby se právní úprava stabilizovala. 4). Je nutné zásadně změnit systém využívání emisních povolenek, které jsou dnes předmětem aktivit různých spekulantů. Navrhujeme systém, v němž by ten, kdo vytváří emise, nakupoval povolenky podle současného modelu, ale peníze, které za ně utratí, by byly vázány pro účely jeho investic do ekologizace výroby. Podobně jako je tomu u skládek, kde musíte povinně ukládat peníze, které můžete použít pouze vy a pouze na budoucí rekultivaci takové skládky. Vytváříte si fond, abyste skládku uvedli do stavu, který neohrožuje životní prostředí. Takový systém by umožnil masivně snižovat emise v relativně krátké době a nezvyšoval by cenu elektřiny 5).

Pro mnohé společnosti ze zpracovatelského průmyslu, včetně průmyslu chemického, je velmi důležitým tématem cena energií. Společnosti nejsou schopny zvýšené ceny vstupů přenést do cen svých výrobků. Mnohé menší společnosti fungují jen díky setrvačnosti majitelů a jejich ochotě financovat ztráty z jiných zdrojů.

Další problém je „chemofobie“ určité části společnosti, která je do značné míry vytvářena významnými médii, rizika z úniku chemických látek jsou často zveličována bez hlubší znalosti skutečných rizik. S tím souvisí i nízký počet absolventů chemických oborů a obtížné získávání kvalifikovaných pracovníků pro chemický průmysl především v příhraničních regionech ČR, i přes nadprůměrně atraktivní podmínky ve srovnání s provozy, nevyžadující kvalifikovaný personál.

Je nutné si uvědomit, že chemický průmysl funguje jako neviditelná podpora mnoha různých oblastí, včetně zemědělství a farmacie, a že produkce chemických látek je motivována potřebou dalších jejich využití pro uspokojování mnohdy nenahraditelných lidských potřeb. Například až do objevu syntézy amoniaku na počátku 20. století byl hladomor poměrně

běžným jevem, o významu syntetických léčiv pro zdraví populace není nutné se detailně rozepisovat. Chemický průmysl je také nezastupitelný v prakticky všech pokročilých a nízkoemisních technologiích pro získávání energie. Například při dostatečném množství levné a nízkoemisní energie je možné zajistit dostatek kvalitních paliv ze dvou naprosto běžných surovin, oxidu uhličitého a vody, vyrobená paliva jsou minimálně stejně kvalitní, jako běžná ropná paliva.

Zdroje :

1) *Pracovní dokument útvarů Evropské komise (202**2)** - Aktualizovaný hloubkový přezkum strategických závislostí Evropy*

2) *Strategická výzkumná agenda IV, SusChem CZ duben 2019*

3) *Souček I.: Current activities of the Association of the Chemical Industry of the Czech Republic – plenární přednáška na 9. Mezinárodní chemicko-technologické konferenci v Mikulově, 26. 4. 2022*

4) *Studie dopadů balíčku Fit for 55 na hospodářství ČR, závěrečná zpráva Deloitte srpen 2022*

5) *Roadmap Chemie 2050, Eine Studie von DECHEMA und Future Camp für den VCI.2019*

6) *Cingr P.: Agrofert magazín jaro 2022, str. 19-20*

17. Závěr

Na všech úrovních musí věda a technologie hrát zásadní roli při dosahování udržitelnosti, ale stejně důležitá jsou politická rozhodnutí, podpořená společenskou podporou a koordinovanými politickými přístupy, což se bohužel prozatím ne vždy chápe a k tomu chybí i globální nadhled a vize budoucnosti.

Paradoxem dnešní doby je skutečnost, že zatímco ceny energií v Evropě zůstávají výrazně vyšší než u hlavních globálních konkurentů (USA, Čína), řada koncepcí k naplnění cílů GND je založena na dostatku levné elektrické energie.

Navíc podmínky v jednotlivých státech EU k naplnění cílových ukazatelů GND jsou diametrálně odlišné (např. při naplnění podílu OZE na celkovém energetickém mixu).

Proto je tak důležité, aby omezené lidské kapacity a zdroje českého chemického průmyslu byly soustředěny na nadějné projekty, dále se posilovala mezinárodní spolupráce ve výzkumu a byly účelně využívány i dosažené výsledky evropského výzkumu a vývoje.

Strategie českého chemického průmyslu do roku 2050 počítá s posuzováním potenciálu komerčně nabízených technologií a technologií s vysokým TRL. K tomu budeme potřebovat odborně zdatné týmy jak z výzkumu, tak průmyslu.

Investice do nových inovativních technologií mají smysl nejen pro byznys, ale i pro celou společnost. Jejich výhodnost se dosud hodnotí především na základě účetní závěrky a finanční analýzy. Stále větší roli však hrají také kritéria ESG a taxonomie EU, a to zejména prostřednictvím požadavků bank a investorů při financování a požadavků velkých odběratelů v dodavatelských řetězcích. Povinný rozsah udržitelného reportingu byl přitom v roce 2026 zjednodušujícím balíčkem Omnibus I (směrnice (EU) 2026/470) výrazně zúžen. Povinnost reportovat podle směrnice CSRD se nově vztahuje jen na podniky s více než 1 000 zaměstnanci a čistým obratem nad 450 mil. EUR. Povinnosti náležité péče podle směrnice CSDDD se týkají jen podniků s více než 5 000 zaměstnanci a obratem nad 1,5 mld. EUR a budou se uplatňovat od roku 2029. Většina menších a středních chemických podniků tak nebude reportovat povinně, přesto se s požadavky na ESG údaje setká v rámci dodavatelských řetězců a při financování.

Lze důvodně předpokládat, že vysoké ceny energií, omezení dodávek plynu, Strategie udržitelnosti chemikálií a další restrikce ze strany EU vyvolají zastavení některých výrob chemikálií v ČR, jak to vidíme již dnes např. v Neratovicích (zastavení výroby PVC a kaprolaktamu, faktické ukončení chemických výrob v areálu Spolany), nebo Kolíně (zastavení výroby kyanidu draselného), v oblasti průmyslových hnojiv a dalších pro ekonomiku ČR důležitých chemických látek. To však bude mít dopad nejenom do objemu chemické výroby v ČR, ale zejména na navazující průmyslová odvětví jako je automobilový průmysl, zemědělství a další odvětví. Navíc se bude zvyšovat závislost na dovozu potřebných chemických látek mimo EU, ale také to významně spolu s pokračující digitalizací ovlivní strukturu zaměstnanosti v chemickém průmyslu ČR.

Je zásadní budovat vztahy se zahraničními partnery, vytvářet dlouhodobé vazby se špičkovými vědeckými pracovišti a posilovat mezinárodní spolupráci včetně zvyšování účasti českých výzkumných organizací a týmů v rámcovém programu Horizont Evropa (2021–2027) a v navazujícím 10. rámcovém programu na období 2028–2034 (zejména u aktivit ERC, partnerství a schémat v rámci EIC). Pro ČR je klíčové, aby efektivně zacílila své kapacity výzkumu, vývoje a inovací a dokázala reagovat na dynamický vývoj ve společnosti včetně rychlého rozvoje nových technologií, především však na tzv. velké společenské výzvy. Je

potřeba věcně vymezit priority ke zvýšení odolnosti společnosti a motivovat poskytovatele k podpoře specificky zaměřených výzkumných programů relevantních pro oblasti definovaných hrozeb s celospolečenským dopadem. Zejména dopady války na Ukrajině budou mít zásadní vliv na směřování systému VaVaI a prioritizaci podpory jednotlivých oborů i multidisciplinárních týmů směrem k odvrácení dalších hrozeb.

Hlavní cíl SusChem CZ – udržitelnost českého chemického průmyslu – si vyžádá další finance pro aplikovaný výzkum a na inovační investice. Vysoké ceny plynu a elektřiny v porovnání s globální konkurencí nutí velké firmy omezovat výrobu, nebo rovnou uvažovat o změně paliva nebo přenesení výroby mimo EU. Bez mimořádně efektivních inovací bude náročné udržet konkurenceschopnost českého chemického průmyslu. Narušení stávajících dodavatelských řetězců a cenových relací významně narušuje dosavadní obchodní modely. Mimořádné úkoly stojí také před odborným školstvím, aby včas vychovalo potřebné odborníky pro realizaci Průmyslu 4.0, cirkulární ekonomiky a uplatňování zcela nových obchodních modelů.

Seznam vybraných použitých zkratek

AM	Aditivní výroba
ASSB	All-solid-state-batteries (pevnolátkové baterie)
CAPEX	Capital expenditures
CEFIC	The European Chemical Industry Council
CCS	Zachycování a ukládání uhlíku
CCU	Zachycování a využití uhlíku
CM	Cestovní mapa průmyslové modernizace a zavádění pokročilých technologií v chemickém průmyslu ČR
CRM	Kritické suroviny (Critical Raw Materials)
EIC	European Innovation Council
ERA	Evropský výzkumný prostor
ERC	Evropská výzkumná rada
ESG	Environmental, Social, and Governance
FCC	Fluidní katalytické krakování
FT	Fischerova-Tropschova syntéza
GMO	Geneticky modifikované organismy
GND	Zelená dohoda pro Evropu (European Green Deal)
GRA	The Generic Risk Approach
IEA	Mezinárodní energetická agentura
IoT	internet věcí
LSB	Lithium-sírové baterie
MND	Moravské naftové doly
MSP	Malé a střední podniky
MEB	Modulární platforma pro elektromobily
NRIS3	Národní strategie inteligentní specializace
OPEX	Operating expenses
OP VaVpI	Operační program Výzkum a vývoj pro inovace
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PCB	Polychlorované bifenyly
PEM	Proton-Exchange-Membrane, Polymer Electrolyte Membrane
PFAS	Per- a polyfluoroalkylované látky
PHB	Polyhydroxybutyrát
POX	Parciální oxidace
R&D	Výzkum a vývoj
REACH	Nařízení EU k registraci, evaluaci a autorizaci chemických látek
REE	Prvky vzácných zemin
REPowerEU	plán EU pro cenově dostupnější, bezpečnější a udržitelnější energii
RIS3	Výzkumná a inovační strategie pro inteligentní specializaci
RVVI	Rada pro výzkum, vývoj a inovace
RRF	Recovery and Resilience Facility (Nástroj pro oživení a odolnost)
SIRA	Strategická inovační a výzkumná agenda
SMR	Malé modulární reaktory
SSbD	Safe and Sustainable by Design
SVA	Strategická výzkumná agenda

SVHC	Látky vzbuzující mimořádné obavy
TP	Technologická platforma
TRL	Úroveň technologické připravenosti