



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI

**Česká technologická platforma
pro užití biosložek v dopravě a chemickém průmyslu**

**SVA - Strategická výzkumná agenda
(2020-2023)**

Číslo projektu CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_369/0024021

Ing. Leoš Gál
Předseda řídicího výboru ČTPB

V Praze květen 2022

Obsah:

Tento dokument byl zpracován Českou technologickou platformou pro užití biosložek v dopravě a chemickém průmyslu v rámci projektu podporovaného Ministerstvem průmyslu a obchodu v rámci OP Podnikání a inovace.

SVA vychází ze studie proveditelnosti kde byli definovány 4 základní pilíře, kterým se platforma věnuje:

Pilíř č.1. ODPADY

Pilíř č.2. TRANSFORMACE CO₂

Pilíř č.3. CO₂ a procesy POWER to X

Pilíř č.4. Projekt TIMES

I.	ODPADY BRKO - Plasty - Kaly COV
II.	CO₂ Transformace
III.	CO₂ Power to X
IV.	TIMES Upgrade TA2x (VCoF, H2)

SVA společně s IAP (Implementačním akčním plánem) a Foresightem patří mezi základní mandátovní dokumenty. Dokumenty se navzájem doplňují a někdy prolínají. Z důvodu komplementarity se SVA v některých zásadních tématech odkazuje na Foresight, kde jsou pak témata rozvedena podrobně. Výzkumné témata byly selektivně redukovány na ty, které považujeme za perspektivní a které by měli šanci zapojit ČR do mezinárodních projektů, což také koresponduje s povinností platformy.

SVA bere v potaz i politické a legislativní aspekty v oblasti biopaliv:

Oblast biopaliv v EU – politické aspekty

Legislativa upravující biopaliva je propojena se základním cílem EU snižování emisí GHG a ochraně ovzduší. Cíl snižování emisí GHG aktuálně vyplývá z **Climate Law**¹, který stanovuje cíle snížení emisí GHG o 55 % do roku 2030 oproti roku 1990 a **dosažení klimatické neutrality do roku 2050**. Na specifitější úrovni pak biopaliva upravuje strategie Udržitelné a chytré mobility², jež nastavuje cíle **snížit emise GHG o 90 % do roku 2050**.

Toto bez postupného vyřazování ropných produktů, ale i samotných spalovaných motorů, které jako palivo využívají i biopaliva, nelze splnit. Ani spalováním pokročilých biopaliv nelze snížení emisí GHG o 90 % docílit, resp. lze ho docílit jen teoreticky, při akceptaci skutečnosti, že určité segmenty dopravy budou moci produkovat vyšší emise na úkor jiných³.

Strategie EU v oblasti mobility strategie se odráží v národních strategiích pro mobilitu, kde si členské státy stanoví vlastní postupy a cíle pro splnění svých politických závazků vůči EU. V ČR jde např. o Národní plán čisté mobility⁴.

¹ <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/european-climate-law.html>

² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0789&from=CS>

³ https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy_en

Za pozornost z hlediska legislativně nezávazných, avšak z hlediska hodnocení udržitelnosti významných dokumentů, stojí tzv. **taxonomie udržitelnosti – resp. Technická screeningová kritéria pro hodnocení udržitelnosti investic.**

Úprava biopaliv viz str. 234, 249, 269, 281, 475, 491, 504, odkaz⁴:

Tento dokument přehledně vymezuje rozsah problematiky udržitelnosti biopaliva a biomasy dle jejich původu, tedy z hlediska výrobních procesů samotných paliv, ale i z hlediska jejich využití, tedy ve smyslu výroby tepla, elektrické energie a dopravy. Je zde vyjádřen důraz na srovnávací přístup využití biopaliv vs. fosilních paliv, kde je pro kritérium udržitelnosti stanoven požadavek na ochranu půdy, vodních zdrojů, rostlinných a živočišných druhů, na které produkce plodin dopadá a dále tzv. kaskádový princip, který považuje spalování, resp. energetické využití produktů biomasy, za jednu z posledních možností využití. Tím v podstatě konstatuje, že produkce biopaliv z cíleně pěstovaných plodin, zejména potravinářského využití, nemá být vnímána jako udržitelná. Dalším kritériem udržitelnosti je snížení emisí GHG oproti obdobnému, nebo stejnému použití fosilních paliv. Využitím biopaliv mělo docházet k „robusním“ klimatickým benefitům ve srovnání s fosilními palivy. Zde taxonomie předpokládá zohlednění kompletního dodavatelského řetězce a výrobních procesů, přičemž u biopaliv pak výpočet emisí stopy vychází z metodiky a prováděcích předpisů RED II., které by měly jak přímé, tak nepřímé emisní vstupy a výstupy zohledňovat (viz dále).

Obecně lze konstatovat, že téma biopaliv je na poli EU institucí velmi zpolitizované a diskutované.

Na jedné straně stojí zastánci biopaliv, kteří v nich vidí především obchodní příležitost a možnost snížit závislost EU na dovážených fosilních palivech. Sem patří především producenti a distributoři biopaliv, ale též zemědělci, kteří z pěstování plodin pro jejich výrobu značně profitují. Na druhé straně stojí kritici biopaliv, kteří v nich spatřují greenwashing a poukazují na negativa, která jsou s produkcí biopaliv spojena – zejména pak otázku skutečného prospěchu pro přírodu a klima při zohlednění celého výrobního procesu biopaliv. I přes situaci na Ukrajině a navyšování cen fosilních paliv, politickou debatu v EU pomyslně vyhrávají odpůrci biopaliv, což však v praxi nemusí mnoho znamenat.

Oblast biopaliv v EU – legislativní akty

⁴ https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/200309-sustainable-finance-teg-final-report-taxonomy-annexes_en.pdf.

Zastřešujícím legislativním aktem pro úpravu biopaliv je směrnice č. 2018/2001 o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů (RED II) ⁵. Účinná směrnice, která již měla být implementována do právních řádů členských států a její cíle měly být z větší části splněny, což se však dosud uspokojivě nepodařilo. Směrnice již rozlišuje mezi biopalivy 1G a 2G a na jejím základě jsou Komisí vydávány klíčové prováděcí akty pro úpravu OZE v EU.

Aktuálně EU Komise vydala, nebo připravuje následující prováděcí akty pro RED II:

- pokyny k lesní biomase dle čl. 29 RED II – kritéria udržitelnosti pro biomasu a bioplyn vztahující se k lesní biomase, týká se biopaliv ve smyslu výroby tepla a EE, případně zplyňování z lesní biomasy, též pravidla těžby a druhy lesní biomasy
- pokyny k certifikaci – prováděcí nařízení určující pravidla podpory dobrovolných režimů pro certifikaci udržitelných biopaliv ⁶
- prováděcí nařízení ILUC pro biopaliva na bázi plodin (vnitrostátní kritéria pro biopaliva s vysokým rizikem nepřímé změny ve využití půdy) a doprovodná Zpráva o stavu rozšíření produkce relevantních potravinářských a krmných plodin ve světě ⁷ :

RED II je důležitá i pro obnovitelná paliva nebiologického původu (RFNBO). Technické delegované akty se zaměřují na obnovitelný vodík a výrobu pohonných hmot z OZE. Např. podíl elektřiny z obnovitelných zdrojů – stanoví metodiku a pravidla pro výrobu kapalných a plyných RFNBO v dopravě. Aktuálně probíhá vyhodnocení a očekává se legislativní proces pro delegované prováděcí akty.

Energie z obnovitelných zdrojů – metoda posuzování úspor emisí skleníkových plynů u některých paliv: týká se metodologie výpočtu emisních úspor pro RFNBO a recyklovaná uhlíková paliva. Aktuálně probíhá vyhodnocení a očekává se legislativní proces pro delegované prováděcí akty.

Dále probíhá interní konzultace (ISC) ohledně rozšíření seznamu biopaliv v příloze IX. Komise spouští studii, jak aplikovat kaskádový princip na biopaliva, což se do legislativy promítne.

V rámci jednání o balíčku fit for 55 probíhá revize a příprava směrnice RED III, která již zavádí kaskádový princip na biomasu a též stanoví jasný limit pro biopaliva 1G a požadavky minimální cíle paliv 2G a na RFNBO, včetně jejich podílu v průmyslu. Některé návrhy v RED III směřují k nepřímému omezení biopaliv 1G pod limit stanovený v příslušných ustanoveních RED III a

⁵ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=en>

⁶ https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-04/Draft%20IA%20certificaiton%20ruels%20for%20voluntary%20schemes_after%20BC%20vote_vs%20March%202022%20CLEAN.pdf

⁷ https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2019.133.01.0001.01.ENG&toc=OJ:L:2019:133:TOC

usilují o změnu přístupu k výpočtu emisní stopy plodin. Aktuálně je revize RED III v legislativním procesu.

Z hlediska charakteru biopaliv pak důležitou roli hrají akty, které se vztahují na nepřímou emisní stopu biopaliv:

- [Nařízení v přenesené pravomoci o nepřímé změně ve využívání půdy \(EU\) 2019/807](#)
- [Směrnice o omezení nepřímé změny ve využívání půdy u biopaliv a biokapalin \(\(EU\)2015/1513\)](#)
- [Nařízení Komise \(EU\) č. 1307/2014 o vymezení kritérií a zeměpisných rozmezí vysoce biologicky rozmanitých travních porostů](#)
- [Rozhodnutí o pokynech pro výpočet zásob uhlíku v půdě \(2010/335/EU\)](#)

Z hlediska jakosti paliv a informací dostupných na trhu biopaliv pak:

- [Rozhodnutí o informacích o biopalivech a biokapalinách, které mají hospodářské subjekty předkládat členským státům \(2011/13/EU\)](#)
- [Směrnice o jakosti paliv \(2009/30/ES\)](#)

Dopady na biopaliva budou mít, mimo RED III, též další legislativní akty v rámci balíčku Fit for 55. Tyto však spíše než otázku udržitelnosti a jakosti biopaliv, upravují rozsah trhu biopaliv a jejich cenu. Mezi nejvýznamnější patří:

Revize směrnice č. 2003/87 o vytvoření systému pro obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů ve Společenství (EU ETS) – revize předpokládá zahrnutí námořní dopravy do EU ETS a tím vytvoření tlaku na poptávku po biopalivech 1G a 2G v námořním sektoru, případně uplatnění syntetických paliv (např. metanol z CO₂). Projednáván je též návrh na zahrnutí letecké dopravy do ETS (EU ETS Aviation), minimálně pro lety na území EU. Prozatím je v účinnosti Systém kompenzací a snižování emisí uhlíku v mezinárodní letecké dopravě (CORSIA). I pro letecká paliva lze předpokládat uplatnění obnovitelných kapalných paliv. V případě zahrnutí pod EU ETS mohou oba dopravní sektory směřovat ke snižování plateb za povolenky prostřednictvím využití biopaliv.

Na EU ETS v rámci fit for 55 pak navazuje:

ReFuelEU Aviation iniciativa upravující zavádění udržitelných biopaliv letecké dopravy⁸
ReFuel EUMaritime⁹ pro sektor námořní dopravy.

⁸ [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2022\)698900](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2022)698900)

⁹ [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2021\)698808](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2021)698808)

Revize nařízení č. 2018/842 o závazném každoročním snižování emisí skleníkových plynů členskými státy v období 2021–2030 přispívajícím k opatřením v oblasti klimatu za účelem splnění závazků podle Pařížské dohody (ESR) – navýšení cílů ve snižování emisí GHG v oblasti mimo EU ETS – tedy i dopravy.

Revize směrnice č. 2003/96, kterou se mění struktura rámcových předpisů Společenství o zdanění energetických produktů a elektřiny – stanoví minimální míru zdanění pro jednotlivé typy paliv a energií. Specificky nový návrh revize požaduje zdanění biopaliv 1G na úrovni fosilních paliv, což je předmětem výrazné opoziční snahy zejména zemědělských producentů a zpracovatelů biopaliv v EU, neboť jde o ohrožení konkurenceschopnosti jejich produktů.

Revize nařízení č. 2019/631, kterým se stanoví výkonnostní normy pro emise CO₂ pro nové osobní automobily a pro nová lehká užitková vozidla – snaha o stanovení limitů pro spalování paliv z hlediska provozu motorů. Částečně propojeno též s emisními EURO normami, které stanoví požadavky na emise výfukových plynů, zejména pak CO, HC Nox, PM. EURO norma 7 pak měla zavést též limity na CO₂ v souladu s požadavkem fit for 55. Snižování emisí GHG na nulu schválila ve své pozici též Rada EU.¹⁰

Výše uvedené v praxi znamená, že biopaliva lze využít pro snížení emisí z dopravy jen omezeně, zejména pak v sektorech dopravy, kde není možné jít cestou elektrifikace a vodíkových motorů.

Aktuálně též probíhá konzultace pro vytvoření jednotného rámce pro harmonizované měření emisí z osobní a nákladní dopravy¹¹

Biopaliva mimo dopravu – týká se zejména biometanu

Do biopaliv patří též biomasa a bioplyn. Na tyto se rovněž vztahují více uvedené legislativní akty, zejména pak RED II a její prováděcí akty a RED III. Trh biometanu pak v širším rozsahu upravují též Akční plán pro biometan (2022/230)¹² a v rámci REPowerEU¹³.

Dále dekarbonizační plynový a vodíkový balíček - [Směrnice 2021/803](#) a [Nařízení 2021/804](#). Komise zatím předpokládá, že metodologie v budoucím Delegovaném aktu, bude podobná jako pro dopravu.

¹⁰ <https://euractiv.cz/section/doprava/news/zakaz-spalovacich-motoru-ministri-zemi-eu-se-shodli-ze-emise-u-novych-aut-musi-klesnout-na-nulu/>

¹¹ https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13217-Count-your-transport-emissions-CountEmissions-EU_en

¹² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=SWD%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033922121>

¹³ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483>

[Nařízení 2021/805](#) o snižování emisí metanu v odvětví energetiky + **výchozí iniciativy: Strategie EU pro integraci energetického systému** (COM 2020/299), [Vodíková strategie](#) a [Strategie](#) pro snižování emisí metanu (COM 2020/663)

Výše uvedené shrnuje hlavní legislativní a politické akty v EU, které se týkají biopaliv. Další legislativní akty, zejména pak prováděcí předpisy nejsou vyčerpávajícím způsobem zahrnuty. Taktéž je nutné zohlednit fakt, že se implementace RED II může v jednotlivých státech významně lišit. V ČR např. Zákon o ochraně ovzduší a kritéria udržitelnosti a certifikace¹⁴. Kvalitativní charakter biopaliv a paliv obecně pak upravují konkrétní normy.

Dostupnost biomasy v ČR tato problematika byla řešena v rámci projektu NAZV QK1710307 „Ekonomická podpora strategických a rozhodovacích procesů na národní i regionální úrovni vedoucí k optimálnímu využití obnovitelných zdrojů energie, především pak biomasy, při respektování potravinové soběstačnosti a ochrany půdy.“, řešeného v letech 2017-2020. Výstupem projektu je Metodika identifikace a faktické dostupnosti konkrétního druhu biomasy (slámy). Metodika byla certifikována Ministerstvem zemědělství České republiky odborem environmentálním a ekologického zemědělství. [Odkaz na metodiku](#)

Metodika zohledňuje potřeby návratu organického uhlíku do půdy a další nároky zemědělského sektoru (podestýlky, krmiva...) jakož i využití biomasy jako stavebního materiálu, či využití v chemickém průmyslu, včetně stávajícího využití v produkci tepla a elektrické energie. Metodika fakticky vylučuje extenzifikaci využití fytomasy pro energetické účely.

Konec spalovacích motorů v EU 2050

Komise dala vypracovat analytickou studii LCA spalovacích a elektrických vozidel:

“Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA”¹⁵ Analýza obecně ukazuje, že pohon xEV má výrazně nižší dopady na životní prostředí ve všech typech vozidel a většině kategorií dopadů, přičemž vozidla BEV dosahují trvale lepších výsledků než všechny ostatní pohony. Vyšší dopady v některých kategoriích u vozidel xEV (např. vyčerpání abiotických zdrojů, minerálů a kovů) jsou obecně způsobeny použitím konkrétních materiálů. (zejména mědi a elektronických součástek).

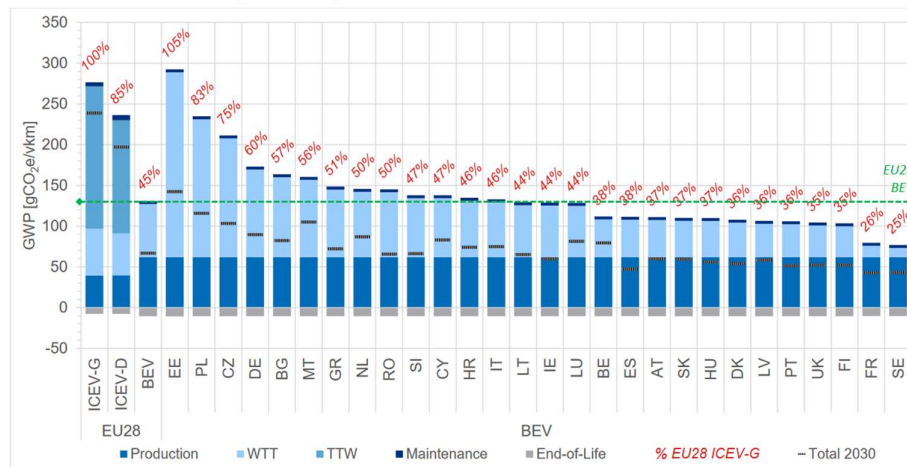
Analýza také ukazuje, že přínosy xEV z hlediska nižších dopadů na životní prostředí se liší v závislosti na regionálních a provozních podmínkách. Obrázek níže ukazuje, jak se liší (relativní) dopady xEV na emise skleníkových plynů mezi jednotlivými zeměmi, a to především v důsledku rozdílů ve skladbě výroby elektřiny v jednotlivých zemích (jako ukazatel uhlíkové náročnosti elektřiny dodávané koncovým uživatelům v dopravě),

¹⁴ <https://www.mzp.cz/cz/biopativa>

¹⁵ https://ec.europa.eu/clima/system/files/2020-09/2020_study_main_report_en.pdf (Results from the application of the methodology)

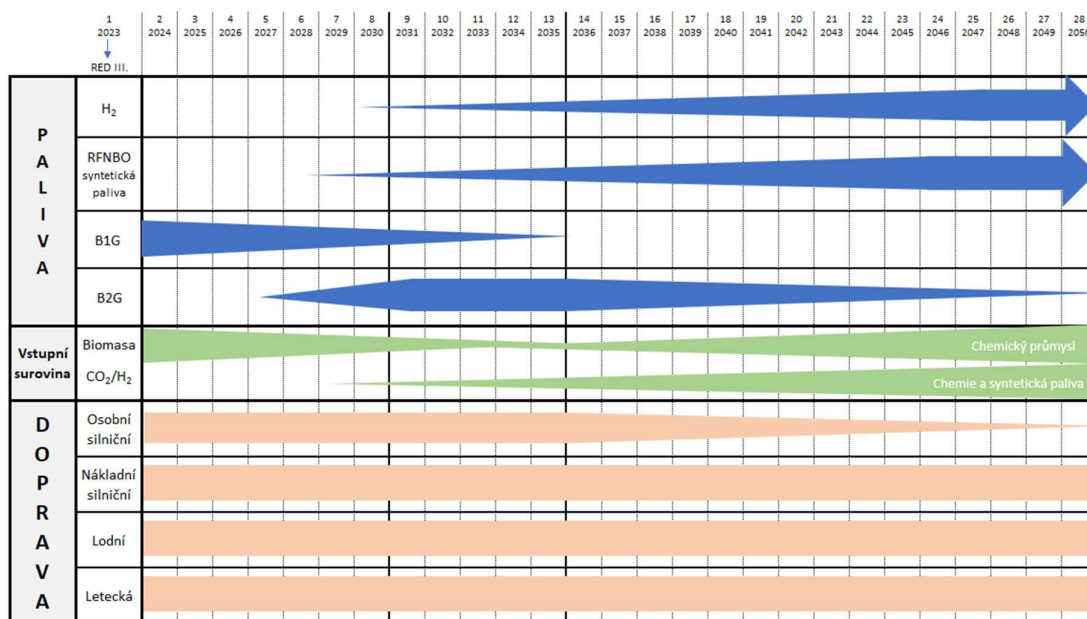
a v menší míře také v podílu jízdy po městských/venkovských/dálničních komunikacích a klimatických podmínkách.

Figure ES5: Comparison of Lower Medium Car lifecycle GWP impacts for conventional gasoline/diesel ICEVs and BEVs for different EU countries, Baseline scenario. Breakdown shown for new 2020 vehicles, and the total only for new 2030 vehicles.



Výsledky tyto studie rozporují čeští vědci kolem prof. Macka z ČVUT, kteří připravují vlastní studii s odlišnými výsledky, kde výhody EV oproti spalovacím motorům budou spochybňovány.

Na základě výše uvedených legislativních a právních faktorů bude budoucí vývoj spalovacích motorů v horizontech 2035 a 2050 v attributech PALIVA - VSTUPNÍ SUROVINA – DOPRAVA vypadat následovně:



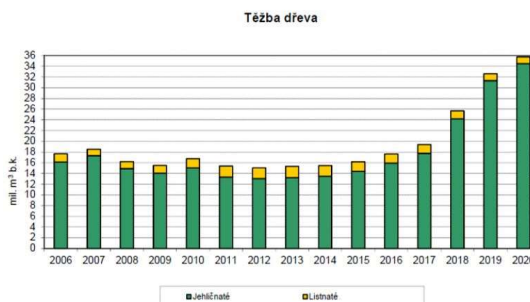
1. PILÍŘ - ODPADY

Biopaliva první generace (B1G) nenaplnila očekávání jak z kvantitativního tak environmentálního hlediska. Navíc konflikty vstupní suroviny, z hlediska ochrany půdy, biodiverzity, konfliktu průniku s potravinovým řetězcem mají v mnoha případech významné negativní dopady.

Evropská komise proto prosazovala druhou generaci (B2G) kde ve směrnici RED II (Renewable Energy Directive) definuje řadu kritérií udržitelnosti a emisí skleníkových plynů, která musí biokapaliny používané v dopravě splňovat, aby byly započítány do celkového 14% cíle a byly způsobilé pro finanční podporu ze strany veřejných orgánů. V oblasti vstupní suroviny směrnice RED II zavádí udržitelnost pro lesní suroviny a ve své příloze IX definuje co je možné považovat a využívat, jako odpadní surovinu, pro výrobu B2G.

1.1. LESNÍ ODPADY (DENDROMASA) – jedná se především o LTZ (lesní těžební zbytky).

Na konci roku 2020 lesní pozemky zabíraly plochu 2 677 329 ha a padl rekord v těžbě dřeva, která dosáhla bezmála 36 milionů kubíků. Téměř veškerý objem vytěženého dřeva pochází z nahodilé těžby (především kůrvec), obdobně, jako tomu bylo v roce 2019.



Perspektivy dendromasy pro B2G:

Těžba v posledních 3 letech je výrazně intenzivnější, než je dlouhodobý průměr (cca. 16 mil, kubíků). Jelikož mýtní věk v lesním hospodářství je cca 80 – 120 let, je zřejmé, že v střednědobém horizontu je předpoklad útlumu těžby a intenzivnější výsadby (v roce 2020 výsadba na 33 671 hektarech). Navíc odklonem od uhlí, podporou domácích topenišť (zelená úsporám) je zřejmé, že dendromasa bude mít prioritní využití v oblastech výroby tepla (případně kombinované výroby tepla a elektrické energie -KVET) a to v rámci regionálního využití. Dendromasu za perspektivu ve výrobě B2G v horizontu desítek let považujeme za neperspektivní.

1.2. BIOMASA (FYTOMASA) – ze ZPF – zemědělského půdního fondu.

Dle RED II v podmínkách ČR přichází v úvahu pouze sláma. V rámci projektu NAZV QK1710307 byla vypracovaná metodika s názvem: „**Metodika identifikace a faktické dostupnosti konkrétního druhu biomasy**“ zaměřená na dostupnost slámy pro výrobu kapalných B2G. Metodika zohledňuje potřeby návratu organického uhlíku do půdy (SOC -Soil Organic Carbon), jakož i další agro nároky na podestýlky, krmiva apod.

Perspektivy fytomasy -slámy pro B2G:

Z metodiky vyplývá, že možnosti využití slámy, jako významného strukturálního komponentu OZE, jsou v současnosti v podmínkách ČR **velice omezené** jak z kvantitativního, tak prostorového hlediska. Zlepšení nelze očekávat ani v budoucnu, kdy se v resortu zemědělství počítá se snižováním výměry obilovin a oživení živočišné výroby, a to zejména v odvětví jatečného skotu, které může vyvolat zvýšenou poptávku po objemném krmivu a stelivu (MZE, 2016). Navíc vlivem klimatických změn dochází k nestabilitě zemědělské produkce (výkyvy počasí, sucho, přivalové deště, krupobití, vymrzání plodin, škůdci). K tomu se dále přidává i zvyšující se degradace zemědělské půdy (Novotný, 2016, 2017) a snižování její výměry (MPO, 2019). S ohledem na uvedené skutečnosti považujeme využití slámy pro výrobu B2G za neperspektivní.

Bariéry využití biomasy jsou detailně popsány ve Foresight 2019 (část 2. Interakce), kde je podrobněji popsáno 10 zásadních bariér využívání biomasy a odpadní biomasy:

1. LCA - Life-Cycle Assessment a Biomass carbon impact
2. iLUC- Indirect land use change
3. Degradace půdního fondu a úbytek uhlíku v půdě
4. Biodiverzita - Druhová a rostlinná různorodost
5. Konflikt food-fuel
6. Konflikt konečného užití (Kotlíkové dotace)
7. Volatilita dostupnosti biomasy
8. Efektivita fotosyntézy
9. Konkurence konečného užití biomasy (energetické a pro chemický průmysl)
10. Cena biomasy a poptávka

APB – Akční plán pro biomasu, vypracovaný MZe a platný do roku 2020 uvádí 10,6 milionů tun/rok ze ZPF a 1,8 milionů tun lesních těžebních zbytků. Naše nová certifikovaná metodologie připouští pouze cca 1 milion tun slámy. LTZ jsou pro B2G prakticky nedostupné. **Celkově tedy, biomasu považujeme za neperspektivní zdroj pro využití v moderní mobilitě.**

Efektivnější využití biosložek z biomasy je v chemii a průmyslu:

Kyselina levulová	$C_5H_8O_3$	Palivové oxygenáty (etyl levulinát ¹⁷), rozpouštědla, náhrada za bisfenol A v polykarbonátu
3-Hydroxybutyrolakton	$C_4H_6O_3$	Meziprodukt pro vysoce účinné farmaceutické sloučeniny
Glycerol	$C_3H_8O_3$	Osobní a ústní hygiena, drogy a léčiva, potraviny a nápoje a polyetherpolyoly (pro polyuretan)
Sorbitol	$C_6H_{14}O_3$	Nemrzoucí směs, PET-podobné polymery, jako je polyethylisosorbid tereftalát (používá se pro hot-fill láhve)
Xylitol / arabinitol	$C_5H_{12}O_5$	sladidla, nenasycené polyesterové pryskyřice

Komerčně dostupné produkty – bio-based plasty z biomasy (cukrů) jsou uvedeny v následující tabulce:

Chemical	Companies	Brand name(s) and annual production	Application
1,3 Propanediol (PDO) $C_3H_8O_2$	DuPont Tate & Lyle	Zemea [®] and Susterra [®] – 135 million lbs.	Cosmetics, personal care and home cleaning products, aircraft deicing, antifreeze and heat-transfer industrial fluids DuPont™ Sorona [®] carpet
Polylactic acid (PLA) $C_3H_6O_3$	NatureWorks LLC	Ingeo [®] – 300 million lbs.	Food grade plastics – utensils, wrap, containers, packaging
Polyhydroxyalkanoate (PHA) $CH_2[OCH(R)(CH_2)_xCO]_nCH_2$	Metabolix SyntheZyme	Mirel [®] from Telles – 110 million lbs.	Packaging for cosmetic products and food products, injection-molded durable goods such as cell phone cases, hand-held devices
Polyethylene C_2H_4	Braskem	Green polyethylene – 400 million lbs.	Food packaging, drink bottles, plastic bags, trash containers, car parts
Polyols HO-R-OH	BiOH	BiOH polyols	Foam for furniture, bedding, automotive, carpet, construction, coatings, sealant, adhesive, and elastomers

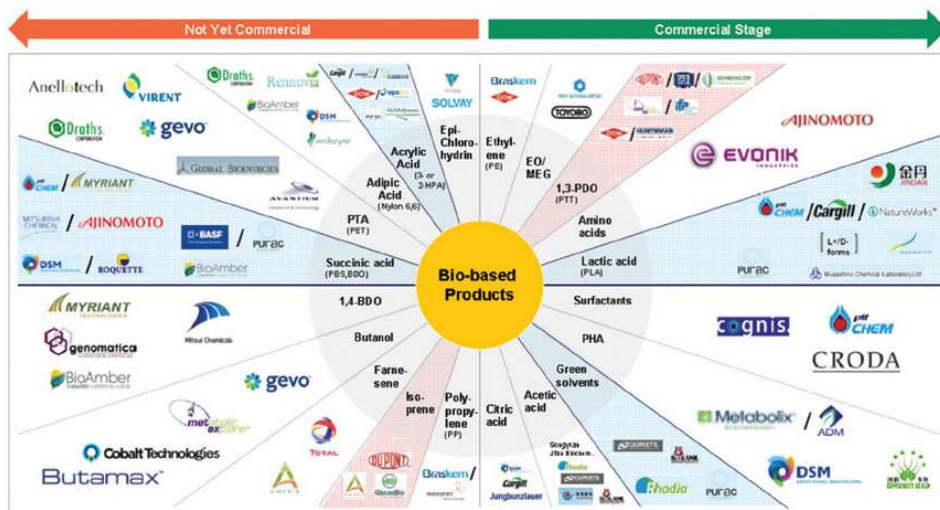
Tržní cena těchto bioproduktů závisí na dvou klíčových faktorech:

- nákladech na suroviny
- nákladech na zpracování

Impulsem pro výrobu mnoha bio-založených produktů bylo hledání alternativy k fosilním palivům, které podléhají kolísání cen ovlivňujícím ziskové rozpětí navazujících výrobků. V mnoha případech byli bioprodukty v období zavádění na trh dotováni.

¹⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010218018301007>

Úspěšné komerční uplatnění bioproduktů závisí na kritické potřebě zajistit velké množství biomasy při nízkých nákladech. V tom je zřejmá konkurenční paralela s produkcí biopaliv. Nasledující obrázky znázorňuje komerční využití biosložek (zelená šipka), tak ve stádiu R&D (červená šipka).¹⁸



Závěrem k využití biomasy – energetické využití je nežádoucí a z hlediska cirkulární ekonomiky nejméně výhodný proces. ČTPB primární využití biomasy v energetice nepodporuje. Naopak zdůrazňuje potřebu sofistikovaného využití BIO BASED produktů v chemickém průmyslu:

EU standarty pro biosložky

Table 1. European standards for bio-based products developed in CEN/TC 411 unless stated otherwise [8].

Standard	Title	Stage of Development *
EN 16575	Bio-based products: Vocabulary	Published 2014.
CEN/TR 16721	Bio-based products: Overview of methods to determine the bio-based content	Published 2014.
CEN/TS 16640	Bio-based products: Determination of the bio based carbon content of products using the radiocarbon method	Published 2014.
CEN/TR 16957	Bio-based products: Guidelines for life cycle inventory (LCI) for the end-of-life phase	Published 2016.
FprEN 16640	Bio-based products: Bio-based carbon content – Determination of the bio-based carbon content using the radiocarbon method	Waiting approval.
EN 16785-1	Bio-based products: Bio-based content – Part 1: Determination of the bio-based content using the radiocarbon analysis and elemental analysis	Published 2015.
prEN 16785-2	Bio-based products: Bio-based content – Part 2: Determination of the bio-based content using the material balance method	Waiting approval.
EN 16760	Bio-based products: Life cycle assessment	Published 2015.
EN 16751	Bio-based products: Sustainability criteria	Published 2016.
EN 16848	Bio-based products: Requirements for business to business communication of characteristics using a data sheet	Published 2016.
FprEN 16935	Bio-based products: B2C reporting and communication – Requirements for claims	Waiting approval.
CEN/TS 16766	Bio-based solvents: Requirements and test methods	Published 2015.
EN 16807	Bio-Lubricants: Criteria and requirements of bio-lubricants and bio-based lubricants	Published 2016. ^b
CEN/TS 16398	Plastics: Template for reporting and communication of bio-based carbon content and recovery options of biopolymers and bioplastics – Data sheet	Published 2012. ^c
FprCEN/TS 17035	Surface active agents: Bio-based surfactants – Requirements and test methods	Waiting approval. ^d

¹⁸ <http://docplayer.net/44941941-From-shale-gas-to-biomass-the-future-of-chemical-feedstocks.html>

1.3. KOMUNÁLNÍ ODPADY (KO)

Komunální odpady jsou novou aktuální technologickou výzvou. Konec možného skládkování je stanoven na rok 2030. Klasické spalování KO není dostatečně environmentálně efektivní forma cirkulárního využití odpadů.



Perspektivy KO:

KO je bohatý zdroj různých chemických prvků a sloučenin. Proto efektivní využívání KO jako zdroje surovin pro chemický průmysl (vodík, syngas) a následné deriváty považujeme za perspektivní oblast strategického výzkumu a implementace. Z technologické oblasti je perspektivní především uplatnění zplynování které je výrazně environmentálně příznivější než spalování a nabízí jak možnou separaci vodíku, tak využití syngasu se širokou paletou možných aplikací v chemickém průmyslu, plastech či výrobě biopaliv. KO je součástí RED II a této oblasti se budeme intenzivně dále věnovat.

Průběžně sledujeme a podporujeme plazmovou gasifikaci jako vhodnou technologii transferu mixu vstupní suroviny na relativně velmi čistý syngas.

1.4. ČISTÍRENSKÉ KALY z ČOV

Aplikace čistírenských kalů na zemědělské půdě byla dosud rozšířeným způsobem jejich využití. Od příštího roku ovšem dojde ke zpřísnění limitů pro jejich použití na půdě. Konec přechodného období k 31. 12. 2022 podle § 81, odstavce 5 a § 82, odstavce 1 vyhlášky č. 273/2021 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady bude znamenat velkou změnu. Na zemědělskou půdu budou moci být ukládány pouze kalů, které splní mikrobiologická kritéria definována v příloze č. 28 této vyhlášky. Tato kritéria nejsou dosažitelná běžně využívanou skladbou kalové linky na ČOV.



Výjimku tvoří anaerobní stabilizace v termofilním stupni, či naopak aerobní termofilní stabilizace, kdy k ohřevu kalů na teplotu zajišťující hygienizaci je využíván čistý kyslík. Tyto aplikace však nejsou na ČOV běžně rozšířené. Chce-li provozovatel ČOV i nadále směřovat produkované čistírenské kalů na zemědělskou půdu, musí stávající kalovou linku rozšířit o technologii hygienizace, od relativně jednoduchého systému vápnění, přes pasterizaci až po energeticky i finančně velmi náročnou technologii sušení. Tento proces však na jedné straně

výrazně snižuje objem přebytečných kalů, kdy je dosahováno až 90 % sušiny (odvodněný kal má cca 20 % sušiny), na druhé straně umožňuje energetické využití takto vysušených kalů.

Jinou možností pro provozovatele ČOV je najít nové využití pro čistírenské kalý a místo na zemědělskou půdu je například vyvážet do kompostáren podle podmínek stanovených výše uvedenou vyhláškou. V každém případě pro vlastníky a provozovatele ČOV konec přechodného období bude znamenat buď investice do stávající kalové koncovky, nebo zvýšené náklady na převoz a likvidaci kalů ve vhodných zařízeních.

Perspektivy kalů z ČOV:

Čistírenské kalý jsou bohatým zdrojem uhlovodíků. Omezení možnosti vývozu na pole, je výzvou pro technologické zpracování kalů efektivnější než je anaerobní digesce v bioplynové stanici. Jednou



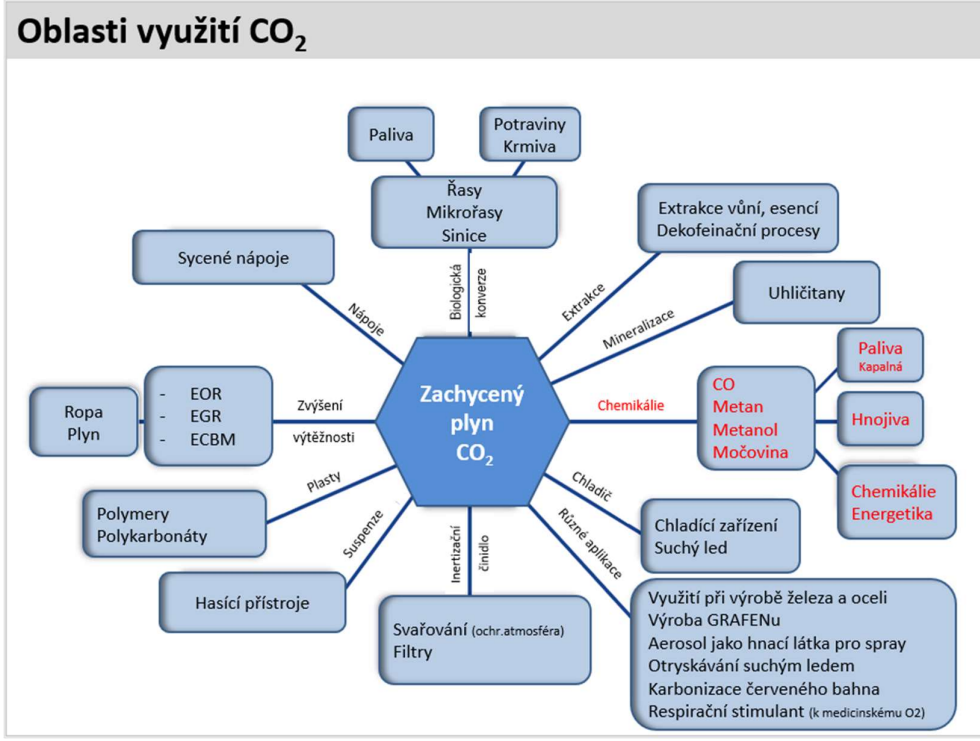
z perspektivních možností se jeví hydrotermální skapalňování (HTL) a výroba tzv. biooleje a to buď procesem pyrolýzy (tá ovšem vyžaduje sušinu) nebo procesem HTL, který naopak podíl vody v surovině vyžaduje.

HTL se věnuje dlouhodobě dánská Aarhus University. Evropský projekt HyFlexFuel¹⁹ se zaměřuje na dostupný regionální mix, kde kalý jsou významnou složkou a klade se za cíl zvýšit TRL z TRL 2-4 na TRL 5, včetně modernizace meziprojektu biosuroviny na finální palivové produkty.

V Kanadském Vancouveru se proces HTL aplikuje již na čističce, včetně separace fosforu. Proces HTL i navzdory vysokým aplikačním tlakům považujeme za perspektivní.

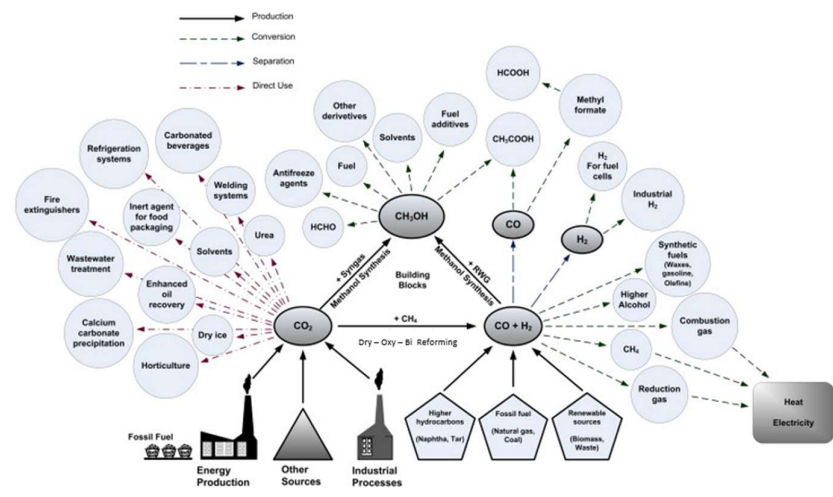
¹⁹ <https://www.hyflexfuel.eu/>

2.2. Oblasti využití CO₂



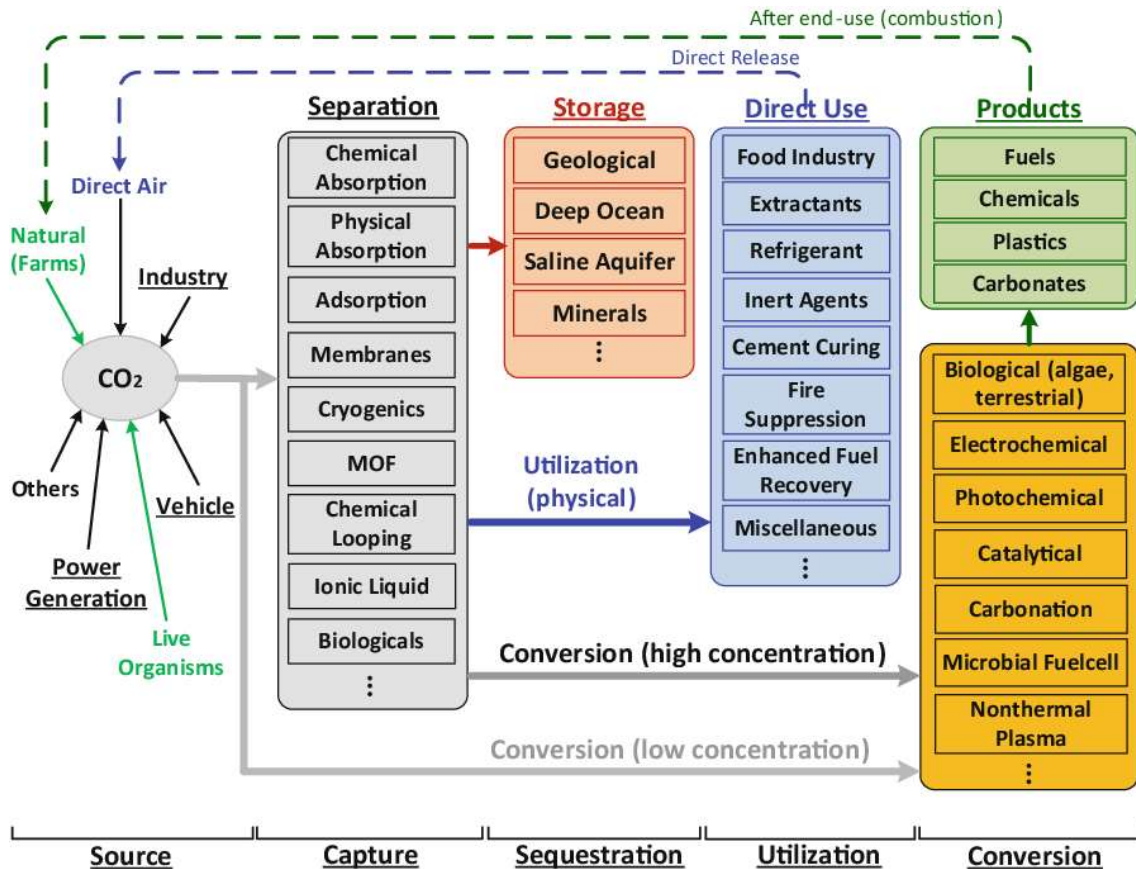
Červeně vyznačená je cesta chemických či energetických transformací.

Využití v průmyslové praxi²² je v zásadě buď přímé (direct use) a nepřímé využití přes syngas (CO+H₂).



²² <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212982015000189>

Komplexnost problematiky CO₂ vystihuje obrázek ²³



Je důležité si uvědomit skutečnost, že na báze uhlíku bylo popsáno přibližně 10 milionů organických sloučenin dnes vyráběných z fosilních zdrojů. Dnešní současné negativní vnímání CO₂ přispívá k nesprávnému a nevědeckému přístupu k potřebě molekuly uhlíku pro naši civilizaci. Faktem totiž je, že v případě konce fosilních zdrojů (ropa, plyn, uhlí) nedostatku biomasy pro průmysl (viz metodologie dostupnosti biomasy) či trvalé zakomponování CCS do geologických úložišť, či mineralizace, bude v budoucnu hrozit nedostek uhlíku pro chemickou výrobu!!!

²³ <https://www.semanticscholar.org/paper/Chapter-2-Post-combustion-Carbon-Capture-%2C-Storage/e386121c8121aac561a39bc824699d3492b70b7c/figure/0>

Přímé využití CO₂

Kromě běžného využití v přírodních procesech fotosyntézy (horticulture), či dalších běžných využitích v potravinářství a nápojích (carbonated beverages), suchého ledu (dry ice), hasící přístroje (fire extinguishers), svařování v ochranné atmosféře (welding systems) apod. Velmi perspektivní oblast je výroba močoviny (urea) tedy vytvoření chemické vazby C-N pomocí elektrochemické syntézy. Elektrochemická syntéza močoviny poskytuje udržitelnou strategii, kterou lze snadno začlenit do aktuálně distribuovaných systémů obnovitelné energie. Hlavní výzva, která bránila rozvoji této techniky, spočívá ve vývoji pokročilých elektrokatalytických procesů pro využití bohatých a levných zdrojů anorganického uhlíku a dusíku pro vysoce produktivní výrobu močoviny. Elektrokatalytická reakce přeměňuje CO₂ a oxid dusnatý (NO) na močovinu, přičemž zdrojem vodíku je voda, za okolních podmínek.²⁴

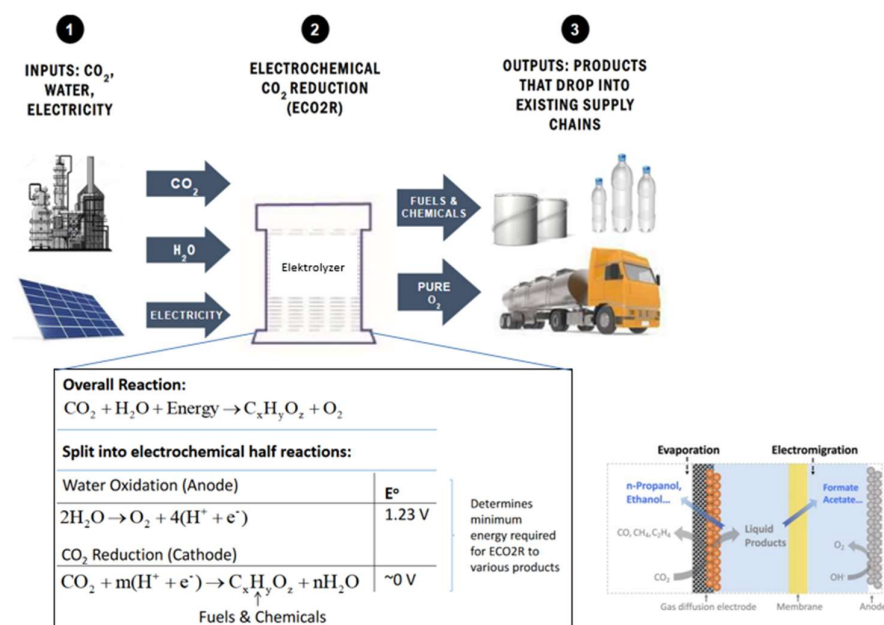
Neřímé využití CO₂ transferem přes CO (uhličitán uhelnatý), který je na rozdíl od CO₂ již dobře reaktivní molekulou s možností transferu na uhlovodíky.

Výroba uhlovodíku bez přímého využití vodíku je dnes největší výzvou pro výzkum.

V této oblasti již kromě klasických katalytických transferů se intenzivně angažují i nové vědní odbory. Jak bylo zmíněno centrosymetrická, nepolární a málo elektrofilní molekulu se věda usiluje přinutit k uhlovodíkovým reakcím v jedнокrokovém procesu, především přímo v kapalině, která obsahuje vodík (ideálně voda, pára). Tento přístup tedy uvolní C z molekuly CO₂ a zaváže hon a H₂ k výrobě uhlovodíků. Zjednodušeně se jedná o coelektrolyzu CO₂ a H₂

CO-ELECTROLYSIS Electro –chemical direct CO₂ transformation










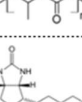
Chemicals such as **methanol, methane, formic acid** and other chemical building blocks also have great potential in the energy sector.



²⁴ <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenergylett.1c02471#>





Výzkum těchto procesů se zaměřuje na složení elektrolytu, složení elektrod a celkově procesování transformace. Problematika je ale složitá a vyžaduje kooperaci různých vědních oborů.

2.3. Hlavní chemické produkty na základě CO₂ a jejich uplatnění na trhu²⁵ :

Název chemikálie		vzorec	Roční produkce (t/rok)	CO ₂ spotřeba (t/rok)
Močovina	Urea		1.5 × 10 ⁸	1.12 × 10 ⁸
Metanol	Methanol		1.0 × 10 ⁸	2.0 × 10 ⁸
Formaldehyd	Formaldehyde		9,7 × 10 ⁶	není k dispozici
Kyselina mravenčí	Formic Acid		7 × 10 ⁵	není k dispozici
Kyselina saliciová	Salicylic Acid		7 × 10 ⁴	3 × 10 ⁴
Deriváty kyseliny uhličité	Cyclic carbamate		8 × 10 ⁴	4 × 10 ⁴
Ethylenkarbonát	Ethylene carbamate		8 × 10 ⁴	není k dispozici
Dimetylkarbonát	Dimethyl carbamate		1 × 10 ⁷	není k dispozici
Kopolymery	Copolymers		není k dispozici	není k dispozici
Vzácné chemikálie např. Biotin...	Fine chemicals		není k dispozici	není k dispozici

TRL – technologická připravenost uplatnění produktů z CO₂ na trhu:

²⁵ https://mdpi-res.com/d_attachment/materials/materials-12-03902/article_deploy/materials-12-03902.pdf

		Stadium vývoje	Tržní potenciál	Intenzita vývoje	Potenciál redukce CO ₂
 Mineralizace	Cement	High	High	High	High
	Stavební materiál	High	High	High	High
	Odpadní betony	High	High	High	High
 Chemikálie intermediáty	METANOL	Medium	Medium	Medium	Medium
	KYSELINA MRAVENČÍ	Medium	Medium	Medium	Medium
	SYNGAS	Medium	Medium	Medium	Medium
 PALIVA	METAN	Medium	Medium	Medium	Medium
	e-DIESEL	Medium	Medium	Medium	Medium
	DME	Medium	Medium	Medium	Medium
 Polymery	Polyoly	Medium	Medium	Medium	Medium
	Polkarbonáty	Medium	Medium	Medium	Medium
	Cyklické karbonáty	Medium	Medium	Medium	Medium
	Polyakrylát sodný	Medium	Medium	Medium	Medium
	Kyselina akrylová	Medium	Medium	Medium	Medium

High	TRL do 9 na trhu počet vývojářů >50 dlouhodobé snížení CO ₂	Medium	TRL 7-8 předkomerční fáze počet vývojářů 10-50 snížení CO ₂ náhradou fosilu	Low	TRL < 6 cílení trhu nejasné počet vývojářů < 10 snížení CO ₂ minimální
-------------	---	---------------	---	------------	--

Z pohledu „likvidace“ CO₂ tedy trvalé procesy CCS (Carbon Capture Storage) mají nejvyšší potenciál redukce v oblasti mineralizace včetně vysokého tržního potenciálu.

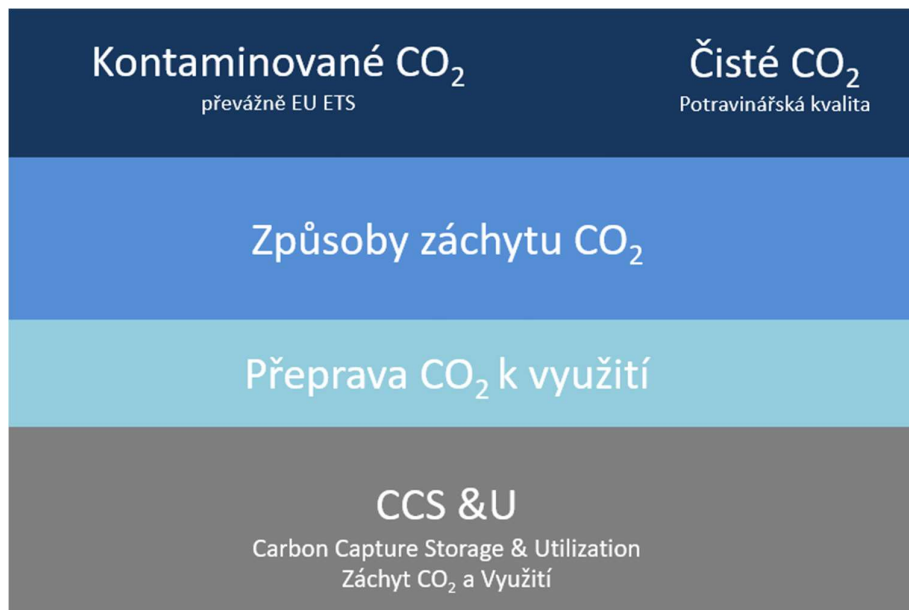
Nicméně vývoji chemikálií či tzv.e-paliv se věnuje značná pozornost vědeckého výzkumného potenciálu.

2.4. STRUKTURÁLNÍ KROKY PROCESU CCSU

Procesy využití CO₂ lze strukturovaně dělit na několik relativně samostatných kroků.

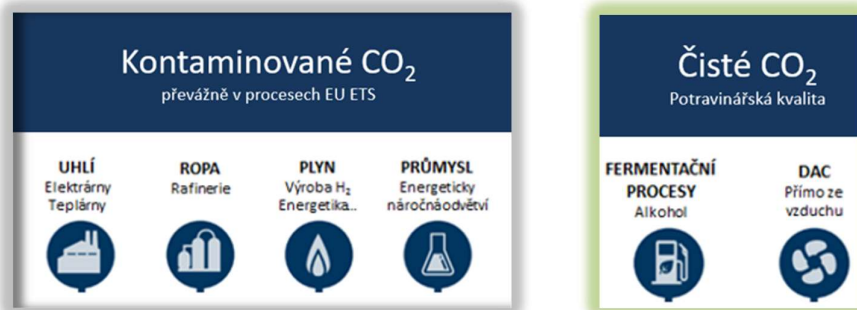
Jedná se o 4 základní technologické kroky:

1. identifikaci zdroje, resp. čistoty/nečistoty CO₂ které bude k dispozici
2. identifikace resp. volba efektivního záchytu, případně čištění CO₂
3. přeprava plynu/případně zkapalněného CO₂ do transferšní jednotky
4. samotná transferšní technologie CO₂



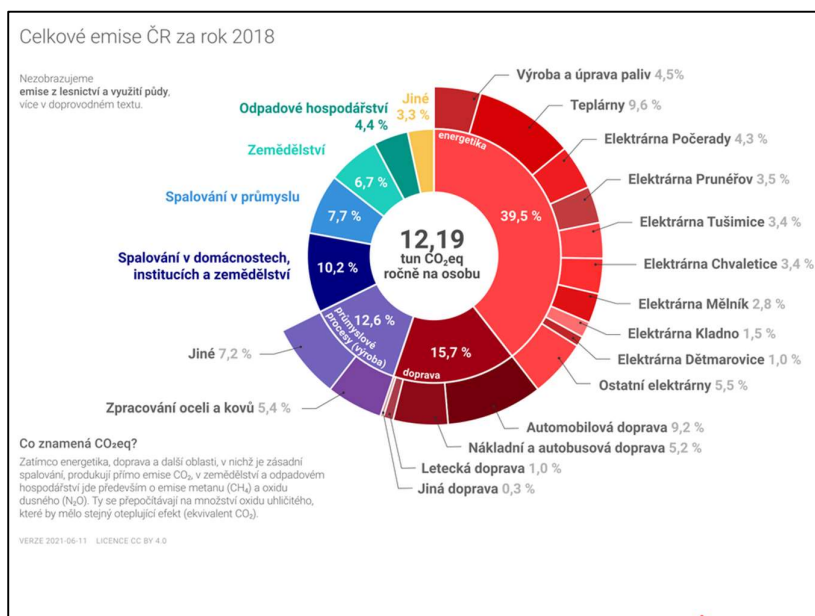
2.4.1. CO₂ identifikace -vstupní suroviny

Řetězec kroků CCSU začíná identifikací zdroje CO₂ jako vstupní suroviny (feedstock). Identifikují se dva základní zdroje - kontaminované a čisté CO₂.



Kontaminované CO₂ je emisní externalita průmyslové výroby a výroby fosilní energie, které emituje cca 12 tun CO₂/obyvatele ČR, což nás (jako průmyslovou zemi) řadí na přední místa emitentů CO₂ v rámci EU ²⁶:

²⁶ <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/emise-cr-detail>



Kontaminované CO₂ ze spalovacích procesů je součástí celého spektra chemických sloučenin, které se uvolňují při termickém zpracování fosilních zdrojů. Tyto chemické sloučeniny (kontaminanty jako sirovodík a podobně) vyžadují pro procesy chemické transformace nutné kroky - separace a čištění tak, aby kontaminanty neměli nechtěný negativní vliv na funkčnost katalyzátorů. V tomto ohledu se jeví zajímavě i mikrobiologická cesta, kde speciální mikroorganismy mohou kontaminaty tolerovat ale obvykle jsou zas procesy transferu řádově pomalejší.

Největší producenti oxidu uhličitého ČR v roce 2020:

Zdroj (elektrárna, továrna)	emise CO ₂ (tuny)
Počeradý (uhelná elektrárna)	4 554 400
Tušimice 2 (uhelná elektrárna)	3 729 131
Vřesová (elektrárna na plyn vyrobený z uhlí a zemní plyn)	3 264 758
Pruněřov 2 (uhelná elektrárna)	2 849 359
Třinecké železářny (železo, ocel)	2 843 953

Liberty Ostrava (železo, ocel)	2 341 035
Chvaletice (uhelná elektrárna)	2 242 402
Unipetrol (rafinérie, chemická výroba)	2 230 173
Ledvice (uhelná elektrárna)	2 209 071
Kladno (uhelná elektrárna)	1 749 714

Poměr molárních hmotností CO₂ a C je zaokrouhleně **44:12** což znamená, že jenom Počerady můžou nabízet cca 0,6 Mio tun uhlíku pro žádoucí transformace.

Čisté CO₂ je emisní externalita fermentačních procesů. Tedy odpad vinárenského průmyslu, pivovarnictví, výroby alkoholu všeobecně. Obrovskou výhodou je čistota odpadního CO₂, které má tzv.potravinářskou kvalitu. Tedy je možné ho přímo využít při výrobě sycených nápojů či suchého ledu. Produkce čistého CO₂, co se množství týče, je však relativně zanedbatelná ve srovnání s průmyslovou produkcí kontaminovaného CO₂. Výhodou je ale jeho využití pro pilotní demonstrace možných transferů, jelikož neobsahuje žádné kontaminanty a tím jsou chemicko-technologické transfery mnohem jednodušší.

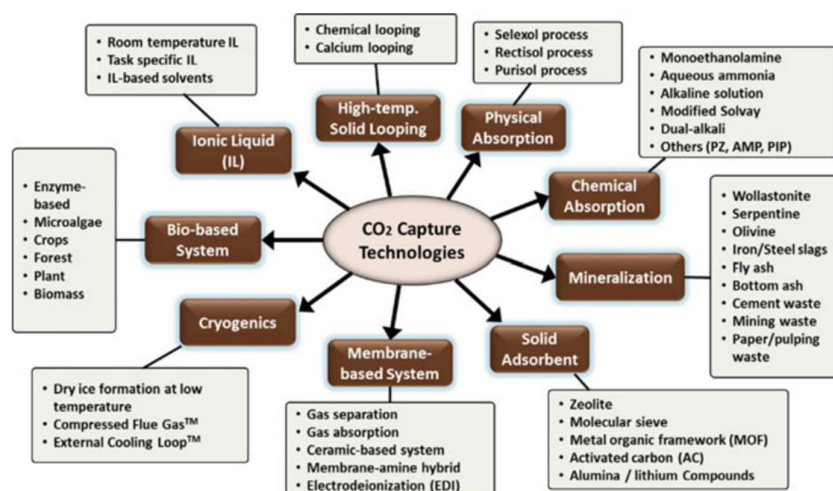
2.4.2. CARBON CAPTURE – Záchyt CO₂

Prvotním krokem k CCSU je tedy CCS (storage) resp. záchyt CO₂ tak, aby bylo možné technologicky realizovat následné procesy využití uhlíku z této molekuly.



CO₂ – záchyt po spalování - post combustion carbon capture (PCCC)

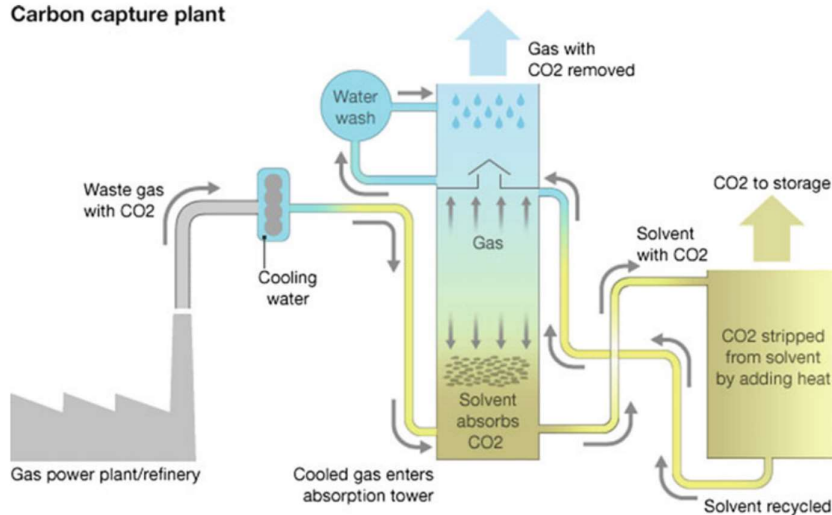
Záchyt CO₂ ze spalin vzniklých po spálení paliva na bázi uhlíku. V konvenčních elektrárnách na fosilní paliva (uhlí/zemní plyn) je výzvou oddělení relativně nízké koncentrace CO₂ od velkého množství dusíku ve spalinách. Existují různé přístupy k zachycování CO₂ ze spalin nebo vzduchu po spalování ale ačkoli jsou k dispozici různé technologie, pouze několik procesů bylo nasazeno ve velkém měřítku. Různé možnosti a způsoby PCCC aplikované na různé typy proudů spalin představují jedinečné výzvy pro aplikovaný výzkum.²⁷



Nejrozšířenější způsob PCCC je aminová vypírka – viz schéma zařízení na zachycování uhlíku aminem v Norsku v Technologickém centru Mongstad TCM.

²⁷ <https://www.semanticscholar.org/paper/Chapter-2-Post-combustion-Carbon-Capture-%2C-Storage/e386121c8121aac561a39bc824699d3492b70b7c>

Carbon capture plant



Výzkum se intenzifikuje ale především v oblasti membrán, iontových kapalin, chemické či fyzikální adsorpci. VŠCHT se věnuje karbonátové smyčce. Významně se v ČR na záchytu podílí I VUT Brno team profesora Jíchu.

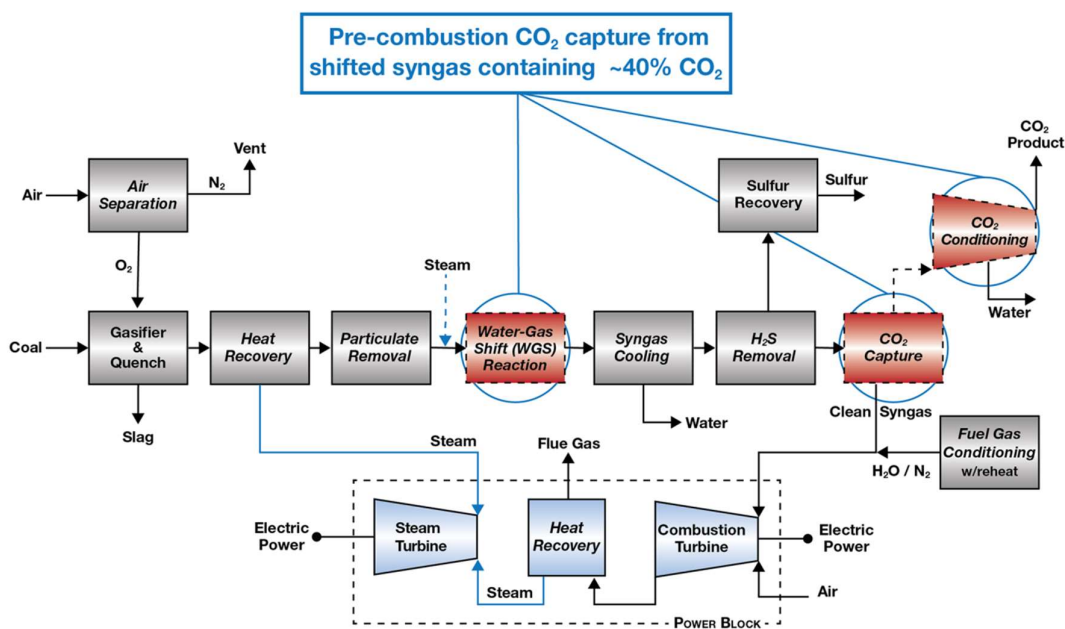
Z hlediska biomasy je zas výzkum zaměřen na fotosyntézu především C4 či využití plynu v oblasti řas a mikrořas.

Za vhodnou se považuje i mineralizace CO₂, s využitím ve stavebnictví.

CO₂ – záchyt před spalováním - Pre combustion carbon capture²⁸

Integrovaný kombinovaný cyklus zplyňování (IGCC) s před spalováním má mnoho výhod oproti systémům post-combustion a oxyfuel, protože CO₂ bude pod vyšším tlakem, čímž se proces separace stane efektivnějším a snadným pro sekvestraci. Proces separuje CO₂ ze zplyňování a reformingu, při nichž vzniká syngas, sestávající převážně z H₂, CO a CO₂. V elektrárně s integrovaným zplyňovacím kombinovaným cyklem (IGCC) reaguje palivo na bázi uhlíku (tj. uhlí) s párou a kyslíkem pod tlakem za vzniku syngasu, který se používá k pohonu generátoru plynové turbíny k výrobě elektřiny.

Rekuperované teplo se používá k výrobě páry, která také pohání turbínový generátor určený k výrobě elektřiny. Uhlík je zachycen ze syngasu **předtím, než je spálen** v plynové turbíně.

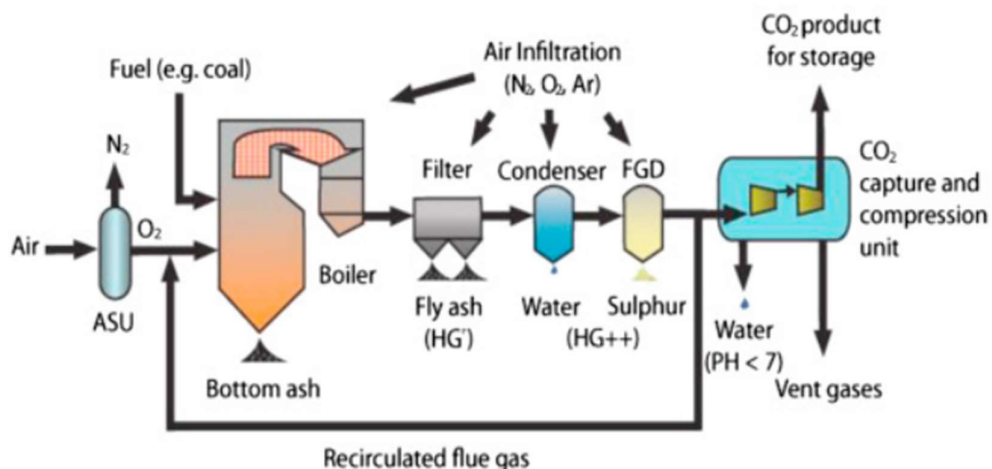


²⁸ <https://netl.doe.gov/coal/carbon-capture/pre-combustion>

2.2.3. CO₂ – záchyt OXYFUEL

Spalování kyslíkem je proces spalování paliva pomocí čistého kyslíku nebo směsi kyslíku a recirkulovaných spalin místo vzduchu. Protože se dusíková složka vzduchu neohřívá, snižuje se spotřeba paliva a jsou možné vyšší teploty plamene.

Hlavním účelem použití kyslíkového spalování v uhelných elektrárnách je generování spalin s velmi vysokou koncentrací CO₂ a vodní páry, což umožňuje oddělit nebo zachytit CO₂ ze spalin výhradně pomocí nízkoteplotních procesů dehydratace a odsíření. Mezi výhody kyslíkového spalování patří snížení emisí NO_x, vysoká čistota CO₂ a nižší objem plynu díky zvýšené hustotě. Schéma typického systému kyslíko-palivového spalování: ²⁹



ASU – Air Separation Unit – důležité zařízení na separaci vzduchu. Odděluje atmosférický vzduch na jeho primární složky dusík a kyslík, a někdy také argon a jiné vzácné inertní plyny. Nejběžnější metodou pro separaci vzduchu je frakční destilace.

²⁹ <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/oxyfuel-combustion>

CO₂ – záchyt přímo ze vzduchu - DAC (Direct Air Capture)

Přímé zachycování vzduchu je proces zachycování oxidu uhličitého přímo z okolního vzduchu a vytváření koncentrovaného proudu CO₂ pro sekvestraci nebo využití.



Vědci již dlouho spekulují o tom, že takzvané technologie "negativních emisí", jako je odstraňování CO₂, by mohly hromadění uhlíku v ovzduší nejen zpomalit, ale dokonce i zvrátit. Dřívější odhady stanovovaly náklady na odsávání uhlíku ze vzduchu na 600 dolarů za tunu - příliš drahé na to, aby se DAC mohl považovat za životaschopné řešení. Výsledky R&D indikují, že negativní emise nejen že je technicky možné, ale může být i finančně proveditelné.

V současnosti je v provozu 19 závodů DAC v Evropě, USA a Kanadě. Většina závodů je malá a zachycený CO₂ pro použití – například pro sycení nápojů.

Registrujeme dnes velmi zajímavé aplikace/projekty/startupy ³⁰ které je vhodné odborně analyzovat:

1. Carbon Engineering ³¹ a partner 1PointFive³²
2. Storegga ³³
3. Petrofac ³⁴
4. HIF (Highly Innovative Fuels) HARU ONI ^{35 36}
5. Norsk e-fuel ³⁷

³⁰ <https://carboncurve.substack.com/p/8-unique-direct-air-capture-companies>

³¹ <https://carbonengineering.com/>

³² <https://www.1pointfive.com/>

³³ <https://www.storegga.earth/news/2021/news/direct-air-capture-project-awarded-funding-under-government-plans-to-make-uk-world-leader-in-greenhouse-gas-removals/>

³⁴ <https://www.petrofac.com/media/news/petrofac-builds-direct-air-capture-into-its-net-zero-plan/>

³⁵ <https://www.hifglobal.com/home>

³⁶ <https://www.siemens-energy.com/global/en/news/magazine/2021/haru-oni.html>

³⁷ <https://www.norsk-e-fuel.com/en/>

6. Heirloom – mineralizace CO₂ ³⁸
7. Mission Zero ³⁹
8. SUSTAREA ⁴⁰
9. NOYA ⁴¹
10. VERDOX ⁴²
11. Carbon Infinity ⁴³
12. Carbon Colect ⁴⁴
13. Carbon Capture ⁴⁵

Problematiku DAC zpracovala ČTPB s VŠCHT v samostatné studii.

2.4.3. PŘEPRAVA CO₂ k využití - Transport



CO₂ je možné přepravovat ve třech skupenstvích: plynném, kapalném a pevném. V komerčním měřítku se pro přepravu plynného a kapalného oxidu uhličitého používají nádrže, potrubí a lodě. Plyn přepravovaný při tlaku blízkém atmosférickému zabírá tak velký objem, že jsou zapotřebí velmi rozsáhlá zařízení.

³⁸ <https://carboncurve.substack.com/p/heirloom>

³⁹ <https://missionzero.tech/>

⁴⁰ <https://www.sustaera.com/>

⁴¹ <https://www.noya.co/>

⁴² <https://verdox.com/#technology>

⁴³ <https://www.carboninfinity.com/>

⁴⁴ <https://mechanicaltrees.com/>

⁴⁵ <https://www.carboncapture.com/about/>

Rozdíl mezi plynovodem zemního plynu a plynovodem pro CO₂ je minimální. Celosvětově existuje více než 8 000 km potrubí pro přepravu CO₂. Většina je na pevnině USA. Pro srovnání, existují pouze dva plynovody v Severním moři, oba na norském území (spojující dvě úložiště CO₂ společnosti Equinor ve Sleipneru a Snøhvitu).

Zdá se, že v oblasti čištění a zkapalňování je významným hráčem na trhu firma LINDE ⁴⁶. Nabízí Flexibilní zařízení na čištění a zkapalňování CO₂ - např. provozní kapacitu lze snadno upravit na požadovanou výstupní úroveň. Konstrukce zařízení může být přizpůsobena všem variacím zdrojů napájecího plynu a může být spuštěna a vypnuta během několika hodin.

Jsou ale i další subjekty které proklamují efektivní zkapalňování ze spalín či zplodin z výroby železa a z fermentačních plynů. Např. Britské COSMO ENGINEERING ⁴⁷. Získaný CO₂ se stlačuje a chladí, aby se mohl zkapalnit a vyčistit, čímž vzniká zkapalněný CO₂ vysoké čistoty (který splňuje normy pro potravinářské přísady).

TECHNO ENGINEERING ⁴⁸ nabízí zkapalňování a čištění nečistého nízkotlakého plynu CO₂ z vedlejších produktů výroby čpavku. Výsledkem je vyčištěný vysokotlaký kapalný CO₂ potravinářské kvality.

Společnost BRIGHT ⁴⁹ CLARKE ENERGY ⁵⁰ BRIGHT BIOMETHANE SYSTEMS ⁵¹ MEHRER ⁵² ale i další výrobci se zaměřují na využití CO₂, který je odpadem při výrobě bioplynu.

PENTAIR HAFFMANS ⁵³- CO₂ recovery system zachytu CO₂ z kvasných procesů.

Společnost TOMCO Systems ⁵⁴ vyrábí zařízení pro skladování CO₂, včetně horizontálních a vertikálních nádrží na CO₂ v mnoha velikostech.



V ČR se problematice zkapalňování a transportu CO₂ věnuje Ústav termomechaniky Akademie Věd (Ing.Václav Vinš Ph.D.) ⁵⁵

⁴⁶ <https://www.linde-engineering.com/en/process-plants/co2-plants/co2-purification-and-liquefaction/index.html>

⁴⁷ <https://www.cosmoeng.co.jp/english/service/ctg02/co2recovery.html>

⁴⁸ <https://mosengg.com/co2-liquefaction-plant.html>

⁴⁹ <https://www.bright-rng.com/en/co2-recovery/>

⁵⁰ <https://www.clarke-energy.com/2022/sanamethan-biogas-co2-recovery-plant/>

⁵¹ <https://www.biogasworld.com/product/biogas-management/bright-biomethane-co2-recovery/>

⁵² <https://www.mehrer.de/en/company/credentials/171-carbon-dioxide-recovery>

⁵³ <https://foodandbeverage.pentair.com/en/products/co2-recovery-plant-cru>

⁵⁴ <https://tomcosystems.com/product/co2-storage/>

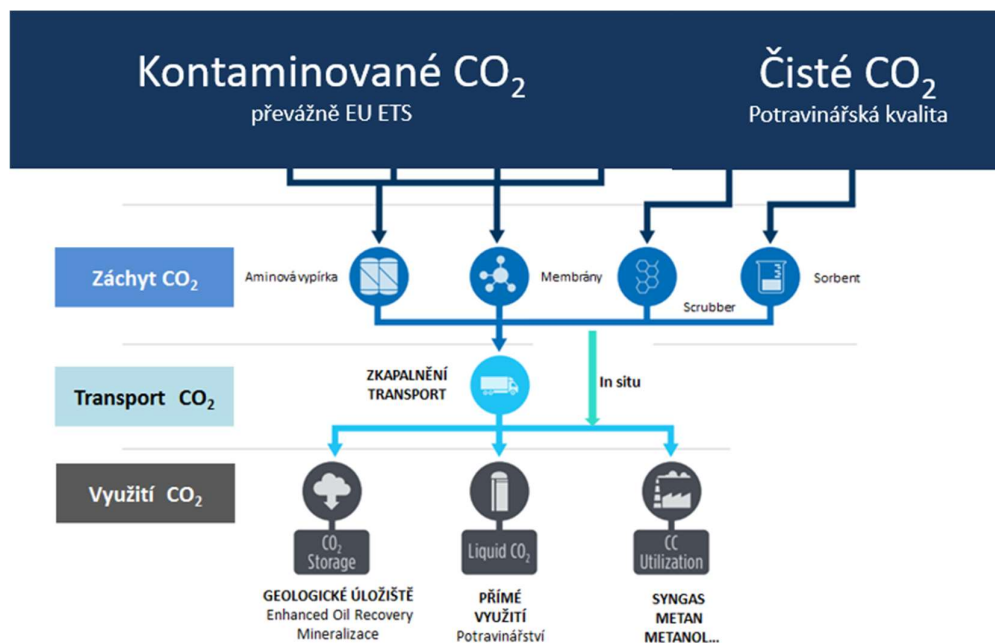
⁵⁵ <https://www.it.cas.cz/vvins/>

Zkapalňování oxidu uhličitého je složitý proces ⁵⁶, který využívá různé komprese a expanze k dosažení vysokých tlaků a velmi nízkých teplot kapalného oxidu uhličitého. Proces zchlazení kapalného oxidu uhličitého na teplotu nižší, než je jeho kritická teplota, aby mohl vzniknout kapalný oxid uhličitý při určitém vhodném tlaku, rovněž nižším než je kritický tlak.

Kromě zkapalnění a následného transportu se intenzivně zkoumá využití přímo in-situ. Tedy přímo v místě vzniku. Jedná se především o nízkoteplotní a vysokoteplotní elektrolýzu CO₂.

2.4.4. VYUŽITÍ CO₂

Posledním krokem procesu CCSU tedy po záchytu je právě "U" Utilization. Původní úsilí ukládání plynu do geologických podloží řeší stránku environmentální, ale neřeší moderní způsob výroby uhlovodíků, které jsou založeny na procesech syntéz uhlíku, který je vázán ve fosilních zdrojích. Proto se vědecký svět zaměřuje na "U" Utilization. Jelikož je molekula CO₂ téměř inertní (pevná dvojná vazba C=O=C, která je velmi pevná a není snadné z ní uhlík uvolnit k dalším syntézám a reakcím).



⁵⁶ https://mdpi-res.com/d_attachment/applsci/applsci-09-04467/article_deploy/applsci-09-04467.pdf?version=1571732958

2.4.4.1. Ukládání (vstřikování) CO₂ do geologických úložišť CO₂-EOR ⁵⁷

Výhodou procesu je, že je již ve velkém realizován v procesech tzv. EOR (Enhanced Oil Recovery) ⁵⁸, což je zefektivnění těžby ropy. EOR nabízí značné potenciální výhody, kdy může zvýšit extrakci ropy z ložisek o 30% až 60%.

Donedávna pocházela většina CO₂ používaného pro EOR z přirozeně se vyskytujících ložisek. Využívají se však nové technologie, které umožňují získávat CO₂ z průmyslových aplikací, jako je zpracování zemního plynu, hnojiv, etanolu a vodíkových závodů v místech, kde nejsou k dispozici přirozeně se vyskytující ložiska.

Program výzkumu a vývoje DOE se přesouvá do nových oblastí a zkoumá nové techniky, které by mohly výrazně zlepšit ekonomické výsledky a rozšířit použitelnost vstřikování CO₂ na širší skupinu ložisek; rozšiřuje tuto techniku z Permské pánve v západním Texasu a východním Novém Mexiku do pánví mnohem blíže k hlavním zdrojům uměle vytvořeného CO₂. Nová generace CO₂-EOR má potenciál vytěžit více než 60 miliard barelů ropy s využitím nových technik, včetně vstřikování mnohem větších objemů CO₂. Procesy, včetně potrubních transportů CO₂ jsou v USA poměrně intenzivně využívány ⁵⁹:



Location of Current CO₂-EOR Projects and Pipeline Infrastructure

V ČR je v oblasti ukládání do geologických formací expertním subjektem ČGS, která na tuto problematiku provozuje informační portál ⁶⁰ již od roku 2006. Expertní osobou je [RNDr. Vít Hladík, MBA](#) z brněnské pobočky ČGS.

⁵⁷ https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/CO2_EOR_Primer.pdf

⁵⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Enhanced_oil_recovery

⁵⁹ https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/CO2_EOR_Primer.pdf

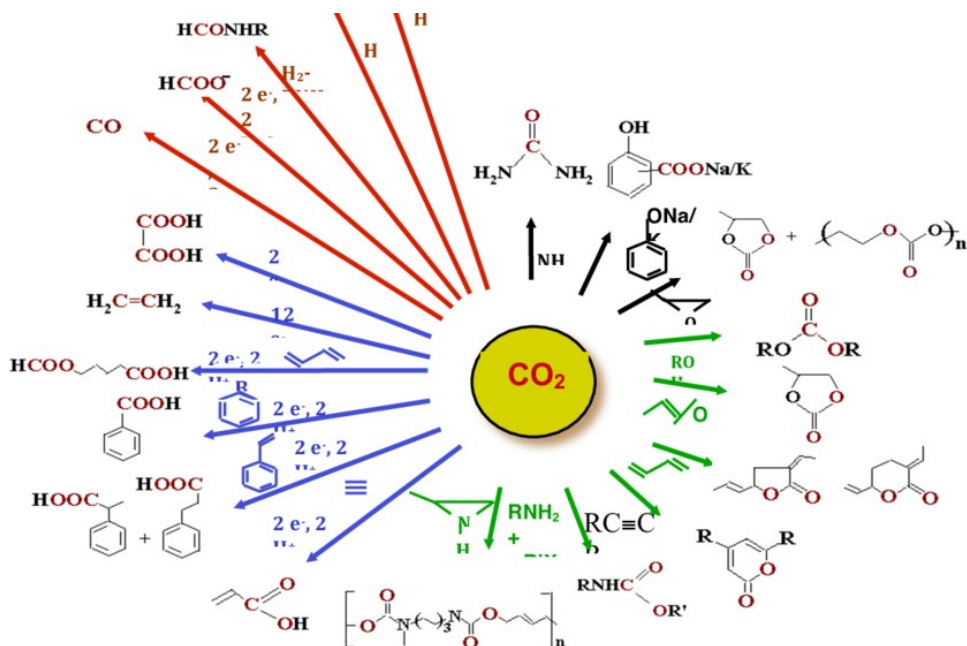
⁶⁰ <http://www.geology.cz/ccs/>

2.4.4.2. Přímé využití CO₂ v potravinářství

CO₂ má široké využití v celém potravinářském průmyslu. Kromě šumivých nápojů se CO₂ používá také při sušení, které prodlužuje trvanlivost ovoce a zeleniny, jako suchý led pro chlazení zboží při přepravě, při omračování zvířat před porážkou a v mnoha dalších případech. Čisté CO₂ v potravinářské kvalitě vzniká jako vedlejší produkt fermentace – tedy při výrobě alkoholů. V minulosti bylo běžné, že na výrobu alkoholů přímo navazovala výroba sycených nápojů. Je zřejmé, že kvantitativní produkce antropogenního CO₂ se produkuje v energetickém průmyslu a CO₂ z fermentačních procesů hraje marginální roli. Na druhou stranu je toto čisté (nekontaminované) CO₂ velmi vhodné na pilotní a demonstrační projekty CCSU, kde právě čistota plynu hraje stěžejní roli.

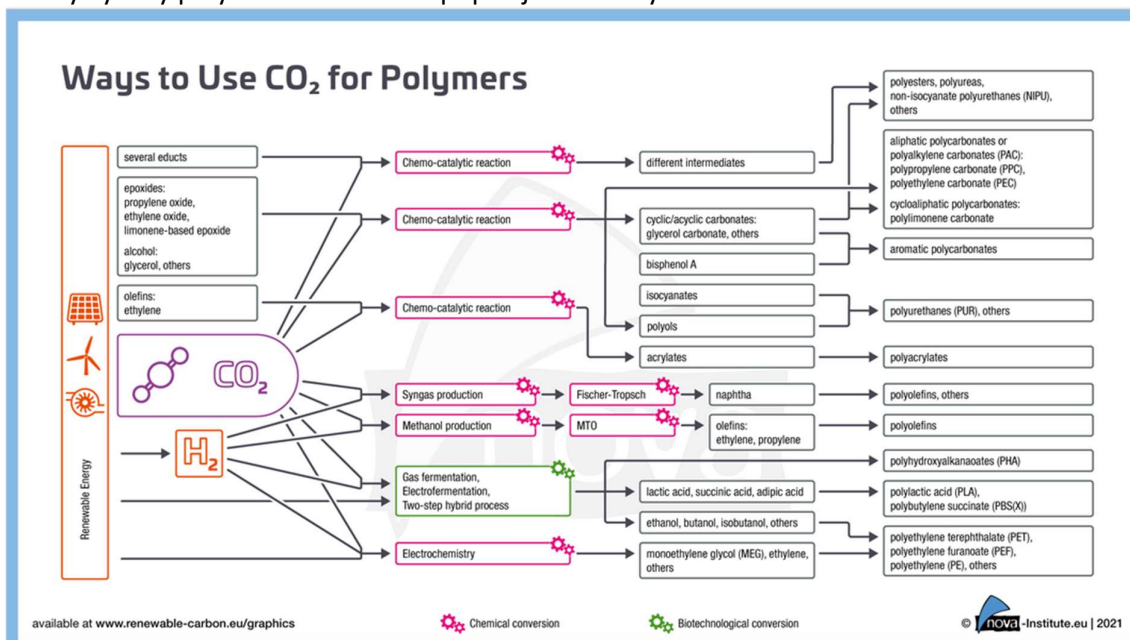
2.4.4.3. Využití CO₂ chemickém průmyslu

Komplexní možnosti využití jsou popsány v kapitole 2.2. Chemické využití determinuje fakt, že uhlík je chemický prvek, který tvoří základní stavební kámen všech organických sloučenin (cca 10 milionů sloučenin) a tím i všech živých organismů na této planetě. Mnoho výrobků chemického průmyslu na bázi uhlíku jsou součástí každodenního život ať jde o plasty, umělá vlákna, nátěrové hmoty, maziva, léčiva....a mnoho dalších



Využití CO₂ při syntéze chemických látek. Černé šipky označují procesy v provozu, zelené šipky označují procesy ve vývoji (laboratorní nebo průmyslové pilotní měřítka).

Jednou z nejvýznamějších možností a perspektiv je uplatnění při výrobě plastů, při odklonu od výroby plastů z ropy, kterých se dnes vyrábí cca 400 milionů tun ročně. Možné a zkoumané směry výroby polymerů z CO₂ a H₂ popisuje německý NOVA institut: ⁶¹



Červeně jsou označeny chemické transformační cesty, zeleně biochemická konverze.

Polykarbonáty na bázi CO₂ jsou již komerčně dostupné. Nejdostupnější jsou aromatické polykarbonáty, ale několik hráčů po celém světě nabízí také alifatické polykarbonáty, jako je polypropylenkarbonát (PPC) nebo polyethylenkarbonát (PEC) se širokou škálou aplikací. Množství obsaženého CO₂ může u těchto typů alifatických polymerů dosáhnout až 50 % hmotnosti. Kromě toho se některé společnosti zaměřují na polykarbonátové polyoly jako jednu ze složek polyuretanů, které lze použít v matracích, pěnách do interiérů automobilů nebo textiliích (např. COVESTRO ⁶²).

Elektrosyntéza chemických látek, jako je ethylen nebo monoethylen glykol, se těší zvláštnímu zájmu kvůli potenciálu výroby polyethylenu (PE) nebo polyethylentereftalátu (PET), dvou hlavních konvenčních plastů používaných ve velkých objemech. Chemikálie, jako je methanol, kyselina mravenčí a další chemické stavební kameny, mají rovněž významný aplikační potenciál.

Využití různých mikroorganismů nebo sinic a zdokonalení mikrobiálního inženýrství, biotechnologická přeměna CO₂ na polymery zaznamenala v posledních letech obrovský rozvoj. Několik společností a startupů se zaměřuje pouze na syntézu PHA z patentovaných postupů a mikroorganismů, například Newlight Technologies. Jiní klíčoví hráči mají širší

⁶¹ <https://polymer-additives.specialchem.com/news/industry-news/co2-utilization-as-an-alternative-renewable-chemical-feedstock-for-virgin-polymers-000223807>

⁶² <https://www.covestro.com/en/sustainability/flagship-solutions/co2-as-a-raw-material>

portfolio a mohou nabízet chemické látky, jako je butanol, etanol, kyselina mléčná a další stavební prvky.

Nejpokročilejší technologii v této oblasti má společnost **LanzaTech**, která má v současné době komerční zařízení na výrobu etanolu na bázi CO₂, který se používá pro výrobu pohonných hmot a syntézu etylenu. Některé společnosti a výzkumná konsorcia pracují na kombinaci elektrosyntézy a biotechnologie, a to buď ve dvou krocích, nebo pracují na elektrofermentaci.

V posledních letech došlo k mnoha zlepšením v oblasti **elektrolýzy a elektrokatalyzátorů** pro přeměnu CO₂ na chemické látky a chemické stavební kameny, což vedlo k rostoucímu zájmu klíčových hráčů a vzniku několika start-upů v této oblasti.

Nízkoteplotní elektrolýza CO₂ a H₂O (<100°C)

Nízkoteplotní elektrolýza CO₂ představuje proces umožňující výrobu obnovitelných chemických látek a paliv, zejména oxidu uhelnatého, kyseliny mravenčí, etylenu a etanolu a to bez nutnosti dodávek externího vodíku.

Analýzy ukazují, že výrobní náklady oxidu uhelnatého a kyseliny mravenčí (C₁ produkty) se blíží 0,44-0,59 USD/kg, což jsou již ceny konkurenceschopné ke konvenčním procesům.⁶³

Výroba etylenu a etanolu (C₂ produkty) má ale podstatně vyšší náklady cca 2,50 USD/kg.

Výhodou transferu nízkoteplotní elektrolýzou je tedy především

- **CO₂ na CO** – výroba „zeleného“ syngasu, či kyseliny octové CH₃COOH
- **CO₂ na HCCOH** – ukládání (skladování) vodíku do bezpečné kapaliny

Redukční reakce CO₂ jsou tradičně studovány v kapalně fáze. Poslední dobou se zájem přesouvá do plynné fáze, protože zde nejsou omezení rozpustnost CO₂ ve vodných roztocích a tím se umožňují vyšší proudové hustoty nad 100 mA/cm² a zároveň vykazuje výrazně nižší ohmickou rezistenci.

Používají se plynové difúzní elektrody (GDE) - napájeny plyným CO₂ na katodě.

Využívá se buď cirkulace kapalného elektrolytu, nebo iontoměničová membrána.⁶⁴

Vysokoteplotní Co-elektrolýza CO₂ a H₂O (vysokoteplotní - SOEC)

Elektro chemická redukce CO₂ bez nutnosti externě dodávaného vodíku se intenzivně zkoumá jako potenciálně výhodnější aplikační forma transformace. Tato cesta uhlovodíků eliminuje problematiku, kterou sebou nese potřeba externího vodíku tedy přímá výroba, skladování, transporty samotného vodíku. CO₂ tak lze znovu použít jako vstupní surovinu pro výrobu uhlíkově neutrálních chemikálií a syntetických paliv ("e-Fuel"). Vstupní suroviny jsou elektrická energie (power) a pára (H₂O) a jedná se o vysokoteplotní elektrolýzu, která produkuje čistý syngas (CO+H₂). Proces CCSU patří do kategorie POWER to SYNGAS.⁶⁵

⁶³ <https://www.nature.com/articles/s41893-021-00739-x>

⁶⁴ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121010765>

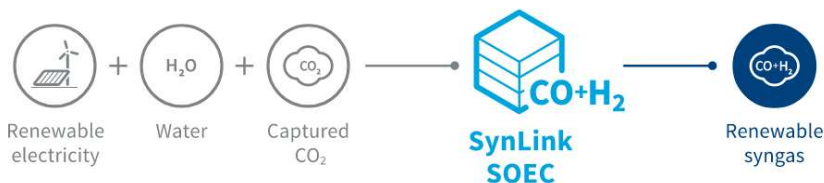
⁶⁵ <https://www.sunfire.de/en/news/detail/breakthrough-for-power-to-x-sunfire-puts-first-co-electrolysis-into-operation-and-starts-scaling>

Co-elektrolýza CO_2 a H_2O za použití vysokoteplotních elektrolýzních článků pevných oxidů (SOEC) je předmětem intenzivního výzkumu díky vysoké konverzi a energetické účinnosti transferu.⁶⁶

V této oblasti je velmi zajímavá technologie německé firmy SUNFIRE. Jejich Sunfire-SynLink SOEC je optimálním řešením pro výrobu obnovitelného syntetického plynu v průmyslovém prostředí. Elektrolyzátor pracující při teplotě $850\text{ }^\circ\text{C}$ současně zpracovává vodní páru a CO_2 na syngas v jediném kroku.

Elektrolyzátor je modulární konstrukce, kdy jeden samostatný systém produkuje $750\text{ Nm}^3/\text{h}$ syngasu se spotřebou energie $3,85\text{ kWh}/\text{Nm}^3$ a flexibilním poměrem syntetického plynu. Moduly lze kombinovat dle objemu vstupního CO_2 . Účinnost transferu CO_2 v průmyslovém měřítku je cca 80%. Na vstupu je přítom pouze CO_2 a vodní pára a „zelená“ elektřina.

Německý výzkum v KIT (Karlsruhe) má testovací jednotku ($4\text{ Nm}^3/\text{hod}$ Syngasu) kde demonstruje celý „zelený“ řetězec CCSU od záchytu po FT syntézu, hydrocrack v kontejnerovém provedení. První masivní komerční využití se plánuje v Norsku⁶⁷. CO-elektrolýza – tedy produkce SYNGASU v jednom procesním kroku výrazně zlepšuje účinnost procesu a snižuje investice (CAPEX), provozní náklady (OPEX) a snižuje nároky na potřebný prostor. Studie se zaměřuje na parametrizaci SynLink SOEC. Samotná „zelená“ elektrická energie a proces záchytu CO_2 je zde problematika okrajová.



2.5 Přímá konverze CO_2 bez dodávky externího vodíku

Výroba paliv nebo chemických látek přímo z CO_2 je atraktivní téma pro celý vědecký svět, jelikož cílem je řešení kombinace problémů **životního prostředí a energetiky**. CO_2 je přitom jednou z nejstabilnějších molekul, ve které je uhlík v nejvyšším valenčním stavu. Jeho elektrofilní reakce je obtížná kvůli jeho nízké elektronové afinitě. Proto je transformace CO_2 závislá na nukleofilním útoku na atom uhlíku. Jak je známo, disociační energie pro přerušení vazby $\text{C}=\text{O}$ v molekulách CO_2 je vyšší než 750 kJ mol^{-1} . Z pohledu termodynamiky se jedná o vzestupnou reakci.

⁶⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2095495617304941>

⁶⁷ <https://nordicelectrofuel.no/investors/>

Doposud byly k redukci CO₂ použity různé strategie ⁶⁸:

- A.) Termokatalýza – základní dodaná energie pro reakci - teplo
- B.) Fotokatalýza - základní dodaná energie pro reakci - světlo
- C.) Elektrochemická reakce (PEC) - základní dodaná energie pro reakci – elektřina
- D.) Fotoelektrocatalytická reakce – dodaná energie světlo a elektrická energie

Je známo, že každá molekula CO₂ potřebuje k dokončení transferu na uhlovodíkové sloučeniny osm elektronů. To vede ke vzniku různých produktů během redukčního procesu, což má za následek komplikované postupy čištění a nízký výtěžek požadovaných produktů. Přirozená fotosyntéza byla inspirací aby do výše uvedených redukčních technologií byli začleněny i vysoce účinné a specifické enzymatické reakce, které zlepšují účinnost a specifičnost konverze CO₂:

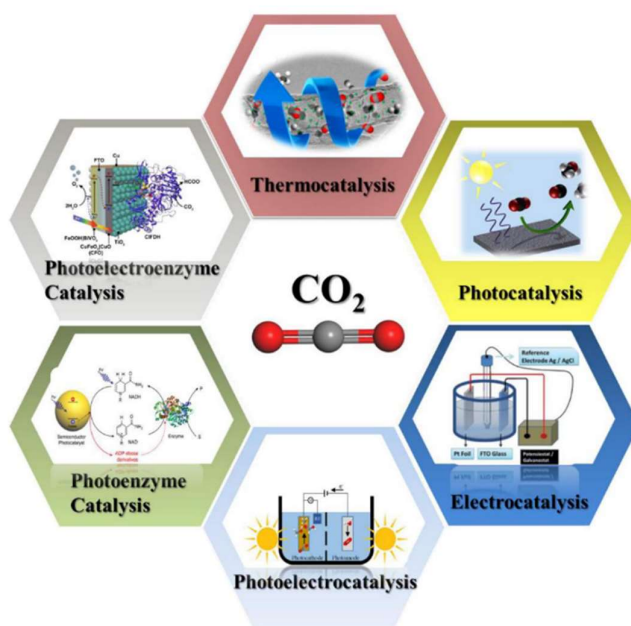
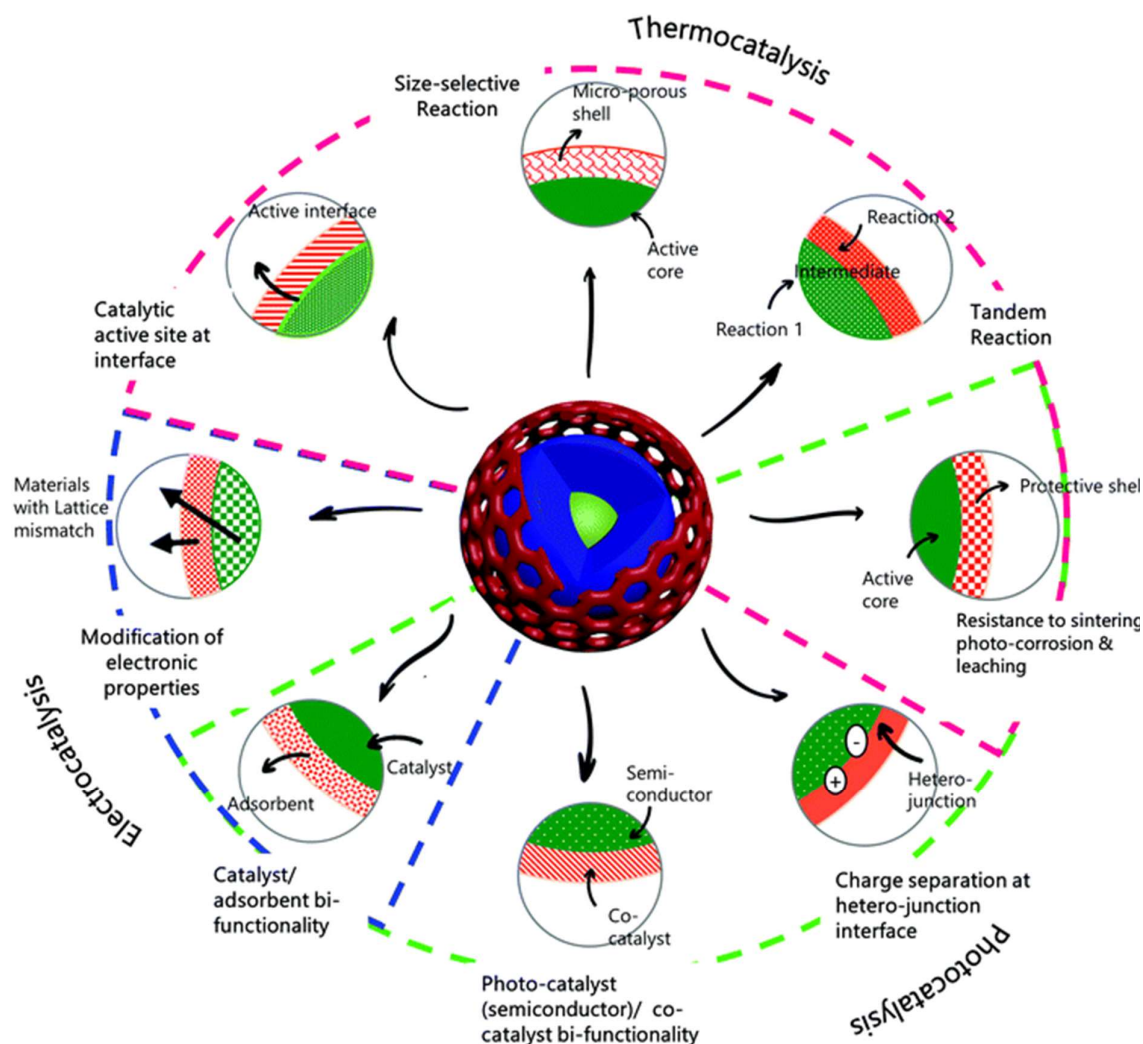


Schéma znázorňující strategie, které se obvykle používají při konverzi CO₂.

Stejně jako u většiny technologií chemické konverze je klíčem k úspěchu katalyzátor – který musí mít vhodnou aktivitu, selektivitu a stabilitu a nesmí být příliš drahý. Vývoj a ladění katalytických materiálů se tak staly středobodem výzkumu technologií konverze CO₂, přičemž v posledních letech došlo k výraznému pokroku. Přesto přetrvávají významné výzvy.

⁶⁸ https://mdpi-res.com/d_attachment/molecules/molecules-25-03653/article_deploy/molecules-25-03653.pdf?version=1597140299

Až nedávné významné pokroky v nanotechnologiích a metodách syntézy materiálů nyní umožňují syntetizovat nanomateriály s dobře definovanými velikostmi, tvary, krystalovými fazetami a morfologiemi, což vše nabízí aplikaci katalyzátorů pro efektivní transfery a konkrétní konverze. Zvláště pozoruhodné jsou materiály **jádro-plášť** – ty umožňují řízenou integraci komplementárních složek různých materiálů (obvykle kovů, oxidů kovů, sulfidů kovů nebo materiálů na bázi uhlíku) v jedinečných morfologiích – vykazovat synergické efekty, které kombinují více funkcí v jedné struktuře.⁶⁹



Vlastnosti a výhody struktur jádro-plášť v katalýze. Vlastnosti označené purpurovou, zelenou a modrou čarou jsou relevantní pro termokatalýzu, fotokatalýzu a elektrokatalýzu.

⁶⁹ <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/cs/c9cs00713j>

A.) TERMOKATYLÝZA

Většina tepelných katalytických přeměn CO₂ zahrnuje hydrogenaci při relativně nízkých teplotách (≤ 523 K) za vzniku užitečných paliv, jako je **CO, metan, metanol, DME, olefiny, vyšší alkoholy, kyselina mravenčí**. Vzhledem k tomu, že molekuly CO₂ jsou termodynamicky a chemicky stabilní, je při použití CO₂ jako jediného reaktantu zapotřebí velké množství energie. Zavedení dalších látek s vyšší Gibbsovou volnou energií (např. H₂) jako koreaktantu termodynamický proces usnadní. V posledních několika desetiletích byla termické katalýze CO₂ věnována velká pozornost a bylo dosaženo významného pokroku.

Byly také navrženy, připraveny a postupně vyvinuty různé katalyzátory, včetně **kovů (Cu, Co atd.) a oxidů kovů (ZnO₂, InO₂ atd.)**, jakož i nové katalyzátory o velikosti **nanoorganických kovových rámců (MOF)**.

Jako nosiče pro katalyzátory hydrogenace CO₂ se používají také různé uhlíkové materiály, včetně uhlíkových nanovláken, uhlíkových nanotrubiček, biocharu a uhlíkové plsti, s využitím jejich vysoké kapacity pro ukládání vodíku, vysoké tepelné vodivosti a vysokého specifického povrchu uhlíkových nosičů.

Vzhledem k vyšším nákladům, než jsou náklady na fosilní paliva se přímá hydrogenační reakce CO₂ k výrobě metanu nebo metanolu používaladnes jen zřídka. Nicméně výzkum katalyzátorů jádro-plášť intenzivně probíhá.

Např. Cu/ZnO/Al₂O₃ je běžně používaný katalyzátor pro transformaci CO₂ do metanolu při vysokých tlacích (5–10 MPa) a zvýšených teplotách (200–300 °C). Ani Cu ani ZnO nejsou samy o sobě aktivní pro tvorbu metanolu, ale kompozity Cu/ZnO aktivní jsou. Ačkoli problémy struktury katalyzátoru v atomovém měřítku nejsou zcela vyřešeny, nedávné výzkumy objasnily význam rozhraní Cu/ZnO při tvorbě methanolu na těchto katalyzátorech.

Zkoumané katalyzátory CO₂ na MeOH uváděné v literatuře ⁷⁰ v odkazu popsány i další způsoby termokatalytických transformací.

Thermocatalytic CO₂ hydrogenation

a. CO₂ to methanol

No.	Catalyst	Synthesis method	Target product	Reaction conditions
1.	Cu@ZnO _x /ZnO	Impregnation	CH ₃ OH	250 °C, 3 MPa, H ₂ : CO ₂
2.	Cu/ZnO/Al ₂ O ₃ with ZnO overlayer on Cu	Co-precipitation	CH ₃ OH	230 °C, 3 MPa, H ₂ : CO ₂
3.	Cu/ZnO _x @UiO-bpy MOF	Double solvent method	CH ₃ OH	250 °C, 3 MPa, H ₂ : CO ₂
4.	Pd@Zn/CdSe	Via <i>in situ</i> growth on CdSe	CH ₃ OH	210–270 °C, 2 MPa, H ₂
5.	Ag@Pd/ZnO	Sequential reduction of Ag and Pd	CH ₃ OH	230 °C, 4 MPa, H ₂ : CO ₂
6.	Pd/ZnO@ZIF-8	Hydrothermal method	CH ₃ OH	290 °C, 4.5 MPa, H ₂ : C
7.	Cu/ZnO@m-SiO ₂	Solvothermal synthesis followed by Stöber method	CH ₃ OH	260 °C, 5 MPa, H ₂ : CO ₂
8.	CuIn@SiO ₂	Hydrothermal synthesis followed by Stöber method	CH ₃ OH	280 °C, 3 MPa, H ₂ : CO ₂

⁷⁰ <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/cs/c9cs00713j>

B.) FOTOKATALÝZA

Solární energie je ideálním zdrojem energie – nevyčerpatelný, levný, čistý a udržitelný zdroj energie. Použití fotokatalyzátorů na výrobu chemických látek z CO₂ je velmi atraktivní. Podobně jako při přirozené fotosyntéze vznikají při vystavení fotokatalyzátorů slunečnímu světlu páry elektron-díra. Fotogenerované elektrony vyvolávají redoxní reakci CO₂, která vede k tvorbě uhlovodíků. Snaha je optimalizace struktury a složení fotokatalyzátorů, jejich integrace s jinými funkčními jednotkami za účelem vytvoření multifunkčních katalyzátorů (co-catalyst bi-funcionality). Bylo například prokázáno, že integrace fotokatalyzátorů s kovově-organickými strukturami (MOF) nabízí více adsorpčních míst pro absorpci CO₂ díky jejich extrémně většímu povrchu a mikroporézní struktuře, což vede k pozoruhodnému zlepšení konverze CO₂.

Konstrukce vícenásobných hetero spojů (hetero-junctions) náhodně rozmístěných na povrchu fotokatalyzátorů, zlepšují mezifázovou separaci a migraci elektronů a děr, i když separace a účinnost je třeba ještě zvýšit na vyšší úroveň.⁷¹

Dvourozměrné (2D) nanovrstvy jádro-plášť jsou obzvláště slibné při zlepšování separace nábojů, protože fotogenerované elektrony a díry se budou pohybovat k rozhraní na kratší vzdálenosti.⁷²

C.) ELEKTROKATALÝZA

Elektrokatalytický transfer CO₂ na cenné chemické látky je atraktivní možností pro snižování atmosférického CO₂ a ukládání energie. Použití vnějšího elektrického pole a vody jako donoru protonů se používají různé katalyzátory, které katalyzují redukci elektrického pole CO₂.

Ve srovnání s termokatalýzou je elektrokatalytická konverze nákladově efektivnější, protože jako donor protonu se používá voda nahrazující H₂. Elektrokatalytická redukce CO₂ tak přitahuje velkou pozornost díky svým levným provozním podmínkám (normální teplota a tlak), kontrolovatelným podmínkám reakčního procesu a rychlosti reakce, recyklovatelnému katalyzátoru a elektrolytu, vysoké koncentraci katalyzátoru a elektrolytu využití energie, jednoduchému vybavení a dosažitelným výsledkům.

V posledních několika letech výzkumníci zkoumali elektrokatalytickou redukci CO₂ s použitím různých elektrodových materiálů, jako jsou kovy, oxidy přechodných kovů, chalkogenidy přechodných kovů, kovy-2D materiály bez obsahu kovů, kovově-organické rámce (MOF) a různé redukční produkty.⁷³

D.) FOTOELEKTROKATALÝZA

Protože v přírodě je nevyčerpatelná zásoba sluneční energie, měla by být plně využívána různými způsoby. Fotoelektrokatalýza, která kombinuje výhody fotokatalýzy a elektrokatalýzy, je považována za ideální strategii pro selektivní transfer CO₂ na plynné látky (např. CO, metan atd.) a kapalné produkty (např. kyselina mravenčí, metanol, etanol atd.) za působení slunečního záření.

Fotoelektrokatalýza neefektivněji využívá sluneční energii k produkci fotoelektronů.

⁷¹ https://mdpi-res.com/d_attachment/molecules/molecules-25-03653/article_deploy/molecules-25-03653.pdf?version=1597140299

⁷² https://mdpi-res.com/d_attachment/molecules/molecules-25-03653/article_deploy/molecules-25-03653.pdf?version=1597140299

⁷³ https://mdpi-res.com/d_attachment/molecules/molecules-25-03653/article_deploy/molecules-25-03653.pdf?version=1597140299

Fotogenerované elektrony jsou přenášeny na povrch elektrody působením záření elektrického pole a nakonec získávají CO₂ pro katalytickou redukci. Elektrické pole může účinně usnadnit oddělení náboje ve fotokatalytickém procesu - podporovat migraci elektronů, a výrazně zlepšují vnitřní aktivitu a energetickou účinnost molekul CO₂.

Využití sluneční energie ve fotoelektrokatalýze může eliminovat vysoké energetické nároky při elektrokatalýze CO₂.

Porovnání výkonu různých fotoelektrochemických systémů redukce CO₂:

Photocathode ^a	Condition ^b	Efficiency ^c
p ⁺ -n-n ⁺ -Si/TiO ₂ + Cu/Ag	100 mW cm ⁻² , 0.1 M CsHCO ₃	C ₂ H ₄ , 10–25%, –8 mA cm ⁻² at –0.4 V vs. reversible hydrogen electrode (RHE) for 20 days
p-Si NWs + Sn	100 mW cm ⁻² , 0.1 M KHCO ₃	HCOOH, 88%, 18.9 μmol h ⁻¹ cm ⁻² , –0.875 V vs. RHE for 3 h
CuO + Cu ₂ O	70 mW cm ⁻² , 0.1 M NaHCO ₃	CH ₃ OH, 95%, 85 mM at –0.2 V vs. standard hydrogen electrode (SHE) after 1.5 h
Si/GaN-NPhN ₄ -Ru(CP) ₂ ²⁺ RuCt	100 mW cm ⁻² , 0.05 M NaHCO ₃	HCOOH, 35–64%, –1.1 mA cm ⁻² at –0.25 V vs. RHE for 20 h
p-n ⁺ -Si + SnO ₂ NW	100 mW cm ⁻² , 0.1 M KHCO ₃	HCOOH, 59.2%, –18 mA cm ⁻² at –0.4 V vs. RHE for 3 h
Co ₃ O ₄ /CA + Ru(bpy) ₂ dppz	9 mW cm ⁻² , 0.1 M NaHCO ₃	HCOOH, 86%, 110 μmol h ⁻¹ cm ⁻² at –0.60 V vs. normal hydrogen electrode (NHE) for 8 h
FTO/TiO ₂ /Cu ₂ O + Ru-BNAH	100 mW cm ⁻² , 0.1 M KCl	HCOOH, NA, 409.5 μmol at –0.9 V vs. NHE after 8 h
p-Si + Bi	50 mW cm ⁻² , 0.5 M KHCO ₃	HCOOH, 70–95%, ~–4 mA cm ⁻² at –0.32 V vs. RHE for 7 h
Fe ₂ O ₃ NTs + Cu ₂ O	100 mW cm ⁻² , 0.1 M KHCO ₃	CH ₃ OH, 93%, 6 h, 4.94 mmol L ⁻¹ cm ⁻² at –1.3V vs. SCE for 6 h
FTO/CuFeO ₂ + CuO	100 mW cm ⁻² , 0.1 M NaHCO ₃	CH ₃ COOH, 80%, 142 μM at –0.4 V vs. Ag/AgCl after 2 h

a Konfigurace je popsána jako "polovodbič + co-katalyzátor".

b Reakční podmínky pro fotoelektrochemickou reakci (PEC) zahrnují intenzitu světla solárního simulátoru a elektrolytu.

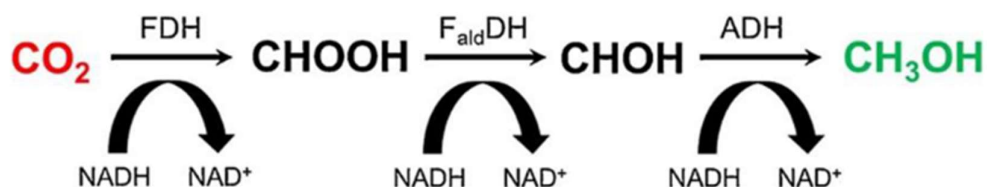
c Účinnost PEC - parametry zahrnují produkt, faradickou účinnost/hustotu fotoproudu/výkon nebo výtěžnost/stabilitu při teplotě a určitém pracovním potenciálu.

Všeobecně platí, že TiO₂ je jedním z nejpoužívanějších polovodičů ve fotoasistovaných procesech.

ENZYMY

Hlavním problémem spojeným s většinou katalytických systémů je nízká selektivita produktu, kde je obvykle pozorován více než jeden produkt, včetně CO, formiátu, methanu, ethylenu a dalších složek v jedné katalytické reakci. Naproti tomu redukce CO₂ prostřednictvím **biokatalytických procesů** získala zvláštní pozornost kvůli jejich speciální selektivě substrátu a produktu a také vysoké účinnosti konverze.

Enzymy jsou biokatalyzátory známé pro svou vysokou účinnost a selektivitu. V živých buňkách různé enzymy často spolupracují nebo ve specifickém pořadí katalyzují víceúhňové biochemické reakce, které hrají zásadní roli při syntéze přírodních produktů a metabolismu. Inspirované biokatalytickou reakcí byly in vitro zkoumány enzymy včetně enzymových kaskád, aby se finalizoval transfer CO₂ na určité chemikálie prostřednictvím jednostupňového nebo víceúhňového procesu.



Biokatalytická transformační dráha CO₂ na CH₃OH - postupná reverzní enzymatická katalýza⁷⁴

Kombinace katalytických a enzymatických procesů vyžaduje teamovou kooperaci v podstatě 2 separátních odvětví. Podrobněji je tato problematika analyzována ⁷⁵

⁷⁴ https://mdpi-res.com/d_attachment/molecules/molecules-25-03653/article_deploy/molecules-25-03653.pdf?version=1597140299

⁷⁵ https://mdpi-res.com/d_attachment/molecules/molecules-25-03653/article_deploy/molecules-25-03653.pdf?version=1597140299

3. Pilíř – POWER to X

Power-to-X označuje různé technologie pro uložení, nebo jiné využití přebytečné elektřiny v době (budoucího) přebytku volatlních OZE jako solární, větrná nebo vodní energie. Běžné je také označení **P2X** a **P2Y**, přičemž P označuje dočasné přebytky nad poptávkou a X nebo Y formu energie nebo účel, na který se elektrická energie přeměňuje. Analogicky se používá také zkratka **PtX**. Technologie Power-to-X lze klasifikovat jak podle forem vyrobené energie, tak podle zamýšleného použití:

Podle účelu transferu v rámci energetiky:

E.) Power to Gas (PtG) ⁷⁶

F.) Power to heat (PtH) ⁷⁸

G.) Power to Liquid (PtL) ⁸⁰

H.) Power to Power (PtP) ⁸²

Podle účelu pro jiné využití:

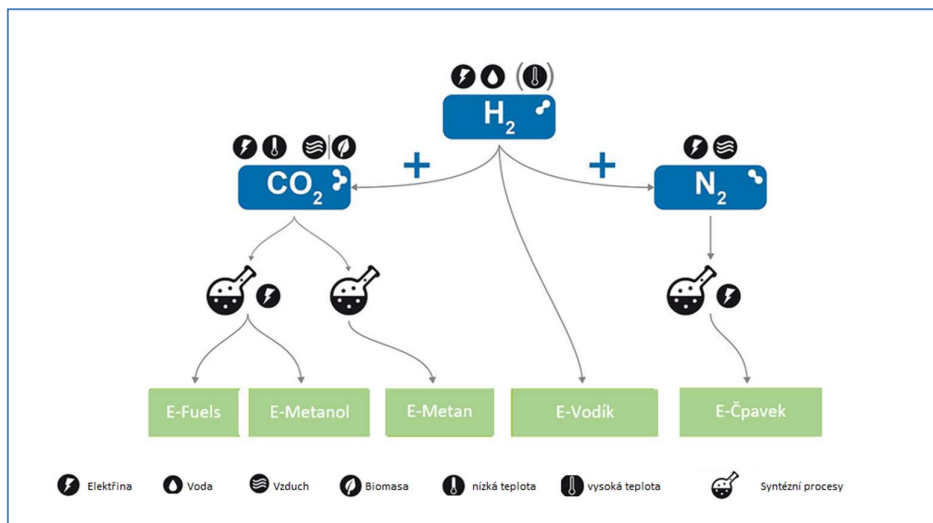
- Power to Čpavek (Amoniak) ⁷⁷

- Power to Chemicals ⁷⁹

- Power to Syngas ⁸¹

- Power to Food ⁸³

Toto základní členění může být i širší – detailnější, nicméně nejžádanější transfery jsou: e-paliva, e-metanol, e-metan, e-vodík, e-amoniak:



⁷⁶ <https://en.wikipedia.org/wiki/Power-to-gas>

⁷⁷ <https://www.science.org/content/article/ammonia-renewable-fuel-made-sun-air-and-water-could-power-globe-without-carbon>

⁷⁸ <https://en.wikipedia.org/wiki/Power-to-heat>

⁷⁹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Power-to-Chemicals>

⁸⁰ https://de.wikipedia.org/wiki/Power_to_Liquid

⁸¹ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/anie.201607552>

⁸² <https://nelhydrogen.com/glossary/power-to-power/>

⁸³ <https://www.chalmers.se/en/projects/Pages/Power-to-Food--concept-for-production-of-food-with-reduces.aspx>

3.1. POWER to FUELS

E-Fuel (*ectrofuel*), elektrická paliva, se vyrábí z vody a CO₂ pomocí elektřiny. Spalování e-paliv v podstatě produkuje stejné množství výfukových plynů škodlivých pro životní prostředí jako normální paliva. Pokud je však elektřina pro výrobu e-paliv napájena výhradně z OZE a produkované CO₂ je odebrané z atmosféry, nebo z biomasy či z průmyslových výfukových plynů, lze pak e-paliva provozovat klimaticky neutrálně. Vzhledem k tomu, že výroba a používání e-paliv musí projít několika fázemi přeměny náročných na ztráty, je energetická bilance při použití e-paliv horší než u jiných typů pohonu.

E-paliva jsou uhlovodíky, které jsou syntetizovány uměle z H₂ a CO₂, přičemž H₂ pochází z elektrolýzy vody (proces Power to Hydrogen) a CO₂ z procesu CCS. E-paliva tedy nejsou primárními zdroji energie ale jsou zdroji sekundárními. Proces umožňuje pomocí OZE elektřiny vyrábět paliva s vysokou energetickou hustotou, které mají výhodné skladovací a transportní schopností a jsou vhodná i pro spalovací procesy. Svoji univerzálností jsou teoreticky vhodná na multiplikační použití. Zároveň nabízejí alternativu k efektivní manipulaci vodíkem, která je poměrně komplikovaná resp. nebezpečná.

E-paliva představují formu nepřímé elektrifikace energetického systému a konkurují tak zejména přímé elektrifikaci koncových spotřebitelů, jako jsou elektromobily v dopravě nebo systémy vytápění tepelnými čerpadly v teplárenství. Výroba e-paliv je na rozdíl od přímé elektrifikace ztrátová, a energetická účinnost e-paliv je poměrně nízká. V závislosti na oblasti použití vyžaduje používání e-paliv dvakrát až čtrnáctkrát více elektřiny než přímá elektrifikace. Tyto ztráty jsou tak vysoké, že je nelze kompenzovat žádným zvýšením účinnosti, které by mohlo vyplynout z dovozu e-paliv ze zemí se zvláště dobrými podmínkami pro výrobu zelené elektřiny. Vysoké ztráty při přeměně energie jsou proto hlavní nevýhodou e-paliv. Auta se spalovacími motory poháněnými e-palivy vyžadují přibližně pětkrát více energie ve srovnání s elektromobily na baterie, které mohou elektřinu využívat přímo. Účinnost e-paliv se dosud pohybovala kolem 13 procent, což znamená, že 13 procent spotřebované elektrické energie lze nakonec využít ve vozidle, zatímco eauta mají účinnost 69 procent.⁸⁴

⁸⁴ https://web.archive.org/web/20210204225558/https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf

Od roku 2021 se celková elektrická účinnost pro výrobu e-metanolu z elektřiny, včetně následné přeměny energie na elektřinu pomocí palivového článku, pohybuje kolem 21-34 % pro e-metanol z přímo dostupného CO₂ a kolem 18-30 % pro e-methanol vyrobený z metanolu získaného DAC (direct air capture)^{85 86 87}. Při využití odpadního tepla ze syntézy metanolu a aplikace palivových článků lze ale dosáhnout celkové účinnosti 70-80 %^{88 89}.

E-paliva mohou účinně přispět k ochraně klimatu pouze tehdy, když byla výroba elektřiny pochází téměř výhradně z OZE. Doufat v masovou dostupnost e-paliv v budoucnu s sebou nese riziko, že výroba zaostane za očekáváním, což by zase v dlouhodobém horizontu upevnilo roli fosilních energií v energetickém systému. Navíc e-paliva představují možné odvedení pozornosti od naléhavě potřebné přeměny konečné spotřeby energie směrem k levnější a efektivnější elektrifikaci.

Společnost Shell neočekává výrobu významného množství PtX před rokem 2030 a v některých případech dokonce i později. Od roku 2022 však mnoho subjektů plánuje vyrábět e-paliva pro letectví. Výjimkou je závod Haru Oni v Chile, který vyrábí primárně metanol a vyrobí také kolem 55 000 litrů e-paliva pro automobily. Tato částka se má v budoucnu navýšit.

Za perspektivní se považují také **Polyoxymethyldimethylethery (OME)**⁹⁰. Jsou to oligomery obsahující kyslík a jsou vhodné v náhradě motorové nafty, což by mělo výrazný vliv na omezení produkce oxidu dusíku, který tíží emise spalování motorové nafty.

V námořní dopravě se v budoucnu počítá s využitím **e-metanolu a e-amoniaku**.

V protikladu k těmto skeptickým názorům na P2X jsou jiné významné organizace, které **považují PtX za hlavní součást budoucích energetických systémů**. To se týká zejména potenciálního poskytování systémových služeb, např. dlouhodobého chemického skladování elektřiny a výroby syntetických paliv na bázi elektřiny a vyrovnávání kolísavých dodávek energie z OZE. Alternativně není "plně elektrický" svět rozumným scénářem.⁹¹

⁸⁵ https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf

⁸⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920301847?via%3Dihub>

⁸⁷ <https://www.mdpi-com.translate.goog/1996-1073/13/3/596? x tr sl=de& x tr tl=cs& x tr hl=cs& x tr pto=sc>

⁸⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544210000976?via%3Dihub>

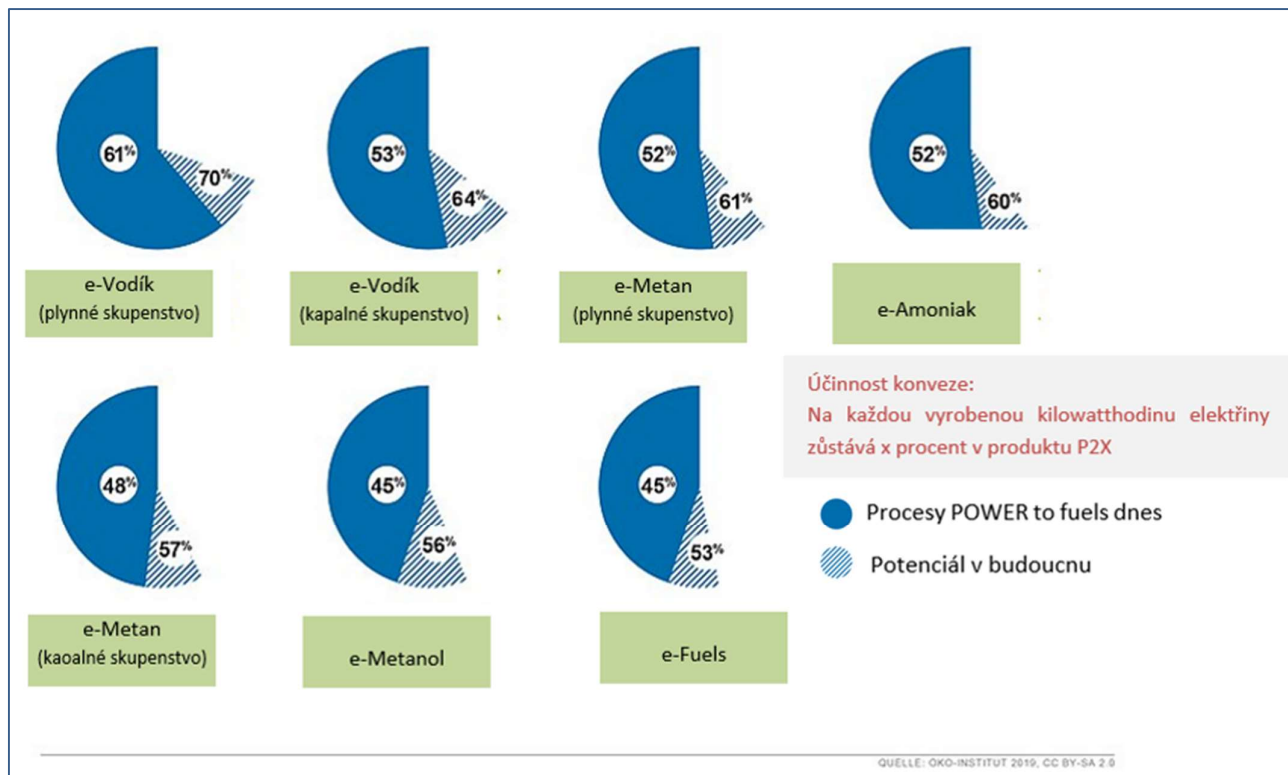
⁸⁹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319913017151?via%3Dihub>

⁹⁰ <https://www-cs-tum-de.translate.goog/die-kraftstoffe-der-zukunft-sind-da/? x tr sl=de& x tr tl=cs& x tr hl=cs& x tr pto=sc>

⁹¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214629618306030>

K těmto se řadí např. německý OKO Institute.

Účinnost procesu POWER TO FUELS dnes a výhledově dle německého OKO Institutu: ⁹²

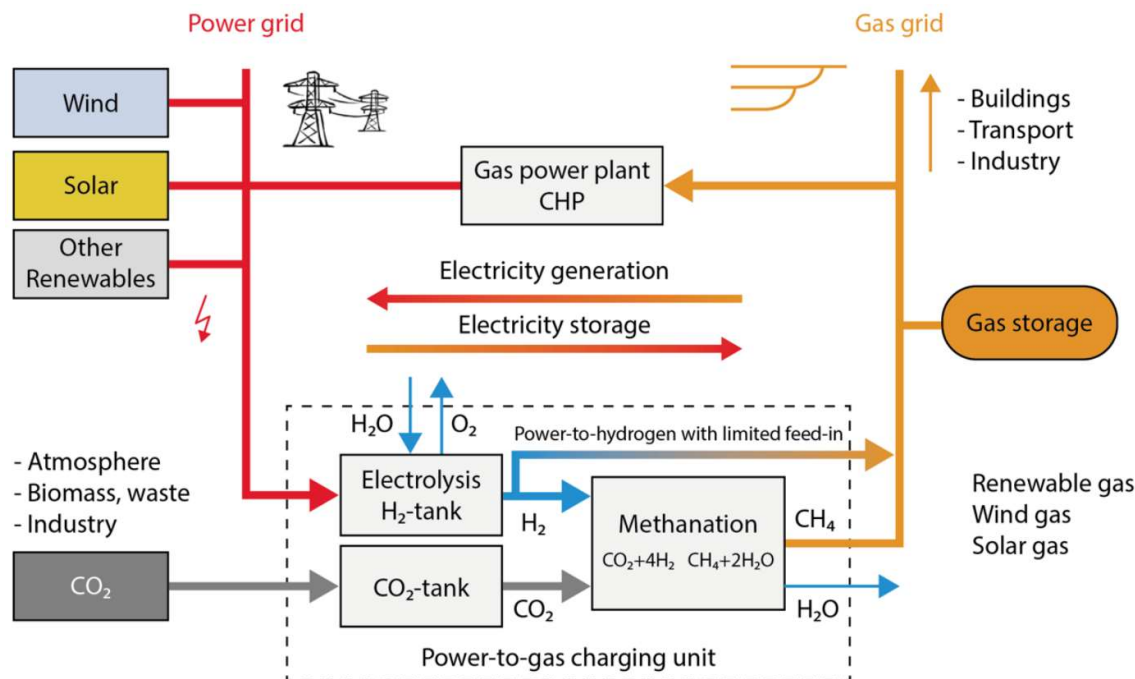


Energetická účinnost P2X. Ztráty při spotřebě v konečném užití – ve vozidle nejsou zohledněny.⁹³

3.2. POWER to X – ENERGY COUPLING - Součást budoucích energetických systémů

Základní concept, vznikl již v roce 2009. Jedná se tzv. Energetický coupling – propojení sítě elektrické energie a sítě zemního plynu, které umožňuje vyrábět z CO₂ a H₂ tzv. Sabatierovou **reakcí** čistý metan (tedy de facto zemní plyn):

⁹² https://upload.wikimedia.org.translate.goog/wikipedia/commons/0/03/Power-to-X._Wie_viel_vom_Strom_%C3%BCbrig_bleibt.jpg?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=cs&_x_tr_hl=cs&_x_tr_pto=sc



Základní koncept Power-to-Gas z roku 2008

P2G řeší problém který má samotný vodík (kuře/vejce) tím, že je flexibilně dostupná plynová infrastruktura, včetně dopravy, skladování a aplikací, pro vodík prostřednictvím metanizace CO₂ v procesech Power-to-Gas.

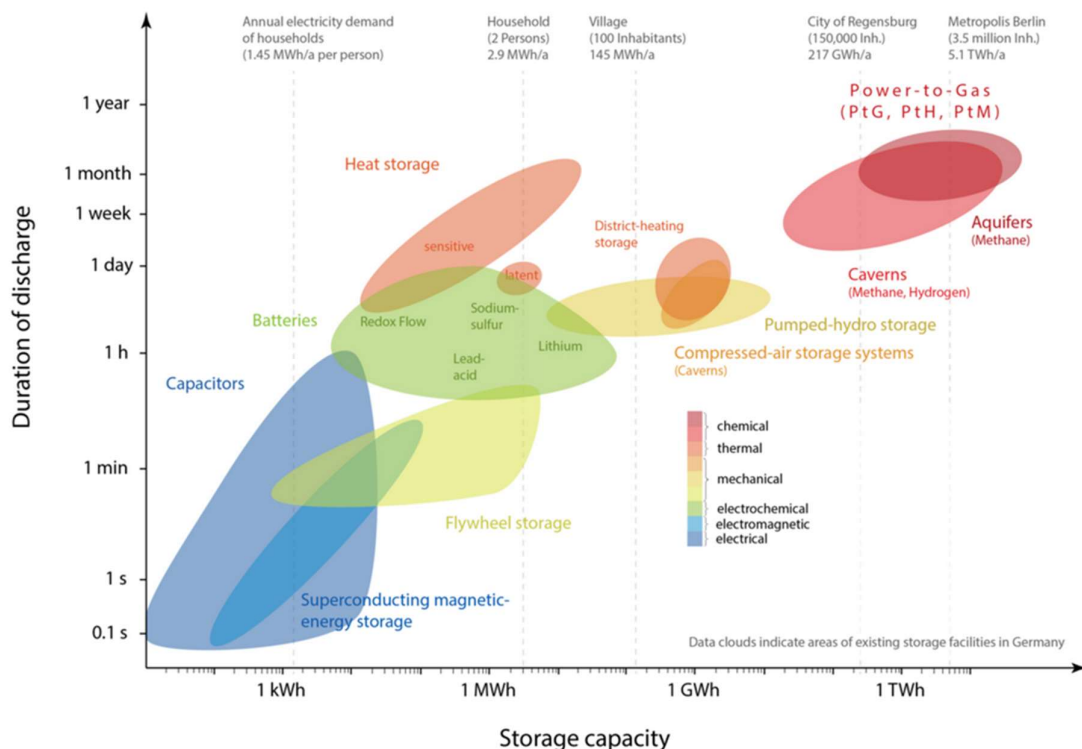
Samotný vodík má totiž pouze jednu třetinu energetické hustoty zemního plynu, vyžaduje vyšší kompresní tlaky pro přepravu a skladování v potrubí. Metan se snadněji stlačuje, skladuje a přepravuje. Kromě toho vtačování vodíku bylo a je omezeno na nízká, jednociferná procenta omezeními plynových turbín, plynových nádrží ve vozidlech, ukládáním pórů a omezeními materiálu. Metanizace CO₂ využívá celou plynovou infrastrukturu bez omezení (vysokotlak/nízkotlak) pro elektřinu z OZE.

Vývoj tohoto konceptu - „sector coupling“ nebo „sektorová integrace“, tak který odkazuje na skladování energie prostřednictvím propojení odvětví elektřiny a plynu. Výsledkem jsou následující příležitosti:

- Kolísající-volatilní energie OZE může být efektivně - sezónně skladována.
- Stávající plynárenská infrastruktura může uchovávat velké množství TWh obnovitelné energie a přepravovat ji v čase odděleném od elektrické sítě po celé Evropě. To je příležitost, kterou elektroenergetická infrastruktura v takovém rozsahu nemá.
- Přeměnou plynu zpět na elektřinu funguje Power-to-Gas jako zásobník elektřiny.
- CO₂ z bioplynových stanic nachází užitečné využití jako nosný materiál pro vodík.
- Procesní odpadní teplo ze všech jednotek lze využít interně nebo prostřednictvím tepelných sítí.
- Obnovitelný plyn lze vyrábět kdekoli a přepravovat, distribuovat, skladovat a používat bez politických nebo geografických omezení.

- Obnovitelný plyn lze použít pro zásobování teplem pro propojení sektoru elektřiny a tepla.
- Syntetické palivo lze použít v mobilitě k propojení odvětví elektřiny a dopravy.

Především první funkcionalita – efektivní skladování elektrické energie ve větších objemech a na delší období (letní slunce na zimní měsíce), patří mezi nejvýznamější benefity P2G (G=vodík/metan), byla v pilotních provozech úspěšně testována:



3.3. POWER to Gas a skladování energie

Prvním krokem výroba vodíku: $2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2 \text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \quad \Delta H_{\text{R}} = 286 \text{ kJ/mol}$

Samotný process metanizace probíháve dvou vratných reakcích:

1. WGS – reverzní reakce CO_2 na CO : $\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \quad \Delta H_{\text{R}} = 41 \text{ kJ/mol}$
2. Hydrogenace CO již raktivního CO : $3\text{H}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \quad \Delta H_{\text{R}} = -206 \text{ kJ/mol}$

Celkový process vyjadřuje rovnice: $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \quad \Delta H_{\text{R}} = -165 \text{ kJ/mol}$

Obráceně je vlastně jedná o Sabatierovou reakci - známá jako parní reformování, standardní proces získávání „šedého vodíku“ z fosilního plynu. Hydratace CO a CO_2 je silně exotermická

a objemově redukcující, takže princip Le Chatelier⁹⁴ upřednostňuje methanační reakce při nízkých teplotách a vysokých tlacích. Nezbytné je vhodné nakládání s teplem - tepelný management, který spolehlivě a efektivně zužitkuje uvolněnou energii a je proto nezbytný pro udržení methanační reakce v příznivém teplotním rozmezí a pro posunutí reakční rovnováhy směrem k metanu.

Odpadní teplo lze efektivně využít i v jiných částech procesu, např. pro odstraňování CO₂ z bioplynu nebo vzduchu.

Methanaci CO₂ lze z hlediska technologie procesu realizovat **chemicky i biologicky**:

- A. Biologická cesta využívá mnohem nižší teploty a tlaky, je robustnější a méně citlivá na plynné nečistoty reaktantů než chemická cesta, ale je proto vhodná především pro decentralizované procesy, zejména ve spojení s bioplynem.
- B. Chemická metanizace je již dlouho osvědčená, vyžaduje méně prostoru, má vyšší prostoročasové výtěžky a je také dostupná ve velkých MW měřících a nabízí vyšší úroveň teploty odpadního tepla.

Účinnost transferu P2G, založené na standardních průmyslových technologiích elektrolýzy (alkalické a membránové) a chemické metanizaci bez potřeby energie na zajištění CO₂ a bilance zařízení uvádí renomované německé zdroje⁹⁵ (kde * značí stlačení na 80 barů):

⁹⁴ https://cs.wikipedia.org/wiki/Le_Chatelier%20princip

⁹⁵ <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6594/htm>

Pathway	Overall Efficiency	Boundary Condition
Power-to-Hydrogen	54–72%	Compression to 200 bars (gas storage)
	57–73%	Compression to 80 bars (gas grid)
	64–77%	Without compression
Power-to-Methane	49–64%	Compression to 200 bars (gas storage)
	50–64%	Compression to 80 bars (gas grid)
	51–65%	Without compression
P2H-to-Power	34–44%	Power generation via fuel cell (60%) * or
P2M-to-Power	30–38%	combined-cycle power plant (60%) *
P2M-to-Heat and Power	43–54%	CHP (45% heat and 40% electricity) *
P2M-to-Heat	53–82%	Condensing boiler (105%) *
P2H-to-EnginePower	34–44%	Conversion in fuel cell (60%) *
P2M-to-EnginePower	18–22%	Combustion in gas engine (35%) *

Pokud jde tedy o systémy skladování Power-to-Hydrogen, celková účinnost je asi o 5–12 % vyšší než u variant s methanací kvůli absenci mezikroku methanace.

Výrobní náklady obnovitelného plynu a všech ostatních zelených paliv na bázi C jsou určovány především investičními náklady, provozními náklady PtG/PtX-zařízení a provozními hodinami za rok.

Investiční náklady během desetiletí velmi prudce klesly a stále klesají ⁹⁶:

Year	Alkaline Electrolysis in EUR/kW	Membrane Electrolysis in EUR/kW	Chemical Methanation in EUR/kW	Biological Methanation in EUR/kW
2010	1150	1650	1040	1600
2015	980	1350	870	1300
2020	850	1130	740	1050
2025	720	950	620	860
2030	620	780	520	690
2040	460	530	370	460
2050	330	350	260	300

Investiční náklady mohou dale výrazně klesat při automatizaci průmyslové výroby, podobně jako u fotovoltaiky. Provozní náklady souvisejí především s elektrinou z OZE, která je stále levnější. Dále s daněmi, odvody a přírážkami, které se velmi liší a byly v posledním desetiletí největší bariérou pro komercializaci PtG.

⁹⁶ <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6594/htm>

Všechny chemické závody mají společné to, že ziskovost s vysokými investičními náklady vyžaduje provoz při vysoké míře využití. Tři hlavní faktory podporují ekonomický provoz PtG/PtX-zařízení:

- nízkonákladová obnovitelná elektřina
- vysoké kapacitní faktory/míry využití
- příznivé regulační rámce díky žádným nebo nízkým poplatkům, daním a odvodům.

Největší výhodou PtG je umožňuje obousměrné propojení elektrických a plynových sítí (viz 3.2.). Tato konvergenční schopnost vytváří základnu pro udržitelné zásobování energií s elektřinou, teplem a palivy na bázi větrné a solární elektřiny s využitím stávajících sítí a infrastruktur pro distribuci a skladování. Kromě již existující a obrovské akumulací sítě zemního plynu je velkou výhodou PtG všestranné využití metanu: na rozdíl od čistých zásobníků elektřiny, jako jsou přečerpávací vodní elektrárny nebo baterie, se vtlačený plyn nemusí nutně vracet zpět do elektrárny ale lze ho použít více způsoby a na více místech. Uložená energie není lokálně fixována, jako je tomu u přečerpávacích vodních elektráren nebo baterií. Lze implementovat sezónní skladování: energii shromážděnou během slunečného a větrného období lze v zimě nebo na jaře příštího roku využít ke zcela odlišným účelům a na jakémkoli místě v síti zemního plynu – k vytápění, pro mobilitu nebo dokonce k reverzní výrobě energie v jednom z mnoha elektráren na kombinovanou výrobu tepla a elektřiny. Ale hlavně, to co není možné u bateriového nebo přečerpávacího úložiště: pokud by museli akumulovanou energii skladovat několik týdnů nebo dokonce půl roku, okamžitě by se staly neekonomickými a některé baterie se během této doby samy vybily. Navíc mohou energii vrátit pouze jako elektřinu a pouze na stejném místě.

To neznamená, že tato skladovací zařízení jsou horší než Power-to-Gas. Ve skutečnosti jsou dvakrát efektivnější, pokud se používají výhradně jako úložiště typu power-to-power. Jsou však daleko méně flexibilní a v podstatě vhodné pro krátkodobé skladování elektřiny den-noc a pro vyrovnávání krátkodobých špiček nebo deficitů elektřiny. Nekonkurují tedy Power-to-Gas, ale jsou důležitým doplňkem. Power-to-Gas tak hraje klíčovou roli v cíli využití synergií propojením sektorů elektřiny, tepla a mobility, a má tak zvláštní postavení mezi technologiemi skladování.

Power to Metan versus Power to Hydrogen

Power-to-Hydrogen je výhodnější z důvodů nákladů a účinnosti, pokud lze vodík skladovat a používat lokálně nebo pokud není dosaženo limitu povoleného vtlačování do plynárenské soustavy. Pokud je průtok fosilního plynu nízký, je rychle dosaženo limitu vtlačování a k vyrovnání vtlačení vodíku je třeba použít vyrovnávací úložiště vodíku.

Na rozdíl od metanu nebo zemního plynu pro některé aplikace stále neexistují žádná masová a plošná řešení. Třebaže jsou palivové články již dlouho ve výzkumu a vývoji v odvětví tepla a dopravy, technologie připravená pro trh v požadovaném měřítku zatím není k dispozici. Přizpůsobení infrastruktury zemního plynu vyššímu mísení vodíku vyžaduje výzkum a vysoké náklady. V Německu jsou zatím povolena 2 % objemu a 20 % se považuje za technicky možné. Pokud budou všechny součásti čistého vodíkového hospodářství dostupné a dostupné v dostatečném měřítku, stane se metanizace zastaralou. Pokud tomu tak ještě není, lze pro obnovitelný plyn využít stávající plynárenskou infrastrukturu.⁹⁷

Potenciál distribuce energie

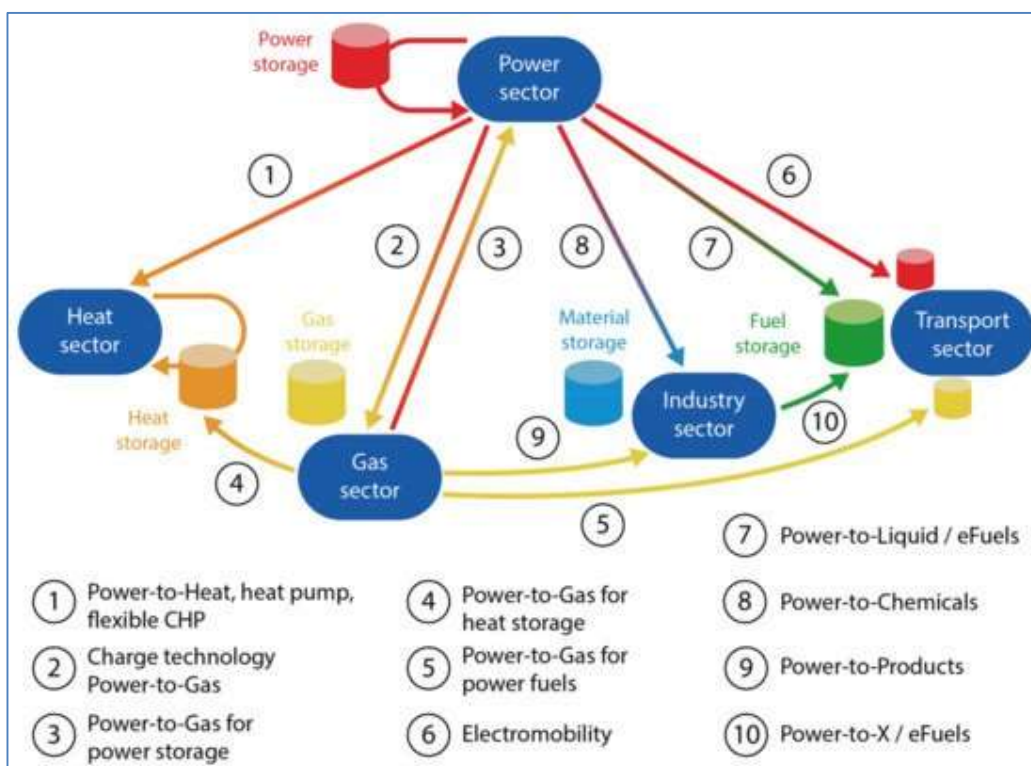
Plynárenská síť má kromě skladovacích kapacit také dobře rozvinutou přepravní a distribuční síť. Velký kontinentální plynovod může přepravovat energii ve formě plynu o kapacitě asi 70 GW, zatímco standardní elektrické přenosové linky mají typickou elektrickou přenosovou kapacitu 3,5 GW (dva třífázové systémy 380 kV). **Tedy cca 20x vyšší distribuční kapacita.** PtG tedy umožňuje nejen skladování velkého množství energie, ale také prostorový posun skladování a využití obnovitelného metanu.

Nejvýznamnější výhody Power-to-Gas

P2G je základním kamenem sektorového propojení a sektorové integrace:

- Odvětví elektřiny a plynu jsou propojena pro sezónní skladování energie;
- Odvětví elektřiny a tepla jsou propojena prostřednictvím obnovitelného plynu;
- Sektor elektřiny a dopravy jsou propojeny syntetickým palivem;
- Obnovitelný plyn slouží jako spojení mezi energetickým a průmyslovým sektorem, aby ocel, chemikálie a další sektory, které je obtížné dekarbonizovat, byly klimaticky neutrální:

⁹⁷ <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6594/htm>



Sektorová vazba Power-to-Gas a Power-to-X.

Propojuje odvětví elektřiny, tepla, dopravy a průmyslu prostřednictvím skladování energie a měničů energie a využívání obnovitelné elektřiny jako „primární energie“ pro dekarbonizaci

3.4. Definice jednotlivých transferů Power to X

Vznikla na základě různých výzkumných aktivit v Německu v roce 2014:

Definice energetických paliv/eFuels : Energetická paliva nebo eFuels jsou chemické nosiče energie založené na elektrické energii, vyrobené elektrolýzou vody a volitelnou syntézou (PtG, PtL) a používané v mobilitě. Příklady jsou vodík, SNG, metanol, čpavek a Fischer-Tropschova paliva jako e-diesel nebo e-kerosen.

Definice Power-to-X : Power-to-X popisuje přeměnu a skladování elektrické energie na nosič energie (plyn, palivo nebo surovina) nebo produkt (základní materiál, surovinu). Je to souhrnné označení pro Power-to-Gas, Power-to-Liquid, Power-to-Fuel, Power-to-Chemicals a Power-to-Product.

Tím byly dokončeny stávající definice PtG, PtL, PtC, eFuel a sektorové propojení:

Definice Power-to-Gas: (PtG) popisuje zařízení na transfer elektrické energie na plynný nosič energie, jako je vodík nebo metan, prostřednictvím elektrolýzy vody a případně methanace a její skladování. Je tedy součástí systému skladování energie. Power-to-Gas popisuje na jedné straně jednotku na konverzi a skladování a na druhé straně také celkový systém, který se skládá z vtlačování (elektrolýza, metanizace), skladování (skladování plynu, plynárenská síť) a využití (plynové elektrárny, KVET, plynová mobilita a plynové vytápění).

Definice Power-to-Liquid: (PtL) popisuje zařízení na transfer a skladování elektrické energie na kapalnou nosič energie, jako je petrolej, nafta nebo metanol, prostřednictvím elektrolýzy vody. Nosič energie se využívá v energetice.

Definice Power-to-Chemicals: (PtC) popisuje závod na přeměnu a skladování elektrické energie na chemické produkty, jako je např. methanol, prostřednictvím elektrolýzy vody a syntéz. Výrobek se používá jako materiál.

Definice eFuel: eFuel je kapalnou nebo plynnou palivo založené na přeměně a skladování elektrické energie prostřednictvím elektrolýzy a volitelných syntéz (Power-to-X). Nosič energie se využívá pro energii.

Definice sektorové vazby: Sektorová vazba popisuje propojení elektroenergetiky se stavebnictvím, dopravou a průmyslovými sektory prostřednictvím například kogenerace, tepelných čerpadel, topných tyčí, elektromobility, Power-to-X využívající přeměnu energie, energetických sítí (plyn, palivo, suroviny, elektřina) a skladování energie.

4. Pilíř – model TIMES

1. Implementovat následující do předchozího
2. Fotokatalytická hydrogenace CO₂ - nová kapitola

na CH₄, CH₃OH, CO, EtOH atd. Mezi těmito produkty je metanol jednou z nejdůležitějších a vysoce univerzálních chemikálií široce používaných v průmyslu a v každodenním životě.

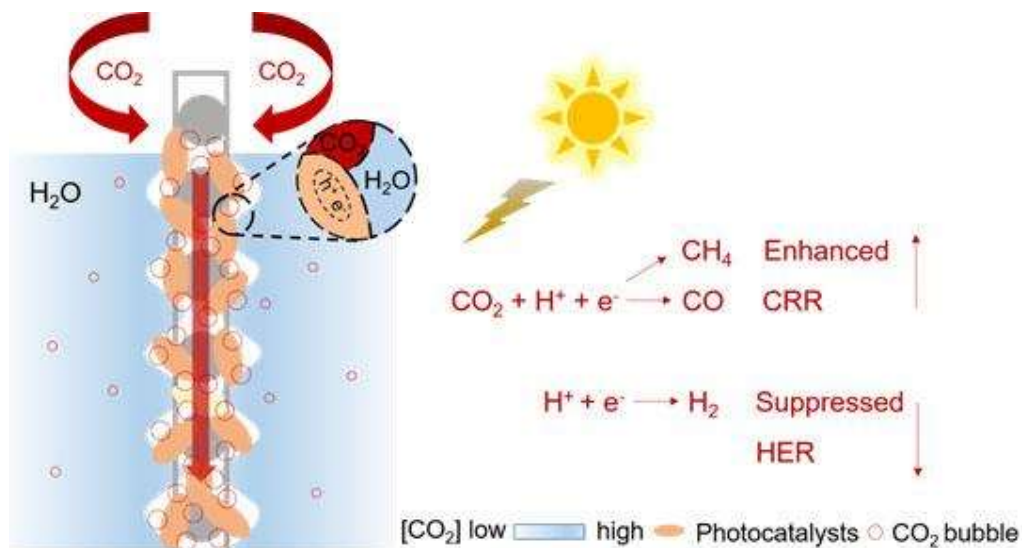
Tento přehled zdůrazňuje nedávný pokrok fotokatalytické hydrogenace CO₂ na CH₃OH. Pro fotokatalytickou redukci CO₂ na methanol jsou diskutovány zejména kovové organické rámce (MOF), smíšený oxid kovů, uhlík, TiO₂ a nanomateriály na bázi plasmonu. Nakonec je poskytnuto shrnutí a pohledy na tuto vznikající oblast.^{98 99}

⁹⁸ <https://www.mdpi.com/2073-4344/12/1/94/htm>

⁹⁹ <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/cy/d1cy02286e>

COFs¹⁰⁰

<https://www.eurekalert.org/multimedia/780726>



8.2. Fotokatalýza vody

Produkce vodíku přímo ze solární energie. Procesy rozkladu vody na kyslík a vodík v laboratorním měřítku a na katalyzátorech platiny již běží. Úkolem je ale proces zlevnit.¹⁰¹
HER - hydrogen evolution reaction

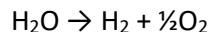
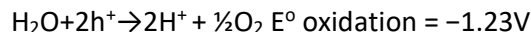
První fotokatalytické štěpení vodou (HER) předvedli v Japonsku s použitím elektrody oxidu titaničitého (TiO₂).

Následně byly provedeny různé studie pomocí heterogenní katalýzy za použití polovodičových materiálů. V procesu fotokatalytické výroby vodíku fotony s dostatečnou energií zasahují polovodiče, elektrony jsou excitovány do vodivého pásma, zanechávajíc za sebou elektronové díry ve valenčním pásmu a přebytek elektronů ve vodivém pásmu. Ty se nazývají páry elektron-díra, které hrají zásadní roli v redox reakcích štěpení vody. Tyto

¹⁰⁰

https://www.researchgate.net/publication/341576671_Covalent_Organic_Frameworks_A_Promising_Materials_Platform_for_Photocatalytic_CO2_Reductions

¹⁰¹ <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/01/190123131708.htm>

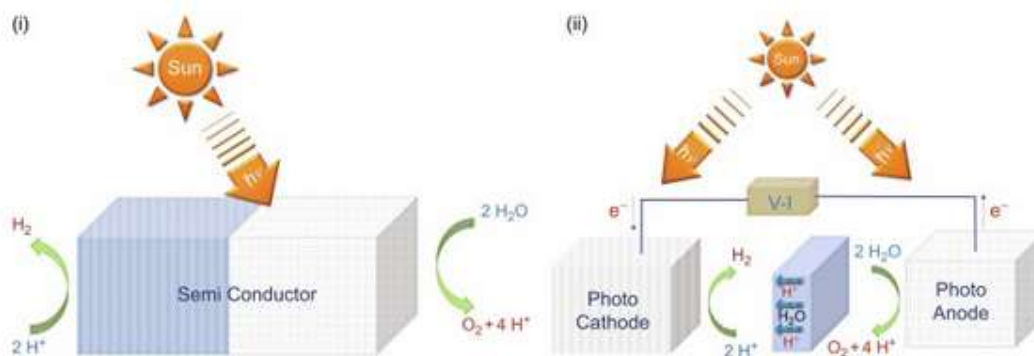


Minimální potřebná energetická hodnota pro fotokatalyzátor štěpící vodu je tedy 1,23 eV. TiO_2 , ZrO_2 , KTaO_3 , SrTiO_3 a BiVO_4 jsou tedy vhodnými kandidáty pro fotokatalytické štěpení vody.

Ukazuje se, že polovodičové katalyzátory spojené s uhlíkovými nanomateriály nebo nanočásticemi drahých kovů vykazují lepší využití viditelného světla. Sulfidy kovů, selenidy, nitridy kovů a některé katalyzátory neobsahující kovy se navíc ukazují jako slibní kandidáti na fotokatalytické štěpení vody ve viditelném spektru světla.¹⁰²

Fotokatalytické reakce můžou být děleny do dvou oblastí:

- Fotochemická
- Foto-elektro chemická



Schematic of water splitting via (i) photo-chemical, (ii) photo-electro-chemical.

PEC - Photo-electro-chemický rozklad vody¹⁰³ dle National Renewable Energy Laboratory NREL video¹⁰⁴

STH-SOLAR TO HYDROGEN

Foto elektrochemická (PEC) výroba vodíku nabízí slibnou cestu k cenově dostupnému a udržitelnému vodíkovému palivu sklízením světla ze slunce a využíváním vody jako suroviny. Výzkumníci používají metrickou účinnost **nazývanou solar to hydrogen (STH)** jako standardní

¹⁰² <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/photocatalytic-water-splitting>

¹⁰³ <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-photoelectrochemical-water-splitting>

¹⁰⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=6GT4Oii1-8&feature=youtu.be>

způsob hodnocení systémů PEC založených na tom, jak účinný je transfer energie ze slunce na vodík.

NREL v roce 2016 překonala 18letý světový rekord a **zvýšila účinnost STH η_{STH} na 16,2%** oproti předchozímu 12% STH, a to na cestě ke splnění vytýčenému cíli amerického ministerstva energetiky (DOE) které stanovuje cíl účinnosti ve výši 25%.¹⁰⁵

Jiné výzkumné temy referují zatím nižší výsledky účinnosti cca 10%.¹⁰⁶

Počet foto katalyzátorů pro štěpení vody byl před 20 lety velmi omezený. Jedinými známými foto katalyzátory s viditelným světlem CdS a WO₃.

Nyní do hry vstupují další - Cr_xRh_{2-x}O₃ / GaN: ZnO a Ru / SrTiO₃: Foto katalyzátory Rh-BiVO₄ reagují na celkové rozštěpení vody asi 500 nm; kvantový výnos je však stále nízký. **Vývoj nových a kvalitnějších fotokatalytických materiálů je proto stále velkým problémem.**¹⁰⁷

6. Strategické témata pro ČTPB - outlook

Česká technologická platforma pro užití biosložek v dopravě a chemickém průmyslu považuje za výhodné pro Českou republiku orientovat výzkumný potenciál:

- 1.) **V oblasti biomasy** se zaměřit především na biosložky pro chemický průmysl.
Analyzovat stávající možnosti především v lokálních biorafinériích
GBR (Green BioRefinery) - Zelené rafinérie - vstup tráva a víceleté pícniny
LCF (Lignocellulose Feedstock Biorafinery) - suchá biomasa, odpady celulózní a lignocelulózní. Identifikovat chemikálie s přidanou hodnotou, které potřebuje český chemický průmysl a zároveň analyzovat z jaké biomasy a při jakých agro podmínkách je možné biosložkami nahrazovat stávající dostupnost chemikálií z fosilních zdrojů.
- 2.) **V oblasti zdrojové suroviny** se zaměřit na dva základní-dlouhodobě dostupné a jinak problematicky „likvidovatelné“ zdroje – čistírenské kaly a komunální odpady.
- 3.) **V oblasti zpracovatelských technologií B2G** se zaměřit především na procesy akceptující heterogenitu vstupní suroviny – GASIFIKACE, PYROLÝZA, HYDROTERMÁLNÍ ZKAPALŇOVÁNÍ, TERMO-KATALYTICKÝ REFORMING

¹⁰⁵ <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fact-month-february-2019-process-produce-hydrogen-water-using-sunlight-reaches-162>

¹⁰⁶ <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ta/c8ta10165e#!divAbstract>

¹⁰⁷ <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/water-splitting>

- 4.) **V oblasti alternativních paliv** -zapojit výzkumní a průmyslovou obec do problematiky CO₂ a procesů transformačních technologických možností. V tomto směru ve spolupráci se Svazem chemického průmyslu založit novou pracovní skupinu případně novou platformu orientovanou na tuto problematiku.

Činnost ČTPB se bude i nadále se věnovat v rámci navazujících činností výše uvedeným tématům pro zajištění podkladů a diskusí mezi výrobními subjekty, výzkumními a vědeckými pracovišti a státní správou.