

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

**Analýza stlačeného zemného plynu – CNG
ako paliva v porovnaní s inými pohonnými látkami
(nafta, benzín a iné)**

Odborná štúdia

Vypracovali:

doc. Ing. Elena Hájeková, PhD.

Ing. Miroslava Bérešová, PhD.

Ing. Zuzana Silná, PhD.

Ing. András Peller, PhD.

Bratislava 2025

Súhrn

Predložená odborná štúdia uvádza komplexný pohľad na zemný plyn (najmä stlačený zemný plyn, CNG) a jeho alternatívne formy ako palivo v doprave. Opisuje základné fyzikálno-chemické vlastnosti zemného plynu a CNG v porovnaní s LPG, benzínom a motorovou naftou, pričom sa venuje aj skladovaniu, spracovaniu a distribúcii CNG. Prezентuje historický vývoj a súčasné využitie CNG, vrátane technických charakteristík vozidiel poháňaných CNG, bezpečnostných aspektov a porovnania s inými fosílnymi palivami. Text tiež rozoberá ekologické výhody CNG, najmä v oblasti nižších emisií škodlivín v porovnaní s benzínom a naftou, a upozorňuje na možnosti využitia obnoviteľných zdrojov, ako je bio-CNG a bio-LNG vyrobené z biometánu. Ďalej sa venuje alternatívnym palivám na báze biomasy, ako sú bioetanol, bionafta (FAME) a hydrorafinované rastlinné oleje (HVO), ako aj palivám na báze vodíka. Súčasťou textu je aj prehľad situácie s vozidlami na alternatívne palivá na Slovensku a ekonomické aspekty využívania CNG, vrátane cien a potenciálu výroby. V prílohe je uvedená prípadová štúdia, ktorá porovnáva obstarávacie a prevádzkové náklady pre autobusy s dvomi rôznymi palivami (CNG vs. nafta), ako aj environmentálne benefity používania CNG autobusov.

Text odbornej štúdie je originálny a je zostavený pomocou informácií publikovaných v recenzovaných vedeckých článkoch, monografiách, databázach renomovaných organizácií pôsobiacich v oblasti fosílnych energetických surovín, motorových palív, biopalív a CNG, dostupných na webových stránkach v čase vypracovania štúdie. Všetky použité literárne zdroje informácií sú citované na konci odbornej štúdie v Použitých zdrojoch.

Zoznam symbolov a skratiek

°C	stupeň Celzia
atm	atmosféra
BC	Black Carbon Emission – chemicky čierny uhlík
BEV	elektrické vozidlá s batériou
BSFC	špecifická spotreba paliva pri brzdení
BTE	tepelná účinnosť brzdenia
CCS	Carbon Capture and Storage – zachytávanie a skladovanie CO ₂
CNG	Compressed Natural Gas – stlačený zemný plyn
CO	oxid uhoľnatý
CO ₂	oxid uhličitý
ECM	elektronický riadiaci modul
EJ	exajoule
ETBE	etyltercbutyléter
EV	vozidlá na elektrický pohon
FAME	Fatty Acid Methyl Esthers – estery vyšších mastných kyselín
GHG	Greenhouse Gases – skleníkové plyny
GWh	gigawatthodina
H ₂	vodík
H ₂ S	sulfán
H-CNG	stlačený zemný plyn s vysokým energetickým obsahom
HCNG/H ₂ CNG	stlačený zemný plyn obohatený o vodík
HEV	Hybrid Electric Vehicle - hybridné elektrické vozidlo
HFC	Hydrogen Fuel Cell – vodíkový palivový článok
HICE	Hydrogen-fuelled Internal Combustion Engine – vodíkový spaľovací motor
hm. %	hmotnostné percento
HVO	Hydrotreated Vegetable Oils – hydrorafinované (hydrogenačne upravené) rastlinné oleje
CH ₄	metán

kg	kilogram
L-CNG	stlačený zemný plyn s nízkym energetickým obsahom
LNG	Liquified Natural Gas – skvapalnený zemný plyn
LPG	Liquified Petroleum Gas – skvapalnený ropný plyn
m ³	meter kubický
m ³ .h ⁻¹	meter kubický za hodinu
MJ.kg ⁻¹	megajoule na kilogram
mld.	miliarda
MN	metánové číslo
MON	Motor Octane Number - oktánové číslo získané motorovou metódou
MPa	megapascal
Mt	megatona
MTBE	metyltercbutyléter
N/A	v tabuľke - hodnota neaplikovateľná
N ₂	dusík
NGLs	Natural Gas Liquids - kvapalné uhľovodíky získané zo zemného plynu
NH ₃	amoniak
NMHC	Nonmethane Hydrocarbons – uhľovodíky s 2 a viac atómami uhlíka
NO _x	oxidy dusíka
O ₂	kyslík
obj. %	objemové percento
OZE	obnoviteľné zdroje energie
PHEV	plug-in hybridné vozidlá (nabíjateľné z externého zdroja pomocou kábla)
PM ₁₀	všetky častice s aerodynamickým priemerom menším ako 10 μm
PM _{2,5}	všetky častice s aerodynamickým priemerom menším ako 2,5 μm
ppm	parts per million – milióntina celku (mg.kg ⁻¹)
RNG	Renewable Natural Gas – metán z obnoviteľných zdrojov
RON	Research Octane Number - oktánové číslo získané výskumnou metódou
SNG	Synthetic Natural Gas – syntetický zemný plyn
t	tona

TAG	triacylglyceroly
CTC	Cradle-To-Cradle – „od kolísky ku kolíske“, zahŕňa celý životný cyklus vrátane recyklácie
TTW	Tank-To-Wheel – „od nádrže po kolesá“, napr. v prípade emisií čisto zo spaľovania paliva
UCO	Used Cooking Oils – použité kuchynské oleje
VOC	Volatile Organic Compounds – prchavé organické zlúčeniny
WI	Wobbeho index
WTW	Well-To-Wheel – „od zdroja po kolesá“
ZP	zemný plyn

Obsah

Súhrn	i
Zoznam symbolov a skratiek	ii
Úvod	1
1 Všeobecná charakteristika zemného plynu, CNG, LPG a kvapalných motorových palív	2
Zemný plyn ako zdroj energie pre dopravu	2
História CNG ako paliva	3
Schéma spracovania zemného plynu až po získanie CNG	3
Základné charakteristiky benzínu, motorovej nafty a LPG	4
Benzín	5
Nafta	6
LPG	6
Autá na CNG	8
Autá jazdiace výlučne na CNG	8
Fungovanie motora na CNG	8
Dvojpalivové vozidlá (Bi-fuel)	9
Vozidlá s duálnymi motormi (Dual-fuel)	9
Skladovanie CNG	10
Plniace stanice na CNG	11
Stanica s rýchlym plnením	11
Plniace stanice na pomalé plnenie	13
Kombinácia oboch typov plniacich staníc	14
2 Fyzikálnochemické vlastnosti CNG v porovnaní s bežne dostupnými pohonnými hmotami	16
Zloženie a fyzikálnochemické vlastnosti zemného plynu	16
Fyzikálnochemické vlastnosti CNG	17
Fyzikálnochemické vlastnosti LNG	18

Kritériá kvality CNG	19
Výhrevnosť paliva	19
Metánové číslo (MN)	20
Obsah síry a jej zlúčenín	20
Obsah vody	21
Wobbého index (WI)	21
Mazacie oleje z kompresora	22
3 Výhody a nevýhody použitia CNG v porovnaní s inými fosílnymi palivami	23
CNG v porovnaní s LPG	23
CNG v porovnaní s benzínom a naftou	23
Porovnanie motorov na CNG s motormi na konvenčné palivá	24
Tepelná účinnosť/kompresný pomer	24
Zmiešavanie paliva so vzduchom	24
Údržba vozidla	24
Špecifická spotreba paliva pri brzdení	25
Rýchlosť plameňa	25
Bezpečnosť áut poháňaných CNG	25
4 Ekologické aspekty spaľovania CNG v porovnaní s inými pohonnými látkami, obnoviteľné zdroje CNG, ďalšie typy obnoviteľných palív	27
Osobné automobily	28
Ťažké úžitkové vozidlá	28
Emisie CO ₂ od zdroja až po kolesá (WTW – well to wheel)	29
Ecotest – porovnanie vozidiel s rôznym pohonom	30
Biometán pre výrobu bio-CNG a bio-LNG – vlastnosti a výroba	30
Bioplyn a biometán vo svete a v Európe	32
Využitie bio-CNG a bio-LNG v osobnej a nákladnej doprave	34
Alternatívne palivá na báze olejatej biomasy	35
Výroba a využitie bionafty založenej na FAME	35
Výroba a vlastnosti hydrorafinovaných rastlinných olejov	36

Udržateľnosť surovín pre výrobu FAME a HVO	37
Vodík a etanol – suroviny aj alternatívne palivá	38
Bioetanol	39
Vodík	40
Vozidlá s alternatívnym pohonom na Slovensku	41
5 Potenciálne možnosti vplyvu výroby a logistiky jednotlivých druhov palív vzhľadom na ekológiu a základnú ekonomiku procesov	45
Priemerná cena CNG v porovnaní s inými palivami	45
Základné ekonomické aspekty CNG	45
Záver	49
Príloha. Prípadová štúdia: Kúpa 12 m dlhého mestského autobusu — CNG vs. nafta	51
Použité zdroje	54

Úvod

Zemný plyn zohráva významnú úlohu v globálnom energetickom mixe ako najčistejšie fosílné palivo s relatívne nízkym obsahom uhlíka. Jeho široké využitie siaha od výroby elektriny, cez priemyselné procesy, až po stále rastúce uplatnenie v sektore dopravy. V roku 2024 zemný plyn zabezpečil takmer 25 % celosvetovej potreby primárnej energie, teda 149 exajoulov, čo predstavuje 4,1 biliónov m³ [1]. V porovnaní s tradičnými kvapalnými fosílnymi palivami, ako sú benzín a motorová nafta, zemný plyn ponúka environmentálne výhody, predovšetkým nižšie emisie CO₂, NO_x a prakticky nulové emisie tuhých častíc. V doprave sa využíva predovšetkým vo forme stlačeného zemného plynu (CNG – Compressed Natural Gas), ktorý je považovaný za perspektívne a ekologicky prijateľnejšie alternatívne palivo.

Zemný plyn patrí medzi tri hlavné fosílné energetické suroviny – spolu s ropou a uhlím. Na rozdiel od uhlia a ropy má však výhodnejší pomer medzi obsahom uhlíka a vodíka, čo sa prejavuje nižšou uhlíkovou stopou pri jeho spaľovaní. Podľa údajov Štatistického prehľadu svetovej energie z r. 2021 boli overené globálne zásoby zemného plynu odhadované na približne 190 biliónov kubických metrov (190 × 10¹² m³), čo pri súčasnej spotrebe predstavuje overené zásoby na viac ako 50 rokov [2].

Okrem konvenčných ložísk sa čoraz väčšia pozornosť venuje netradičným zdrojom zemného plynu, ako sú plyn uhoľných súvrstí (coalbed methane), bridlicový plyn (shale gas) a mimoriadne perspektívne hydráty metánu viazané v permafroste a na dne oceánov.

Z hľadiska udržateľnosti má význam aj biometán, ktorý je možné získať čistením bioplynu vznikajúceho pri anaeróbnej digescii organických materiálov. Po úprave na kvalitu zodpovedajúcu zemnému plynu (tzv. upgrading) je možné z biometánu vyrábať CNG, t.j. nahradiť fosílny zdroj obnoviteľným.

Zemný plyn a jeho obnoviteľný ekvivalent – biometán – tak predstavujú dôležité palivá na prechodné obdobie smerom k nízkouhlíkovej doprave.

1

Všeobecná charakteristika zemného plynu, CNG, LPG a kvapalných motorových palív

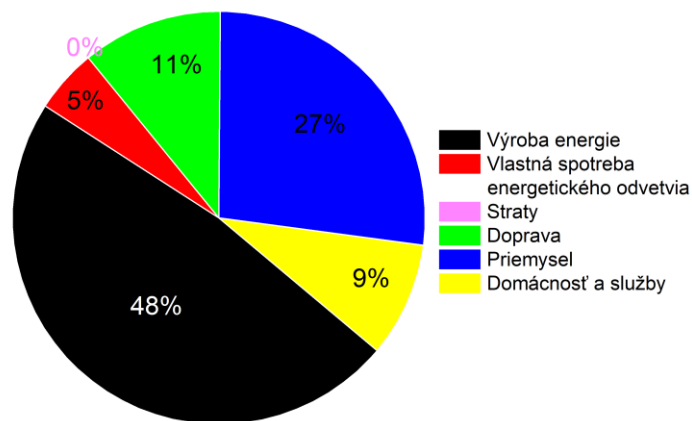
Zemný plyn ako zdroj energie pre dopravu

Zemný plyn (ZP) sa ako zdroj energie pre dopravu začal používať v Európe (Taliansko) približne v polovici tridsiatych rokov minulého storočia [3]. Významný nárast jeho využitia ako paliva pre motorové vozidlá nastal v období od rokov 1974 – 1979 v dôsledku ropnej krízy, vysokých cien ropy a najmä vďaka jeho výhodnej cene, nižším emisiám a vhodnosti použitia v konvenčných benzínových motoroch [4]. Spaľovanie ZP produkuje najnižšie emisie skleníkových plynov (GHG) spomedzi fosílnych palív a ZP sa považuje za efektívne a čisté palivo [5]. V dôsledku toho sa ZP v posledných rokoch tešil veľkej akceptácii ako palivo pre rôzne typy vozidiel a toto rozšírenie sa pravdepodobne v nasledujúcich rokoch ešte zvýši. Objav bridlicového plynu a pokrok v jeho ťažbe podnietil ďalšie zameranie sa na zemný plyn a geograficky diverzifikoval produkciu zemného plynu. Podľa Energetického predpokladu z roku 2025 [6] výhľad dopytu po zemnom plyne do roku 2050 bude závisieť od rýchlosti energetickej transformácie. Vyhliadky zemného plynu sú formované dvoma významnými, ale protichodnými trendami: rastúcim dopytom v rozvíjajúcich sa ekonomikách ako dôsledok industrializácie a vyváženým posunom od zemného plynu k väčšej elektrifikácii a palivám s nižším obsahom uhlíka, čo súvisí s dekarbonizáciou. Čistý dopad týchto dvoch protichodných síl bude závisieť od rýchlosti energetickej transformácie v jednotlivých krajinách sveta.

Počet vozidiel na zemný plyn (osobné automobily, autobusy, úžitkové vozidlá) vo svete neustále rastie, rovnako ako aj počet krajín, v ktorých sa tieto vozidlá využívajú. Používanie CNG v doprave sa výrazne rozšírilo aj vďaka masovej výrobe vysokotlakových zásobníkov. V roku 2020 bol na celom svete celkový počet vozidiel poháňaných zemným plynom (NGV) viac než 29 miliónov [7], pričom významnú časť z tohto počtu tvorili práve vozidlá s pohonom na CNG [4].

Napriek svojim výhodám však zemný plyn zatiaľ v dopravnom sektore nemá dostatočnú kapacitu na úplné nahradenie konvenčných palív, ako sú benzín a nafta [4].

Spotreba zemného plynu v sektore dopravy sa odhadovala na 11 % z jeho globálnej spotreby a predpokladá sa nárast tohto podielu (**obrázok 1.1**) [4]. Straty v hodnote 0 % vyjadrujú skutočnosť, že na **obrázku 1.1** sú zohľadnené všetky spôsoby využitia ZP.



Obrázok 1.1 Celosvetová spotreba zemného plynu podľa sektorov [4].

História CNG ako paliva

Prvé experimenty so stlačenými plynmi ako palivami pre spaľovacie motory siahajú až do roku 1850 vo Francúzsku. Stlačené plyny pre spaľovacie motory, a to hlavne koksárenský plyn a svietiplyn, nachádzali širšie využitie počas prvej a druhej svetovej vojny, počas ktorých bol vo viacerých krajinách Európy nedostatok benzínu. Využívali sa tzv. „gas bag vehicles“ – vozidlá s plynovým vakom [8].

V 50. rokoch 20. storočia sa CNG začalo intenzívnejšie skúmať ako sľubné palivo pre spaľovacie motory. V 60. rokoch ho viaceré mestá v Európe aj USA využívali vo verejnej doprave. Zvýšený záujem o alternatívne palivá priniesla ropná kríza v 70. rokoch minulého storočia. Výskum a vývoj automobilového priemyslu sa preto zamerl hlavne na použitie CNG. Ďalšie dekády priniesli významné kroky vo vývoji CNG vozidiel. Niektoré štáty sveta poskytovali daňové úľavy pre vlastníkov CNG vozidiel. Vo viacerých krajinách sa tiež zaviedli prísnejšie štandardy na emisie. V 90. rokoch nastal ďalší rozmach infraštruktúry CNG. Viaceré svetové mestá začali využívať CNG pre verejnú dopravu, vzrastal preto aj počet plniacich staníc [9].

Na prelome milénia sa začal používať nový systém prevážania CNG – tzv. „Coselle CNG carriers,“ ktorý umožnil efektívnejšie skladovanie a transport CNG [10]. Je to technológia na námornú prepravu CNG, ktorá využíva špirálovo navinuté rúry v kompaktných moduloch (coselle) umiestnených na špeciálne navrhnutých lodiach. Je to efektívne riešenie pre menšie objemy plynu. CNG sa na začiatku 21. storočia považovalo za lacnejšiu alternatívu benzínu a na trhu bola dostupná prestavba osobných áut pre spaľovanie CNG [11].

Schéma spracovania zemného plynu až po získanie CNG

Schéma spracovania zemného plynu na konečné produkty (CNG, LNG, LPG, kondenzáty) je zobrazená na **obrázku 1.2**.

Surový ZP po ťažbe obsahuje popri metáne a vyšších uhľovodíkoch aj vodu, kyslé plyny (H_2S , CO_2), dusík, ortuť a tuhé častice. Preto je potrebný komplexný reťazec technologických krokov na postupné čistenie a separovanie zložiek, aby ZP spĺňal prísne kvalitatívne parametre pre transport a spotrebu [12].

Prvým krokom ešte pri jeho ťažbe je separácia voľnej vody a kondenzátu (C_5^+ frakcia), ktorý je cennou petrochemickou surovinou využiteľnou v rafinériách [12].

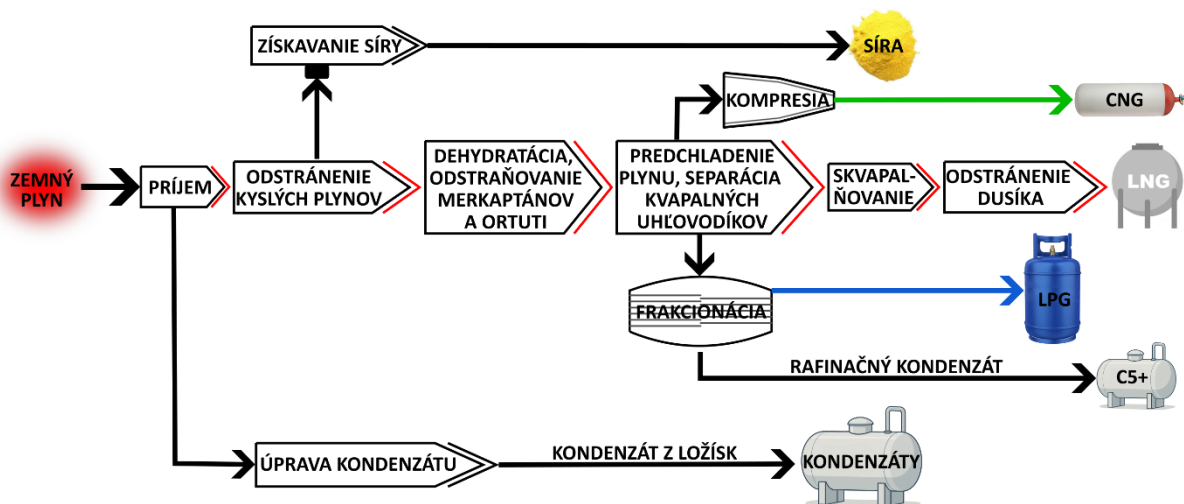
Odstraňovanie kyslých plynov sa realizuje vypieraním pomocou roztokov amínov, alebo membránovými technológiami. Získaný prúd H_2S je spracovaný v jednotke na výrobu síry, kde sa Clausovým procesom premieňa na elementárnu síru, čím sa minimalizuje environmentálna záťaž [13].

Sušením plynu (glykolová absorpcia, molekulové sitá) sa odstraňuje vodná para, čím sa predchádza tvorbe hydrátov v potrubiach počas transportu v zimnom období [12]. Následne sa odstraňujú aj stopové nečistoty, ako ortuť alebo dusík.

Kryogénna separácia umožňuje oddeliť NGLs (etán, propán, butány a rafinačný kondenzát). Tieto produkty sa rozdeľujú frakciáciou v kolónach – deetanizér (etán), depropanizér (propán), debutanizér (butány) [13]. Výsledkom sú samostatné prúdy využívané v petrochemickom priemysle, energetike alebo doprave vo forme LPG (zmes hlavne propánu a butánu).

Ďalší významný produkt LNG (skvapalnený ZP) sa vyrába, ak je nutný transport ZP na veľké vzdialenosti. Pri skvapalnení sa plyn ochladí na približne $-162\text{ }^\circ\text{C}$, čím sa zníži jeho objem 600-násobne [13]. LNG umožňuje ekonomicky výhodnejšiu prepravu plynu medzi kontinentami. Pri výrobe LNG sa často odstraňuje aj nadbytočný dusík, ktorý by znižoval jeho výhrevnosť. Dusík sa oddeľuje kryogénnou destiláciou, ktorá zabezpečuje, aby konečný LNG spĺňal prísne energetické špecifikácie [12].

CNG (Compressed Natural Gas) je ďalšia forma finalizovaného plynu. Ide o vyčistený plyn (takmer čistý metán) stláčaný kompresormi na tlak cca 200 – 250 bar a následne uskladnený v oceľových alebo kompozitných tlakových zásobníkoch. Pred samotnou kompresiou je dôležité odstránenie vody, CO_2 a H_2S zo ZP, aby sa predišlo korózii a poškodeniu zariadení [14]. Technológia výroby je menej náročná ako pri LNG, nevyžaduje kryogénne teploty, ale kladie vyššie nároky na tlakové systémy [14], [15]. Výsledným produktom celého procesu je vysokočistý metán, ktorý spĺňa špecifikácie pre transport a následné využitie v priemysle, energetike či domácnostiach [12].



Obrázok 1.2 Schéma spracovania zemného plynu na CNG, LNG, LPG, kondenzát, upravené podľa [12].

Základné charakteristiky benzínu, motorovej nafty a LPG

Medzi fosílné automobilové palivá vyrábané z ropy patria predovšetkým benzín a motorová nafta. Zložky LPG sa získavajú separáciou zo ZP, ako je uvedené na **obrázku 1.2** v predošlom odseku, ale v menšej miere aj pri spracovaní ropy. Motorové palivá, vrátane leteckého petroleja, sú hlavné

produkty spracovania ropy v rafinériách, pričom tvoria približne 75 % celkovej produkcie ropných produktov. Na rozdiel od CNG, ktorý je tvorený prevažne metánom, sú benzín, nafta a LPG zmesou rôznych uhľovodíkov s vyšším počtom atómov uhlíka, teda s väčšími molekulami než metán, čo sa prejavuje v rozdielnych fyzikálnochemických vlastnostiach týchto palív.

Pri chemickom označovaní uhľovodíkov sa často používa symbolické vyjadrenie ako napríklad C_{12} , ktoré označuje molekulu s dvanástimi atómami uhlíka v reťazci. Vyššie alkány s dlhšími reťazcami (napr. C_{12} – C_{20}) sú bežné v nafte, zatiaľ čo kratšie reťazce (napr. C_5 – C_{11}) dominujú v benzíne. Hlavnými zložkami LPG sú propán C_3 a bután C_4 .

Benzín a nafta určené pre moderné spaľovacie motory obsahujú okrem širokého spektra kvapalných uhľovodíkov rôznej štruktúry a vlastností aj bioprísady a aditíva na zlepšenie úžitkových a emisných vlastností paliva. Ich chemické zloženie a výrobný proces je podstatne zložitejší v porovnaní s výrobou CNG, ktorý sa prakticky len stláča do zásobníkov po vyčistení a vysušení ZP.

Benzín a motorová nafta majú síce spoločné, že sa získavajú z ropy, ale ich zloženie, vlastnosti a použitie sa líši. Hlavným rozdielom je typ motora, v ktorom sa používajú. V zážihových motoroch, inak známych aj ako benzínové motory, dochádza ku zapáleniu zmesi benzínu so vzduchom vo valci motora v dôsledku zážihu sviečkou, teda iniciáciou. Vo vznetových motoroch, kde sa ako palivo používa nafta, dochádza ku samovznieteniu paliva po jeho nastreknutí do horúceho vzduchu pri vysokom tlaku vo valci motora, čím sa začne reakcia spaľovania a uvoľnenie energie z paliva.

Benzín

Benzín je kvapalné palivo získané spracovaním ropy, používané v spaľovacích zážihových motoroch. Je jedným z najbežnejšie používaných konvenčných kvapalných palív. Jedná sa o zmes rôznych uhľovodíkov, akými sú alkány, alkény a aromáty a kyslíkatých zložiek (étery a alkoholy), ako aj aditív, v rozsahu teplôt varu približne 35 až 210 °C pri atmosférickom tlaku. Jednou z najdôležitejších vlastností benzínu, ktorá vyjadruje jeho odolnosť voči detonačnému spaľovaniu (samovznieteniu) vo valci zážihového motora, je oktánové číslo. Čím je oktánové číslo vyššie, tým je odolnosť benzínu voči samovznieteniu vyššia [16].

Okrem uhľovodíkov sú prítomné v benzíne aj ďalšie zložky, ktoré ovplyvňujú nielen oktánové číslo, ale aj jeho ďalšie vlastnosti. Medzi vysokooktánové zložky automobilových benzínov patria napr. kyslíkaté látky ako alkoholy (používa sa hlavne bioetanol, ale možné je použiť aj metanol, propanol alebo butanol) a étery ako ETBE (etyltercbutyléter), v menšej miere MTBE (metyltercbutyléter). Všetky tieto kyslíkaté látky sa vyznačujú vysokými oktánovými číslami. Nevýhodou kyslíkatých látok je, že čiastočne znižujú výhrevnosť paliva. Najčastejšie používanou biozložkou do benzínu je etanol a čiastočne aj ETBE v tom prípade, ak sa na jeho výrobu použije bioetanol.

Na zlepšenie úžitkových vlastností automobilových benzínov sa do paliva pridávajú aj ďalšie prísady ako napríklad:

- Detergentné prísady – odstraňujú usadeniny vytvorené v palivovej nádrži, zabraňujú tvorbe usadenín v sacom potrubí a v spaľovacom priestore, čím sa udržuje optimálny výkon motora.
- Antikorózne prísady – chránia kovové časti, ako sú napríklad nádrže, pred koróziou.
- Antioxidanty – zabraňujú pozvoľnej oxidačnej degradácii (kvôli prítomnosti nenasýtených uhľovodíkov v benzíne) a stabilizujú kvalitu paliva počas jeho skladovania.

- Deemulgátory – zabraňujú tvorbe emulzií vody v palive a umožňujú jej prirodzené oddelenie a usadenie na dne nádrže.
- Mazivostné prísady – zabezpečujú dokonalé mazanie dávkovacích zariadení a častí motora, a tým zabraňujú ich opotrebovaniu a znižujú straty trením.

V závislosti od krajiny a výrobcu sa môžu pridávať v menšej miere aj iné prídavky do benzínu na zabezpečenie kvality a výkonu paliva [16].

Nafta

Nafta, známa aj pod názvom diesel, sa používa ako kvapalné palivo vo vznetrových motoroch, v ktorých nedochádza ku zapáleniu paliva so vzduchom v dôsledku iskry, ale v dôsledku vysokej teploty v spaľovacom priestore. Nafta je podobne ako benzín zmesou uhľovodíkov rôznej štruktúry s veľkosťou molekúl v rozsahu približne od C₁₂ do C₂₀. Nafta obsahuje alkány lineárne a rozvetvené, cykloalkány, alkylaromáty s jedným, dvomi, príp. viacerými kruhmi. Jedná sa o ťažšie uhľovodíky v porovnaní s benzínom, ako aj v porovnaní s CNG. S predĺžovaním reťazca v molekule uhľovodíka, ako aj s počtom kruhov v ich molekule, rastie ich viskozita, hustota a teplota varu. Z tohto dôvodu je destilačné rozmedzie motorovej nafty vyššie v porovnaní s benzínom, od 170 do 360 °C [16]. Vzhľadom na podstatné rozdiely v zložení benzínu a nafty, rozdielne sú aj ich fyzikálno-chemické vlastnosti (**tabuľka 1.1**). Do nafty sa ako biozložka bežne pridávajú estery rastlinných olejov a na zlepšenie úžitkových vlastností aj prísady. Jedná sa napríklad o prísadu na zvýšenie cetánového čísla, mazivostné prísady, detergenty, vodivostné prísady, antikoročné prísady, antioxidanty či depresanty.

V prípade nafty sú jej spaľovacie vlastnosti hodnotené cetánovým číslom, ktoré vyjadruje oneskorenie zápalu nafty po jej nastreknutí do spaľovacieho priestoru [17]. Čím je cetánové číslo vyššie, tým je zapálenie nafty po vstreknutí rýchlejšie, čo vedie ku lepšiemu štartu za studena, lepšiemu spaľovaniu a nižším emisiám, ako aj k tichšiemu chodu motora. Pre bežné motory sa odporúčajú palivá s cetánovým číslom 51 až 55. Palivo s nízkym cetánovým číslom okolo 40 spôsobuje horšie spaľovanie a tvrdý chod motora.

Ďalším dôležitým sledovaným parametrom u motorovej nafty sú nízkoteplotné vlastnosti. Vyjadrujú správanie motorovej nafty pri nízkych teplotách, najmä jej schopnosť zachovať si tekutosť a priechodnosť palivovým systémom pri poklese vonkajších teplôt. Tieto vlastnosti sú dôležité najmä v zimných podmienkach, keď sa môžu z nafty vylučovať parafíny (vosky), ktoré následne upchávajú palivové filtre a potrubia. Nízkoteplotné vlastnosti sa vyjadrujú pomocou medznej teploty filtrovateľnosti (z angl. Cold Filter Plugging Point - CFPP), čo je najnižšia teplota, pri ktorej je ešte nafta schopná prejsť cez palivový filter vozidla. Na tento parameter má vplyv predovšetkým zloženie paliva. Napríklad prítomnosť lineárnych alkánov zhoršuje kvalitu nafty v zime, v dôsledku náchylnosti týchto uhľovodíkov tvoriť kryštály parafínov [16].

LPG

LPG (skvapalnený ropný plyn, z angl. Liquefied Petroleum Gas) je zmes plynov pozostávajúca predovšetkým z propánu, butánu, izobutánu a iných ľahkých uhľovodíkov. Jeho vlastnosti a vlastnosti jeho hlavných zložiek sú uvedené v **tabuľke 1.2**. Získava sa pri spracovaní tzv. mokrého zemného plynu (zemný plyn vyťažený spolu s ropou s obsahom vyšších uhľovodíkov, ktoré môžu pri ochladení kondenzovať, pozri **obrázok 1.2**) alebo pri spracovaní (rafinácii) ropy. LPG ako palivo pre spaľovacie motory nadobudlo širšie použitie v 50. rokoch minulého storočia pri vývoji dvojpalivových motorov. Tieto motory umožňujú spaľovanie LPG paralelne s iným palivom (benzínom alebo naftou).

Tabuľka 1.1 Porovnanie vlastností CNG, benzínu a nafty [4], [18], [19], [20].

Vlastnosť		CNG	Nafta	Benzín
Zloženie (hm. %)	uhlík	75,0	83 – 87	85 – 88
	vodík	25,0	13 – 14	14 – 15
Stredná molárna hmotnosť (g.mol ⁻¹)		~ 16,5	~ 200	~ 105
Hustota pri 15 °C a 1,01 bar (kg.m ⁻³)		0,68 - 0,72	820 – 845	720 – 775
Stechiometrický pomer vzduch-palivo	mol.	9,7	50	59,5
	hm.	17,2	14,7	14,7
Výhrevnosť	MJ.Nm ⁻³	~ 34 – 36	-	-
	MJ.kg ⁻¹	~ 45 – 50	42,5 – 43	43 – 44
Energetická hustota stechiometrickej zmesi (MJ.Nm ⁻³)	nasávaná zmes	2,9	3,61	3,55
	nasávaný vzduch	3,60	N/A	N/A
Medza výbušnosti (obj. % paliva vo vzduchu)	dolná	5,3	1	1,4
	horná	15,0	6	7,6
Merné skupenské teplo vyparovania pri 15 °C (MJ.Nm ⁻³)		N/A	26,08	33,5
Merné skupenské teplo vyparovania pri 15 °C (MJ.kg ⁻¹)		N/A	0,233	0,35
Teoretická teplota adiabatického plameňa (°C)		1 950	2 030 – 2 080	2 140
Teplota samovznietenia (°C)		540	316	257
Oktánové číslo	výskumnou m. (RON)	120 – 130	N/A	≥ 91 – ≥ 98
	motorovou m. (MON)	112 – 122	N/A	82 – 90
	priemer (výskum. + motor.)/2	N/A	N/A	86 – 94
Cetánové číslo		-10	≥ 51	5 – 20
Minimálna energia vznietenia vo vzduchu (MJ)		0,285	0,243	0,243
Skladovací tlak (bar)		200 – 250	1	1
Teplota varu/destilačný rozsah pri atm. tlaku (°C)		- 162	170 – 360	35 – 210

LPG sa skladuje v kvapalnom skupenstve v strednotlakových zásobníkoch pri tlaku v rozmedzí 7,6 – 10,3 bar. Prevádzkový tlak v zásobníkoch vozidiel na LPG pohon je cca 22 bar. Nevýhodou oproti nádržiam na benzín alebo naftu je, že zásobník na LPG má pre ekvivalentné vozidlo vyššiu hmotnosť z dôvodu nižšej objemovej výhrevnosti LPG (24 až 27 MJ.dm⁻³) v porovnaní s benzínom (~ 32 MJ.dm⁻³) alebo naftou (~ 36 MJ.dm⁻³) [19], [21]. Tieto zásobníky sa tiež obvykle plnia len do 80 % ich kapacity [21].

Ďalšou nevýhodou LPG je jeho vyššia hustota (~ 1,9 kg.m⁻³ pri 15 °C a tlaku 1 bar) v porovnaní so vzduchom (~ 1,2 kg.m⁻³ pri 15 °C a tlaku 1 bar). Z tohto dôvodu je vo viacerých krajinách zakázaný alebo čiastočne obmedzený vjazd vozidiel s LPG pohonom do podzemných garáží. V prípade úniku sa LPG drží pri zemi a je náročné ho z podzemných priestorov odvetrať [22].

Tabuľka 1.2 Vlastnosti propánu, butánu a LPG [21].

Vlastnosť	Bután	Propán	LPG
Chemický vzorec	C ₄ H ₁₀	C ₃ H ₈	Zmes C ₃ H ₈ a C ₄ H ₁₀
Molárna /stredná molárna hmotnosť (g. mol ⁻¹)	58	44	~ 50
Hustota (kg.m ⁻³), kvapal. fáza, 15°C	580	510	510 - 570
Teplota varu (°C)	- 0,5	- 43	- 42
Výhrevnosť (MJ.kg ⁻¹), kvapal. fáza	45,7	46,4	~ 46,0
Medze výbušnosti v zmesi so vzduchom (obj. %)	1,5 – 8,5	2,1 – 9,5	1,5 – 9,5

Autá na CNG

Vozidlá na stlačený zemný plyn (CNG) fungujú spravidla veľmi podobne ako benzínové vozidlá so spaľovacím motorom so zážihovým zapalovaním. V niektorých prípadoch sa CNG používa aj v spojení so vznetovým motorom, najmä v duálnych (dual-fuel) systémoch [15].

Zemný plyn je uskladnený vo vysokotlakovej palivovej nádrži, ktorá sa zvyčajne nachádza v zadnej časti vozidla. Palivový systém vedie CNG pod tlakom až okolo 200 bar do regulátora, kde sa tlak znižuje na úroveň vhodnú pre vstrekovanie. Následne sa plyn vstrekuje buď do sacieho potrubia, alebo priamo do spaľovacej komory, kde sa zmieša so vzduchom, stlačí a zapáli – buď iskrou zapalovacej sviečky, alebo samovznietením v závislosti od typu motora [15].

Z hľadiska pohonu existujú tri hlavné typy CNG vozidiel. Prvým sú monopolívové vozidlá, ktoré jazdia výhradne na CNG. Druhým typom sú dvojpalívové vozidlá (bi-fuel), ktoré kombinujú zážihový motor a možnosť spaľovať benzín aj CNG – prepínanie medzi palivami je možné počas jazdy. Tretím typom sú duálne vozidlá (dual-fuel) so vznetovým motorom, kde sa zmes vznieti pomocou malého množstva nafty, zatiaľ čo hlavnú časť energie zabezpečuje CNG [15].

Autá jazdiace výlučne na CNG

Vozidlá poháňané výlučne CNG, bez potreby použitia iného paliva, dokážu plne využiť výhody tohto typu paliva [15]. Tými sú najmä vysoké oktánové číslo (pozri **tabuľku 1.1**) a odolnosť voči detonačnému spaľovaniu (klepaniu). To umožňuje konštrukciu motora s vyšším kompresným pomerom, a vyššou energetickou účinnosťou spaľovania [23]. Kompresný pomer v motore poháňanom CNG je navrhnutý tak, aby pri plnom využití vysokého oktánového čísla zemného plynu zabezpečil jeho čisté spaľovanie. Vďaka tomu tieto vozidlá produkujú iba minimálne množstvo emisií [15].

Fungovanie motora na CNG

CNG sa vo vozidle skladuje vo vysokotlakovej zásobnej nádrži, ktorá je konštruovaná na bezpečné uchovávanie plynu pri vysokom tlaku. Zo zásobníka sa plyn vedie cez palivové potrubie do regulátora tlaku, ktorý zabezpečuje jeho zníženie a stabilizáciu. Časť palivového systému pred regulátorom je vystavená tlaku zásobníka a za regulátorom dochádza k výraznému zníženiu tlaku na hodnotu približne 80 bar [15], [24]. Snímače tlaku a teploty priebežne monitorujú aktuálne podmienky v palivovom potrubí. V závislosti od požiadaviek motora vstrekovače CNG dávajú palivo do sacieho potrubia.

Následne sa zmes plynu a vzduchu nasáva do spaľovacieho priestoru valca, kde dochádza k jej zapáleniu iskrou zapaľovacej sviečky [23].

Dvojpaliivé vozidlá (Bi-fuel)

Dvojpaliivé vozidlá môžu byť poháňané buď zemným plynom alebo benzínom. Majú dva samostatné palivové systémy, ktoré umožňujú prevádzku nezávisle od seba. Typ motora, ktorý sa používa, je bežný spaľovací benzínový motor. Vodič si môže vybrať, ktoré palivo sa bude spaľovať, jednoduchým prepnutím na palubnej doske. Ktorékoľvek existujúce benzínové vozidlo je možné prerobiť na dvojpaliivé, čiže zabudovať druhý palivový systém na CNG.

Spaľovacie vlastnosti zemného plynu sa výrazne líšia od vlastností bežných kvapalných palív, ako sú benzín a nafta. V porovnaní s benzínom a naftou má CNG nižšiu rýchlosť šírenia plameňa, čo vedie k dlhšiemu času spaľovania. Pri použití rovnakého benzínového motora na CNG sa teda čas spaľovania predlžuje a preto sa vyžaduje väčší predstih zapaľovania [25]. Z tohto dôvodu je na prevádzku konvenčného benzínového motora na CNG nevyhnutná dodatočná úprava. Dvojpaliivé motory sú vo všeobecnosti optimalizované na zemný plyn, pričom časovanie zapaľovania je upravené tak, aby sa prispôbilo pomalšiemu horeniu metánu [15].

Vozidlá s duálnymi motormi (Dual-fuel)

Tieto vozidlá využívajú palivový systém navrhnutý na spaľovanie zemného plynu (CNG), pričom na podporu zapaľovania používajú naftu [24]. Sú založené na technológii vznetrového motora, v ktorom dochádza k samovznieteniu paliva v dôsledku vysokej teploty vo valci.

Vozidlá s duálnym palivovým systémom môžu pracovať buď výlučne na naftu, alebo na zmes zemného plynu a nafty. V tomto prípade sa zmes CNG a vzduchu nasáva do valca a následne sa zapaľuje pomocou pilotnej dávky nafty [15].

Počas voľnobehu duálne motory pracujú prevažne na naftu. So zvyšujúcim sa zaťažením alebo rýchlosťou motora začína CNG postupne nahrádzať naftu – až do úrovne 60 – 90 %. Úplná náhrada nafty zemným plynom však pri vznetrovom motore nie je možná, ako je to v prípade bi-fuel systémov (benzín/CNG). Je to spôsobené veľmi nízkym cetánovým číslom CNG a jeho vysokou teplotou samovznietenia. Činnosť vznetrového motora je podmienená samovznietením paliva v dôsledku kompresie, nie iniciáciou iskrou [15], [23], [24], [26].

V dôsledku vysokej teploty samovznietenia by si CNG vyžadovalo veľmi vysoký kompresný pomer – až približne 38:1. Preto je pri spaľovaní CNG vo vznetrovom motore nevyhnutné pilotné vstrekovanie nafty. Nafta sa vstrekuje priamo do spaľovacieho priestoru na konci kompresného zdvihu, zatiaľ čo CNG sa do motora privádza cez sacie potrubie. Po krátkom oneskorení zapálenia dochádza najprv k spaľovaniu nafty, čo vedie k zapáleniu CNG a následnému šíreniu plameňa [15].

Kľúčovým parametrom pri duálnej prevádzke motora je miera náhrady (substitution rate) – teda percento energetického obsahu paliva, ktoré je nahradené zemným plynom. Táto miera závisí od aktuálneho zaťaženia motora. Moderné duálne motory dokážu dosiahnuť mieru náhrady až 90 %. Miera náhrady pritom ovplyvňuje nielen výkon, ale aj emisie a spotrebu paliva. Vďaka tomu vozidlá s duálnym palivom môžu dosiahnuť až o 30 – 40 % vyššiu účinnosť a zníženie spotreby paliva o približne 25 % [15], [24].

V týchto systémoch je použitý elektricky riadený vstrekovací systém pre CNG spolu so samostatnou elektronickou riadiacou jednotkou (ECU), ktorá kontroluje vstrekovanie a prispôbuje chod motora

aktuálnym podmienkam. Novšie riešenia využívajú aj technológiu vysokotlakového priameho vstrekovania (HPDI), ktorá umožňuje ešte vyšší podiel CNG – až do 95 % náhrady nafty. Tento systém dokáže znížiť emisie CO₂ až o 25 %, pričom výkon motora zostáva porovnateľný s tradičným naftovým pohonom [23].

Skladovanie CNG

Ako vyplýva z názvu, stlačený zemný plyn sa skladuje pri zvýšenom tlaku v špeciálnych tlakových nádržiach, ktoré sú určené výhradne na tento účel. Nielen skladovacie, ale aj prepravné zariadenia musia byť vyrobené z materiálov odolných voči vysokému tlaku a musia spĺňať prísne bezpečnostné normy.

Najbežnejšou metódou skladovania CNG je použitie vysokotlakových zásobníkov. Tieto zásobníky sú konštruované z ocele, hliníka alebo moderných kompozitných materiálov a sú dimenzované na tlak v rozsahu približne 200 – 250 bar. Využívajú sa najmä vo vozidlách poháňaných CNG, ale aj v stacionárnych systémoch, ako sú plniace stanice. Okrem toho existujú aj iné formy skladovania ZP, ktoré sa využívajú v špecifických prípadoch, ako je napríklad podzemné skladovanie umožňujúce uloženie veľkých objemov zemného plynu v prírodných alebo umelo vytvorených podzemných priestoroch, ako sú vyťažené ložiská, ropné polia alebo soľné jaskyne. Tento spôsob je vhodný najmä na sezónne alebo strategické účely. Ďalšou alternatívou je skladovanie plynu priamo v plynovodoch – tzv. „line pack“ – ktoré umožňuje krátkodobé vyrovnávanie výkyvov v distribučnej sieti tým, že sa plyn udržiava v potrubí pod vyšším tlakom [27].

Materiály používané na výrobu zásobníkov na CNG zohrávajú rozhodujúcu úlohu z hľadiska bezpečnosti, hmotnosti aj nákladov. Oceľ je tradičný a osvedčený materiál s vysokou pevnosťou a dobrou dostupnosťou, no jej nevýhodou je vyššia hmotnosť, čo je obmedzujúce najmä pri použití vo vozidlách. Hliník je podstatne ľahší, má dobrú koróznú odolnosť a dostatočnú pevnosť, no kvôli nižšej štrukturálnej pevnosti sú potrebné hrubšie steny zásobníka, čo môže zvyšovať náklady. Najmodernejšou a čoraz viac preferovanou možnosťou sú kompozitné materiály, ktoré kombinujú výstužné vlákna (napr. uhlíkové alebo sklenené) s polymérovou matricou. Tieto materiály dosahujú veľmi dobrý pomer pevnosti k hmotnosti, sú odolné voči korózii a sú schopné odolávať vysokým tlakom [27].

Vo vozidlách sú zásobníky na CNG navrhnuté s ohľadom na priestorové možnosti a celkovú hmotnosť. Najčastejšie majú valcový alebo toroidný tvar, ktorý umožňuje efektívne zabudovanie napríklad do priestoru rezervného kolesa. V súčasnosti sa najviac uplatňujú kompozitné zásobníky typu III a IV. Typ III predstavuje zásobník s hliníkovou vložkou, ktorá zabezpečuje plynosť, pričom celý obal je vystužený kompozitom. Tento typ kombinuje výhody oboch materiálov – je ľahší než oceľový zásobník a zároveň veľmi pevný. Typ IV je ešte ľahší, pretože má plastovú vložku s plným kompozitným opláštením. Je úplne odolný voči korózii, má najnižšiu hmotnosť zo všetkých typov a bežne sa používa v najnovších modeloch osobných aj úžitkových vozidiel [27].

Z pohľadu infraštruktúry možno rozlišovať aj medzi stacionárnym a mobilným skladovaním CNG. V oblasti stacionárneho skladovania sú rozšírené najmä kaskádové skladovacie systémy, ktoré sa používajú na plniacich staniciach. Tie pozostávajú z viacerých tlakových zásobníkov zapojených v sérii, pričom plyn sa odoberá postupne z nádrží s rôznym tlakom tak, aby sa zabezpečila stabilná a efektívna dodávka. Pre skladovanie väčších objemov plynu sú využívané podzemné zásobníky, ako bolo uvedené vyššie [28].

Mobilné skladovanie je riešené pomocou tzv. rúrových prívesov (tube trailers), ktoré sú vybavené sústavou veľkokapacitných tlakových valcov a umožňujú prepravu CNG na dlhé vzdialenosti, najmä do oblastí bez existujúcej infraštruktúry na dopravu plynu. Modernou alternatívou sú tzv. virtuálne plynovody (*virtual pipelines*), ktoré predstavujú modulárny systém na stláčanie, prepravu a dekompresiu CNG pomocou mobilných jednotiek – najčastejšie v podobe kontajnerov umiestnených na nákladných vozidlách, železničných plošinách alebo trajektoch. Tieto systémy sa používajú v regiónoch, kde nie je vybudovaná sieť plynovodov, alebo ako dočasné riešenie pri výpadku dodávok [29].

Plniace stanice na CNG

Keďže stlačený zemný plyn (CNG) slúži predovšetkým ako palivo pre dopravu, jeho efektívne využívanie vyžaduje vybudovanú a dostupnú sieť plniacich staníc pre koncového používateľa. Na rozdiel od bežných čerpacích staníc, kde sa tankujú kvapalné palivá ako benzín alebo nafta, nie sú CNG stanice univerzálne. Výstavba plniacej stanice na CNG – či už pre verejné použitie alebo pre podnikový vozový park – vyžaduje dôkladnú analýzu prevádzkových parametrov, najmä výpočet optimálnej kombinácie tlaku a objemu skladovaného plynu v závislosti od typov vozidiel, ktoré budú plnené [30].

Kľúčovým aspektom pri návrhu stanice je správna voľba veľkosti kompresora a množstva skladovaného paliva. Tieto faktory majú priamy vplyv na celkové náklady na pohonné látky a na dojazd plnených vozidiel [30].

Z hľadiska prevádzky rozlišujeme tri základné typy plniacich systémov CNG: rýchle plnenie (Fast-Fill), pomalé plnenie (Time-Fill) a kombinované plnenie, ktoré integruje oba predchádzajúce spôsoby. Hlavné rozdiely medzi rýchlym a pomalým plnením spočívajú v kapacite skladovania plynu a vo výkone použitého kompresora. Tieto parametre určujú množstvo vydaného paliva a čas potrebný na natankovanie.

Väčšina plniacich staníc je navrhnutá pre jeden z týchto dvoch typov plnenia, avšak kombinované stanice poskytujú vyššiu flexibilitu tým, že umožňujú rýchle aj pomalé dopĺňanie paliva podľa aktuálnych potrieb [23], [30].

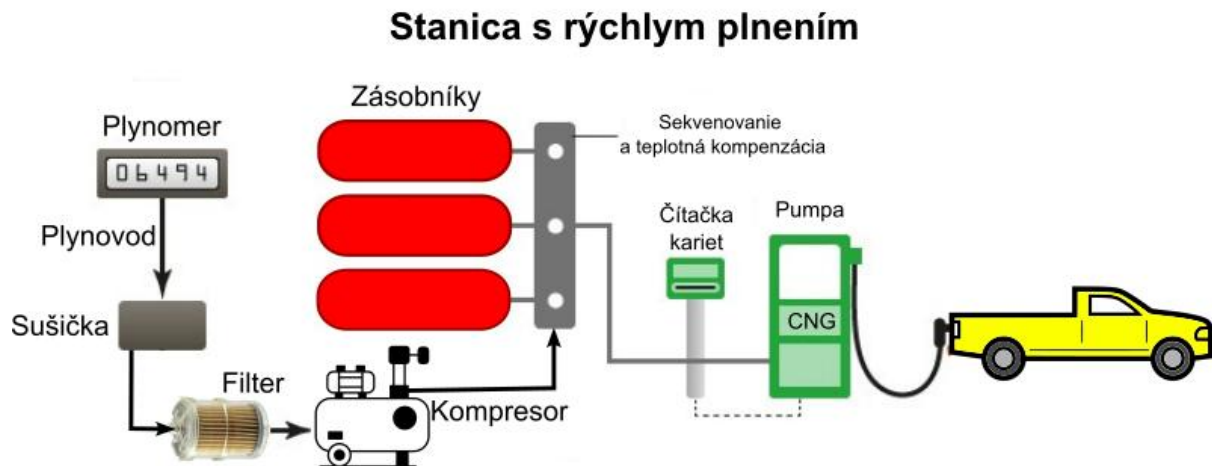
Stanica s rýchlym plnením

Vo všeobecnosti sú plniace stanice s rýchlym plnením najvhodnejšie pre situácie, keď vozidlá prichádzajú postupne a potrebujú rýchlo doplniť palivo (**obrázok 1.3**). Ide najmä o verejné stanice, ktoré fungujú na podobnom princípe ako klasické čerpacie stanice pre kvapalné palivá, ako sú benzín alebo nafta. Tento typ staníc je však rovnako vhodný aj pre väčšie firemné alebo komunálne vozové parky.

Z hľadiska technologického usporiadania sa však stanice na rýchle plnenie CNG výrazne líšia od staníc pre kvapalné palivá. Väčšina verejných plniacich staníc na CNG využíva práve systém rýchleho plnenia [30].

Stanice s rýchlym plnením umožňujú doplnenie paliva za približne rovnaký čas, ako je to pri tankovaní nafty alebo benzínu. Aj preto sú bežne využívané vo verejnom sektore, ale aj v autobusových depách – často v kombinácii so systémom pomalého plnenia pre nočné dopĺňanie vozidiel.

Technologicky sú tieto stanice napojené na miestny rozvod zemného plynu s nízkym tlakom (menej ako 4 bar) alebo so stredným tlakom (do približne 16 bar). Plyn sa na mieste stláča pomocou jedného alebo viacerých kompresorov na požadovaný vysoký tlak, ktorý zodpovedá tlaku v palivovej nádrži vozidla. Po stlačení sa CNG skladuje v sérii vysokotlakových zásobníkov s objemom spravidla od 50 litrov až po viac ako 100 litrov, čo umožňuje jeho okamžité čerpanie do vozidiel bez zdržania [30]. Skladovací systém sa udržiava na vyššom tlaku než je tlak v nádrži vozidla, aby sa plyn mohol do nádrže dopĺňať prirodzene na základe tlakového rozdielu [28].



Obrázok 1.3 Stanica s rýchlym plnením CNG [30].

Systémy rýchleho plnenia využívajú zásobníky CNG usporiadané v kaskáde, alebo ako vyrovnávací systém, ktorý zabezpečuje, že je k dispozícii dostatočné množstvo stlačeného plynu na okamžité plnenie vozidiel.

Aby bolo možné rýchle plnenie, musí byť CNG skladovaný pri výrazne vyššom tlaku – typicky od 250 do 350 bar, v závislosti od stupňa naplnenia jednotlivých zásobníkov. Keďže doplňovanie paliva prebieha na základe rozdielu tlaku medzi zásobníkmi a nádržou vozidla, plyn sa počas plnenia prepína medzi zásobníkmi – od najvyššieho tlaku k najnižšiemu – aby sa zabezpečil plynulý a efektívny tok paliva [23].

Na CNG stanici je možné použiť dva typy skladovacích systémov – vyrovnávací a kaskádový skladovací systém.

I. Vyrovnávací skladovací systém

Vyrovnávací zásobník pracuje v tlakovom rozsahu približne 200 až 250 bar. V tomto systéme sú všetky zásobníky plniacej stanice prepojené a udržiavané na rovnakom tlaku počas celej prevádzky [28]. Výhodou tohto systému je jednoduchosť, avšak neumožňuje také efektívne využitie skladovacej kapacity ako kaskádový systém.

II. Kaskádový skladovací systém

Kaskádový skladovací systém je zvyčajne rozdelený na tri úrovne zásobníkov, ktoré sa označujú ako nízkotlakové, strednotlakové a vysokotlakové. Každá úroveň pozostáva z viacerých veľkokapacitných tlakových fliaš (valcov), zoradených podľa vzostupného tlaku [30].

Počas rýchleho plnenia sa nádrž vozidla najskôr pripojí k nízkotlakovému zásobníku. Ako sa tlak v zásobníku znižuje a tlak v nádrži vozidla zvyšuje, prietok plynu postupne klesá. Keď prietok dosiahne vopred stanovenú hodnotu, systém sa automaticky prepne na strednotlakový zásobník, a následne na vysokotlakový zásobník, aby sa plnenie dokončilo.

Tento postup umožňuje efektívnejšie a úplnejšie naplnenie vozidla v porovnaní s použitím jedného vyrovnávacieho zásobníka udržiavaného na konštantnom tlaku. Kaskádový systém zároveň zabezpečuje optimálne využitie kompresora a skladovacích kapacít.

Po ukončení plnenia sa kompresor automaticky spustí a začne doplňovať zásobníky v opačnom poradí – najprv vysokotlakový, potom strednotlakový a nakoniec nízkotlakový zásobník. Vďaka tomu je vysokotlakový zásobník neustále udržiavaný na maximálnom tlaku, čo zabezpečuje, že stanica je vždy pripravená na plnenie ďalších vozidiel s maximálnou možnou dodávkou plynu.

Správna špecifikácia kapacity kompresora a objemu zásobníkov v kaskáde je kľúčová na to, aby stanica CNG spoľahlivo zvládala typ vozidiel (napr. osobné autá, autobusy, nákladné vozidlá) a frekvenciu ich plnenia, najmä počas špičkových období [28].

Plniace stanice na pomalé plnenie

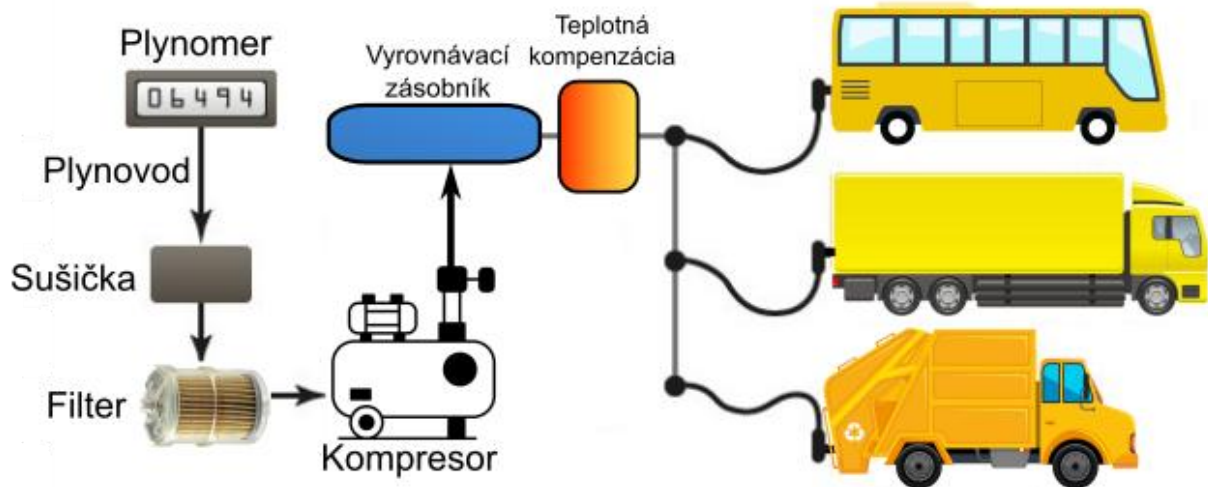
Plniace stanice na pomalé plnenie sa využívajú predovšetkým pre menšie firemné vozové parky a najlepšie fungujú pri vozidlách s väčšími nádržami, ktoré sa tankujú počas noci na centrálnom mieste – napríklad nákladné vozidlá, vozidlá na zber komunálneho odpadu alebo autobusy mestskej dopravy (**obrázok 1.4**).

Na týchto staniach dodáva palivové potrubie zemný plyn z distribučnej siete pod nízkym tlakom priamo do kompresora umiestneného na mieste [30].

Na rozdiel od rýchlych plniacich staníc sa vozidlá v tomto prípade neplnia z vysokotlakových zásobníkov, ale priamo z kompresora. Plnenie teda prebieha pomaly a trvá niekoľko hodín – typicky počas nočného státia vozidiel. Veľkosť potrebného kompresora závisí od počtu vozidiel, ktoré sa majú v danom čase naplniť.

Hoci je na stanici malá vyrovnávacia zásobníková nádrž, jej primárnou úlohou nie je plniť vozidlá, ale slúži na stabilizáciu chodu kompresora. Pomáha tak predchádzať častému zapínaniu a vypínaniu kompresora, čím sa šetri elektrická energia a zvyšuje životnosť zariadenia. V niektorých prípadoch sa táto zásobníková nádrž využíva aj na doplnenie nádrží vozidiel počas dňa [30].

Stanica s pomalým plnením



Obrázok 1.4 Stanica s pomalým plnením CNG [30].

Čas potrebný na naplnenie nádrže vozidla závisí od počtu vozidiel, veľkosti kompresora a objemu vyrovnávacej zásobníkovej nádrže. Naplnenie vozidiel môže trvať od niekoľkých minút až po niekoľko hodín. Výhodou staníc na pomalé plnenie je nižšie kompresné teplo, čo vedie k dôkladnejšiemu naplneniu nádrže v porovnaní so stanicami s rýchlym plnením. Ďalšou výhodou je možnosť plánovať plnenie vozidiel mimo špičky, napríklad v noci, keď sú ceny elektriny nižšie, čo umožňuje lacnejšiu prevádzku vozového parku.

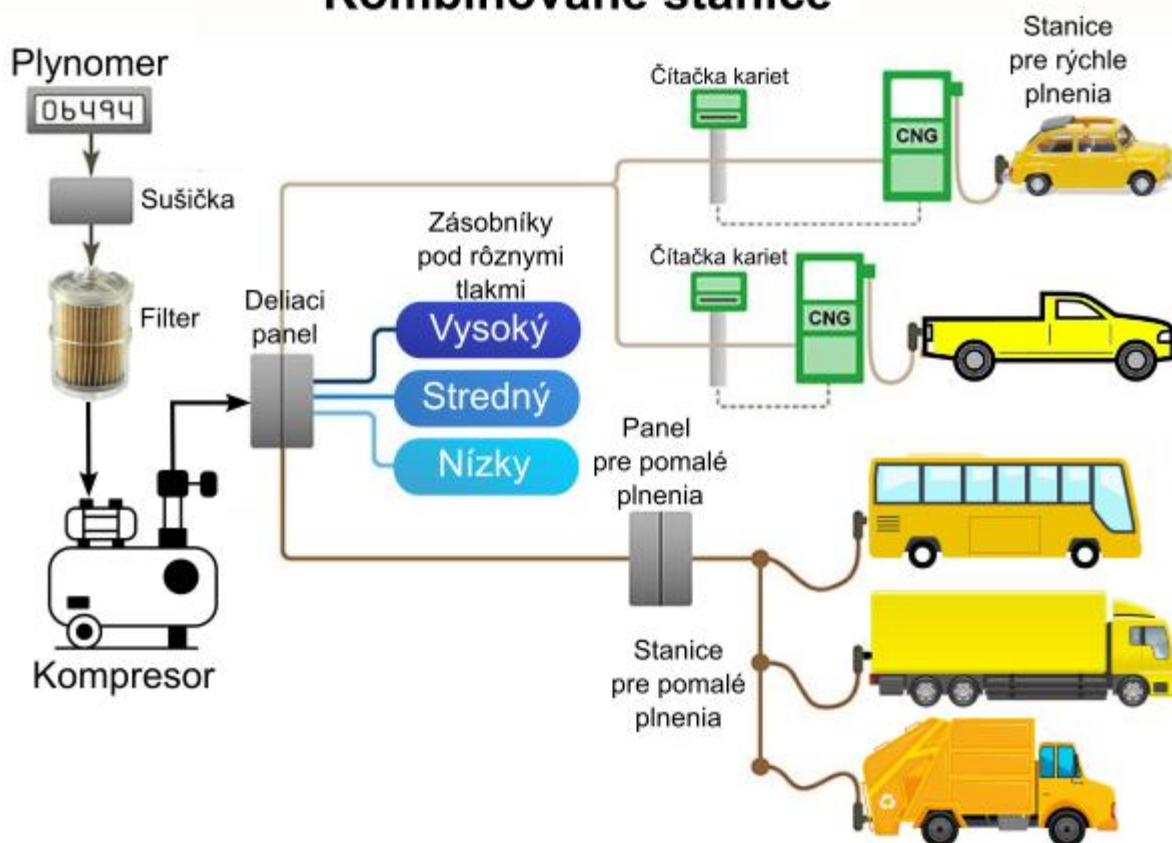
Plniace stanice na pomalé plnenie sa navrhujú starostlivo podľa zamýšľaného použitia. Napríklad spoločnosť poskytujúca autobusovú dopravu môže potrebovať väčší kompresor s výkonom 30 až 35 litrov za minútu, zatiaľ čo firma zaoberajúca sa odvozom odpadu si vystačí s kompresorom na plnenie s výkonom približne 600 litrov za hodinu. Využitie pre bežných spotrebiteľov môže vyžadovať ešte menší výkon, napríklad menej ako 3 litre za hodinu. Tieto rozdiely vysvetľujú značnú variabilitu nákladov na inštaláciu plniacich staníc, či už pre verejnosť alebo pre podnikové vozové parky [30].

Kombinácia oboch typov plniacich staníc

Kombinované plniace stanice zahŕňajú komponenty rýchleho aj pomalého plnenia v jednom systéme. Vozidlá pripojené na pomalé plnenie sa plnia priamo z kompresora, zvyčajne počas noci. Vozidlá pri rýchlo plniacich stojanoch sa plnia zo zásobníkov. Táto konštrukcia poskytuje flexibilitu pre vozový park (obrázok 1.5).

Výstavba kombinovaných plniacich staníc je zvyčajne drahšia ako výstavba predchádzajúcich dvoch typov staníc. Kombinovaná plniaca stanica môže byť aj zdrojom príjmov, ak sú stojany na rýchle plnenie sprístupnené verejnosti [30].

Kombinované stanice



Obrázok 1.5 Stanica s kombinovaným plnením CNG [30].

2

Fyzikálnochemické vlastnosti CNG v porovnaní s bežne dostupnými pohonnými hmotami

Zloženie a fyzikálnochemické vlastnosti zemného plynu

Zemný plyn je všeobecný názov pre zmes plynných uhľovodíkov a nízko vrúcich kvapalných uhľovodíkov (uhľovodíkov, ktorých teplota varu je tak nízka, že za bežného atmosférického tlaku sú pri teplote okolia v plynnom skupenstve) [12]. Z chemického hľadiska je zemný plyn komplexná zmes uhľovodíkových a neuhľovodíkových zložiek, avšak v porovnaní s ropou a inými fosílnymi zdrojmi je jeho zloženie výrazne jednoduchšie.

Zloženie zemného plynu závisí od jeho zdroja, teda od náleziska a vrtu. Dokonca aj dva vrty ťažiacie z toho istého ložiska môžu produkovať plyny rôzneho zloženia, keď sa zásoby ložiska vyčerpávajú. Hlavným komponentom zemného plynu je predovšetkým metán (CH_4), ktorého zastúpenie sa pohybuje od 85 obj. % a viac, pričom niektoré zemné plyny môžu obsahovať až vyše 95 obj. % metánu. Okrem toho môže zemný plyn obsahovať rôzne množstvá etánu, propánu, butánu, ako aj stopy hexánu a ťažších uhľovodíkov (uhľovodíkov s vyšším počtom uhlíkov v reťazci a vyššou molekulovou hmotnosťou) [31]. Percentuálne zastúpenie (zobrazené v **tabuľke 2.1**) týchto minoritných zložiek sa líši v závislosti od zdroja zemného plynu.

Tabuľka 2.1 Zastúpenie jednotlivých zložiek v zemnom plyne [12].

Zložka	Vzorec	Obj. %
Metán	CH_4	> 85
Etán	C_2H_6	3 – 8
Propán	C_3H_8	1 – 5
n-Bután	C_4H_{10}	1 – 2
i-Bután	C_4H_{10}	< 0,3
n-Pentán	C_5H_{12}	1 – 5
i-Pentán	C_5H_{12}	< 0,4
Hexán, heptán, oktán ^a	$\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$	< 2
Oxid uhličitý	CO_2	1 – 2
Sulfán	H_2S	1 – 2
Kyslík	O_2	< 0,1
Dusík	N_2	1 – 5
Hélium	He	< 0,5

^aHexán (C_6H_{14}) a vyššie uhľovodíky až po oktán (C_8H_{18}), benzén (C_6H_6) a toluén ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$).

Okrem uhľovodíkových zložiek môže zemný plyn obsahovať aj zložky neuhľovodíkového pôvodu, medzi ktoré patria dusík, oxid uhličitý a sulfán (staršie pomenovanie sírovodík, H_2S). Prítomné môžu byť aj

ďalšie zlúčeniny síry, ako sú merkaptány a sírouhlík. V stopových množstvách môžu byť prítomné aj kovové látky vrátane arzenu, selénu, ortuti a uránu.

Zemný plyn sa prevažne nachádza v prítomnosti ložísk ropy a poloha jeho ložiska priamo ovplyvňuje zastúpenie jednotlivých zložiek v zemnom plyne [23].

Podľa podielu uhľovodíkov ťažších ako metán je možné zemný plyn rozdeliť na suchý, mokrý a plynový kondenzát. Zemný plyn sa považuje za suchý, ak ide o takmer čistý metán, z ktorého bola odstránená väčšina ostatných bežne sa vyskytujúcich uhľovodíkov. Ak sú prítomné aj iné uhľovodíky, zemný plyn sa označuje ako mokrý [23]. Hodnotí sa to koeficientom suchosti, ktorý zohľadňuje obsah metánu v porovnaní s ostatnými zložkami zemného plynu, predovšetkým ťažšími uhľovodíkmi a nečistotami. Za suchý plyn sa považuje zväčša plyn s koeficientom suchosti viac ako 0,95, čo znamená, že obsah metánu v zemnom plyne je viac ako 95 %. Pri mokrom plyne je koeficient suchosti menší ako 0,95, čiže obsah metánu je nižší ako 95 % [32].

V prípade plynového kondenzátu ide o zemný plyn s vysokým obsahom kvapalných uhľovodíkov (uhľovodíky s vyšším počtom atómov uhlíka v reťazci), ktoré počas ťažby, alebo procesu vyčerpávania z ložiska, tvoria kvapalnú zmes [31].

Okrem toho je možné zemný plyn deliť aj na základe obsahu kyslých zložiek (oxidu uhličitého a sulfánu) na „sladký“ a „kyslý“ [33]. Vo všeobecnosti sa za sladký plyn považuje plyn, ktorý obsahuje menej ako 4 ppm sulfánu [31].

Fyzikálnochemické vlastnosti CNG

Zloženie a vlastnosti CNG závisia predovšetkým od zloženia, vlastností a pôvodu zemného plynu [24]. CNG zaberá približne len 1 % objemu, ktorý by plyn zaberol pri atmosférickom tlaku [23], [34]. Ako už bolo detailnejšie spomenuté v kapitole o skladovaní CNG, skladuje a distribuuje sa v tlakových nádobách valcového alebo guľového tvaru [43].

Na porovnanie, v bežných potrubíach, ktorými sa transportuje zemný plyn, sa tlak pohybuje od 4 do 40 bar, v závislosti od toho, či sa jedná o nízko-, stredno- alebo vysokotlakové potrubie [30], [34].

CNG je tvorený predovšetkým stlačeným plynným metánom (CH_4) s prímiesou vyšších plynných alkánov. Má nízku priemernú molárnu hmotnosť ($\sim 16,5 \text{ g.mol}^{-1}$) a nízku hustotu ($\sim 0,68 - 0,72 \text{ kg.m}^{-3}$). Objemová výhrevnosť CNG pri 250 bar je približne 9 MJ.l^{-1} [35], čo je podstatne menej, než u kvapalných palív, napr. v porovnaní s benzínom ($\sim 32 \text{ MJ.dm}^{-3}$) alebo naftou ($\sim 36 \text{ MJ.dm}^{-3}$) [19]. Výraznou výhodou CNG je jeho vysoké oktánové číslo (120 – 130 RON) [20], ktoré zabezpečuje vysokú odolnosť proti detonačnému spaľovaniu a umožňuje efektívne spaľovanie v motoroch s vyšším kompresným pomerom.

Ako už bolo spomenuté v kapitole 1, benzín je zmes kvapalných uhľovodíkov s približne 5 až 11 atómami uhlíka v molekule. Má hustotu v intervale $720 - 775 \text{ kg.m}^{-3}$ (**tabuľka 1.1**). Oktánové číslo benzínu sa pohybuje v závislosti od konkrétneho typu medzi minimálne 91 až 98 RON (Research Octane Number – oktánové číslo stanovené výskumnou metódou), čo umožňuje jeho široké využitie v osobných automobiloch s benzínovými spaľovacími motormi. Benzínové motory sú známe svojou pružnosťou, rýchlou reakciou a relatívne nízkou hlučnosťou. V roku 2023 predstavoval benzín s 95 RON najväčší podiel (až 95 %) z celkového množstva predaného benzínu v krajinách EÚ [36].

Keď chceme porovnať fyzikálnochemické vlastnosti CNG a motorovej nafty, dôležité je pripomenúť už spomenuté údaje, že motorovú naftu tvoria uhľovodíky s dlhším reťazcom (približne 12 – 20 atómov uhlíka), má vyššiu hustotu (820 – 845 kg.m⁻³) a vyššiu výhrevnosť (**tabuľka 1.1**). Nafta je charakterizovaná cetánovým číslom, ktoré kvantifikuje jej schopnosť samovznietenia (typická hodnota ≥ 51) [12]. Naftové motory využívajú samovznietenie paliva, čo im umožňuje dosahovať vyššiu účinnosť a krútiaci moment v porovnaní s benzínovými motormi. Preto sú naftové motory často používané v nákladnej doprave a autobusoch.

Fyzikálnochemické vlastnosti LNG

CNG (stlačený zemný plyn) je často zamieňaný s LNG (skvapalnený zemný plyn). Hlavný rozdiel spočíva v tom, že CNG sa skladuje v plynnom skupenstve pri teplote okolia a vysokom tlaku, zatiaľ čo LNG sa skladuje pri nízkych teplotách (cca -162 °C) v kvapalnom skupenstve a atmosférickom alebo mierne zvýšenom tlaku. V **tabuľke 2.2** je zhrnuté porovnanie základných vlastností CNG a LNG.

V prípade LNG je objem skvapalneného plynu zredukovaný približne 600-násobne oproti zemnému plynu v plynnom skupenstve a atmosférickom tlaku [37].

Tabuľka 2.2 Rozdiely medzi CNG a LNG [4].

Vlastnosť	CNG	LNG
Skupenstvo	plynné	kvapalné
Tlak	200 - 250 bar	1 bar
Teplota	30 – 40 °C	- 162 °C
Výroba	separácia vody, kompresia	predúprava, skvapalnenie, skladovanie
Načerpanie / odčerpanie	plyn pod tlakom	kvapalina
Kompresný pomer	~ 250 – 350 : 1	~ 600 : 1
Pomer priemeru a hrúbky steny zásobníka	~ 25 až 60	~ 1 000
Materiál	jemnozrnná normalizovaná oceľ C-Mn plast vystužený vláknami	hliník, nerezová oceľ, Ni-ocel

LNG je vhodný na transport zemného plynu na veľké vzdialenosti, napríklad loďou medzi kontinentmi, a následne je prevedený na plynnú formu (regazifikácia) pred distribúciou k odberateľom. LNG môže byť taktiež využívaný na pohon automobila, hoci oveľa bežnejšie sú vozidlá poháňané stlačeným zemným plynom. Relatívne vysoké náklady na výrobu LNG a potreba skladovania kvapaliny v drahých kryogénnych nádržiach sú ďalšími dôvodmi obmedzeného využitia LNG v bežnej doprave [12], [31]. Na druhej strane, vozidlá používajúce LNG, môžu uskladniť väčšie množstvo paliva, pretože LNG je skladované v kvapalnom stave, čo zvyšuje jeho energetickú hustotu v porovnaní s CNG. Vďaka tomu je LNG vhodnejšie pre nákladné vozidlá, ktoré potrebujú väčší dojazd [24].

Kritériá kvality CNG

Tak ako všetky palivá používané v automobilovom priemysle, aj CNG musí spĺňať určité normy a technické požiadavky. Tieto sa týkajú najmä spaľovacích vlastností paliva, ktoré ovplyvňujú chod motora, jeho výkon a množstvo produkovaných emisií.

Vlastnosti CNG sú priamo podmienené jeho chemickým zložením, predovšetkým obsahom metánu a prítomnosťou nečistôt. Z tohto dôvodu technické normy v jednotlivých krajinách špecifikujú minimálne a maximálne limity pre rôzne parametre, ktoré musí CNG ako palivo spĺňať, aby bolo vhodné na použitie v spaľovacích motoroch.

Normy zároveň presne definujú, akými metódami sa majú jednotlivé vlastnosti CNG testovať, pričom testovacie metódy stanovujú prísne podmienky merania, ktoré zabezpečujú spoľahlivosť a porovnateľnosť výsledkov.

Dodržiavaním týchto požiadaviek sa zabezpečuje konzistentná kvalita paliva pre konečného používateľa. Každé CNG palivo, ktoré je uvádzané na trh a distribuované spotrebiteľovi (napr. majiteľovi vozidla), musí spĺňať tieto predpísané normy. Distribútor týmto preberá zodpovednosť za to, že dodávané palivo je v súlade s platnou legislatívou a technickými požiadavkami.

Výhrevnosť paliva

Výhrevnosť vyjadruje množstvo tepla uvoľneného z paliva úplným spálením jednotkového množstva paliva stechiometrickým množstvom kyslíka alebo vzduchu v adiabatických podmienkach pri štandardnom tlaku za predpokladu, že sa výsledné produkty spaľovania ochladia na teplotu, akú mali pred spálením, ale vodná para obsiahnutá v spalinách zostane v plynnom stave. Výhrevnosť je jednou zo základných vlastností, ktorá sa používa na posúdenie energetického obsahu jednotlivých palív. Nezahŕňa však kondenzačné teplo vodnej pary vznikajúcej počas spaľovania [38]. Výhrevnosť stlačeného zemného plynu (CNG) sa zväčša pohybuje v rozmedzí od 45 do 50 MJ.kg⁻¹ (**tabuľka 1.1**). Hodnotu výhrevnosti ovplyvňuje predovšetkým zloženie zemného plynu [39].

Minimálna požadovaná výhrevnosť CNG sa líši v závislosti od triedy plynu. V niektorých európskych krajinách, napríklad v Nemecku, je plynné palivo dostupné v dvoch kategóriách – H a L, čo sa vzťahuje priamo na jeho energetický obsah. Označenie H znamená „high-calorific“ (vysoko výhrevný plyn) a L „low-calorific“ (nízko výhrevný plyn).

Energetický obsah H-plynu je približne o 20 % vyšší ako pri L-plyne. V prepočte na ekvivalent bežných palív zodpovedá 1 kg H-plynu približne 1,5 litra benzínu alebo 1,3 litra nafty [40].

Minimálne požadované hodnoty výhrevnosti sú nasledovné:

- pre **H-CNG: 46 MJ.kg⁻¹**,
- pre **L-CNG: 39 MJ.kg⁻¹**,

pričom maximálna hodnota výhrevnosti nie je štandardom definovaná [23].

Je však dôležité rozlišovať medzi označením H-CNG (vysoko výhrevný CNG) a HCNG (Hydrogen-enriched Compressed Natural Gas, niekedy aj H₂CNG).

- **H-CNG** označuje **klasický zemný plyn s vyššou výhrevnosťou**, teda s vyšším podielom metánu.
- **HCNG/H₂CNG** je zmes **zemného plynu obohateného o vodík**, pričom podiel vodíka v palive sa pohybuje v rozmedzí **8 až 50 obj. %** [41]

Metánové číslo (MN)

Na hodnotenie odolnosti zemného plynu voči detonácii pri jeho spaľovaní v motore bola zavedená nová stupnica – tzv. metánové číslo (MN, z angl. Methane Number). Tento parameter vyjadruje odolnosť zemného plynu voči samovznieteniu, keď sa používa ako motorové palivo a je ekvivalentom oktánového čísla, ktoré sa bežne používa ako charakteristika benzínu [23], [42], [43]. Na stupnici metánového čísla má čistý metán hodnotu 100 a čistý vodík hodnotu 0. Zemný plyn s metánovým číslom napríklad 80 má rovnakú odolnosť voči samovznieteniu ako zmes 80 % obj. metánu a 20 % obj. vodíka [42].

Najviac používané automobilové benzíny majú oktánové číslo v rozmedzí ≥ 95 až ≥ 98 RON. Vďaka vysokej fyzikálno-chemickej stabilite CNG má CNG výrazne vyššie oktánové číslo, približne 120 – 130 RON, čo znamená, že jeho odolnosť voči samovznieteniu je vyššia ako pri bežnom benzíne [23].

Oktánové číslo je definované na umelej stupnici, kde: 0 prislúcha lineárnemu heptánu – látke s minimálnou odolnosťou voči samovznieteniu (prakticky okamžité samovznietenie) a hodnota 100 je priradená izo-oktánu (2,2,4-trimetylpentánu), ktorý je rozvetvený uhľovodík s vysokou odolnosťou voči samovznieteniu, ktorý sa v spaľovacom motore vznieti po iniciácii iskrou [26].

Zemný plyn, rovnako ako CNG, obsahuje predovšetkým metán, ale aj iné uhľovodíky (napr. etán, propán, bután). Čím vyšší je podiel týchto ťažších zložiek, tým je metánové číslo nižšie a odolnosť voči samovznieteniu nižšia.

Naopak, prítomnosť dusíka v CNG zvyšuje odolnosť voči samovznieteniu, a tým aj metánové číslo.

- Bežne dostupné CNG má metánové číslo v rozmedzí **69 – 99** [23].
- Metánové číslo výrazne klesá pri zvyšovaní obsahu vodíka v zmesi [44].

Palivo s nízkym metánovým číslom – čo je spôsobené najmä vyšším obsahom etánu, propánu a ďalších ťažších uhľovodíkov – môže spôsobovať problémy s chodom motora, ako je tzv. klepanie motora (detonácia, predzápal). Minimálne požadované metánové číslo pre CNG ako motorové palivo býva **70 až 75**.

Obsah síry a jej zlúčenín

Rovnako ako pri iných palivách používaných v spaľovacích motoroch, je obsah sírnych zlúčenín (vyjadrený ako obsah síry), jedným z prísne sledovaných parametrov. Prítomnosť sírnych zlúčenín je limitovaná, aby sa zabránilo kontaminácii systému úpravy výfukových plynov, ktoré sú inštalované v automobiloch na zabezpečenie splnenia emisných noriem pri spaľovacích motoroch [45]. Odporúčaný maximálny obsah síry je 10 ppm [23].

Obsah sírnych zlúčenín v zemnom plyne závisí predovšetkým od ich prítomnosti v ložisku, a teda od typu a miesta ťažby zemného plynu. Okrem toho distribučné systémy zemného plynu zvyčajne vyžadujú

pridanie odorantu, ktorý pomáha pri detekcii únikov zemného plynu. Zemný plyn, ani z neho vyrobený CNG, totiž nemajú charakteristický zápach, a preto by bolo ťažké odhaliť ich únik. Z tohto dôvodu sa do plynu pridávajú odoranty, ktoré majú charakteristický zápach – tento zápach je pre mnohých ľudí synonymom zápachu plynu a umožňuje jednoduchú detekciu únikov. Tieto látky sú väčšinou zlúčeninami síry [46].

Nevyhnutné je kontrolovať celkový obsah síry v zemnom plyne po odorizácii [45]. Okrem celkovej síry sa sleduje aj prítomnosť sulfánu (H_2S), ktorého obsah je limitovaný na maximálne 6 ppm [23]. Maximálny obsah sulfánu je predpísaný nielen kvôli tvorbe oxidov síry počas spaľovania, ale aj preto, že sulfán môže poškodiť komponenty spaľovacieho motora. Sledovaný je tiež obsah merkaptánov, ktorých maximálny povolený obsah v CNG je do 5 ppm [23], [46].

Obsah vody

Voda v zemnom plyne patrí medzi neželané zložky, ktorých obsah je nevyhnutné sledovať a dodržiavať v stanovených medziach, pretože má priamy vplyv na obsah vody v CNG ako palive. Počas výroby, prepravy a spracovania zemného plynu môže prítomnosť vlhkosti spôsobiť viaceré problémy.

Voda sa v zemnom plyne môže nachádzať v rôznych formách – vo forme pár, kvapalnej vody, plynových hydrátov alebo ľadu [47]. Pri znížení teploty (alebo zvýšení tlaku) sa riziko problémov s vlhkosťou zvyšuje, najmä v dôsledku možného vzniku ľadu alebo hydrátov metánu [33].

Zemný plyn okrem toho často obsahuje aj tzv. kyslé plyny (napr. sulfán, oxid uhličitý), ktoré pri kontakte s vodou môžu spôsobovať koróziu zariadení. Korózia je nežiaduci jav, ktorý môže poškodiť nielen prepravné zariadenia, kompresory a potrubia, ale aj skladovacie systémy a v neposlednom rade aj motorové časti vozidiel.

Aby sa predišlo týmto komplikáciám – najmä korózii – voda sa zo zemného plynu odstraňuje pomocou dehydratačných zariadení. Povolený obsah vlhkosti v zemnom plyne zvyčajne nepresahuje 40 mg.kg^{-1} (4 ppm) [23]. Na presné stanovenie obsahu vody v CNG sa používa meranie rosného bodu vody [44].

Wobbého index (WI)

Wobbého index je ďalším dôležitým parametrom pri hodnotení palív v plynnom skupenstve, pretože charakterizuje ich energetický obsah. Je definovaný ako podiel spaľovacieho tepla Q_s a druhej odmocniny z relatívnej hustoty h plyného paliva: $WI = Q_s / \sqrt{h}$.

Wobbého index je najstarší a najčastejšie používaný spôsob vyjadrenia zameniteľnosti podobných vykurovacích plynov, a to vzhľadom na zachovanie stabilných podmienok fungovania horáka a konštantného tepelného príkonu. Podmienkou zameniteľnosti je rovnosť, prípadne len malý rozdiel vo Wobbého indexoch porovnávaných plynov.

So zvyšujúcou sa koncentráciou uhľovodíkov s vyššou hustotou (napr. etán, propán, bután) dochádza k viditeľnému zvýšeniu energetického obsahu na objemovej báze, čo je dôsledkom zvýšenia celkovej hustoty plynu. Naopak, vyšší obsah inertných plynov, ako sú dusík a oxid uhličitý, vedie síce k zvýšeniu hustoty plynu, ale zároveň k zníženiu jeho energetického obsahu.

Pomocou Wobbého indexu je možné porovnávať objemový energetický obsah rôznych plyných palív pri rôznych teplotách [48].

Mazacie oleje z kompresora

Hlavnou súčasťou každej CNG stanice je piestový kompresor, ktorého úlohou je stlačiť zemný plyn z prepravného tlaku na výrazne vyššiu hodnotu – zvyčajne cca 200 – 250 bar. Vzhľadom na vysokú zmenu tlaku nestačí použiť len jeden kompresor. Požadované zvýšenie tlaku sa dosahuje pomocou viacstupňového kompresora troj- alebo štvorstupňového [49].

Pri prúde plynu cez valce kompresora existuje vysoká pravdepodobnosť, že komprimovaný plyn so sebou strhne aj malé množstvo mazacieho oleja, ktorý zabezpečuje plynulý chod zariadenia. Tento strhnutý olej môže v niektorých prípadoch spôsobovať neželané účinky — nielen pri skladovaní CNG, ale aj počas jeho prepravy a následného použitia v spaľovacom motore.

Prítomnosť mazacieho oleja často súvisí s aglomeráciou (zskupovaním) pevných častíc v prúde plynu, čím vznikajú väčšie zvyšky (nečistoty). Tie sa usadzujú a znečisťujú transportné zariadenia, ako aj komponenty motora. Usadzovaniu nečistôt v motore treba predchádzať kvôli bezpečnosti prevádzky motora a účinnosti spaľovania CNG.

3

Výhody a nevýhody použitia CNG v porovnaní s inými fosílnymi palivami

CNG v porovnaní s LPG

CNG a LPG sú palivá, ktoré sú bežnou verejnosťou často zamieňané, pričom rozdiely medzi nimi nie sú všeobecne známe. Líšia sa však vo viacerých aspektoch – od fyzikálno-chemických vlastností a chemického zloženia až po spôsob použitia ako motorového paliva. Vlastnosti oboch palív už boli podrobnejšie popísané v kapitole 1 (**tabuľky 1.1 a 1.2**).

LPG pochádza najmä z ropných a plynových vrstov. Neťažší sa však ako hotové palivo, ale vzniká ako vedľajší produkt pri dvoch hlavných procesoch: spracovaní zemného plynu a spracovaní ropy. Približne 60 % LPG pochádza zo spracovania zemného plynu a 40 % z rafinácie ropy a jej frakcií [50].

Keďže teplota varu LPG je nižšia ako teplota okolia, pri bežných podmienkach sa rýchlo odparuje. Z tohto dôvodu sa LPG skladuje v kvapalnom skupenstve v tlakových oceľových nádobách (pri cca 6 až 12 bar), aby sa zmenšil objem zásobníka.

Jednou z dôležitých vlastností pri porovnaní LPG a CNG je ich výhrevnosť. LPG odparený pri atmosférickom tlaku, má objemovú výhrevnosť približne 94 MJ.m^{-3} ($26,1 \text{ kWh.m}^{-3}$), zatiaľ čo CNG po znížení tlaku na hodnotu atmosférického tlaku, má objemovú výhrevnosť približne 35 MJ.m^{-3} ($9,8 \text{ kWh.m}^{-3}$). LPG tak pri spaľovaní produkuje väčšie množstvo energie na rovnaké množstvo paliva v porovnaní s CNG.

Z hľadiska oktánového čísla, ktoré – ako už bolo vyššie spomenuté – predstavuje odolnosť voči samovznieteniu, má LPG o niečo nižšie oktánové číslo, a to približne 110 v porovnaní s CNG (120 až 130 RON v závislosti od zloženia, **tabuľka 1.1**) [51].

CNG je ľahší ako vzduch, čo znamená, že v prípade úniku sa rýchlo rozptýli do atmosféry, čím sa znižuje riziko požiaru a výbuchu. Naopak, LPG je ťažší ako vzduch a má tendenciu v prípade úniku hromadiť sa pri zemi alebo v nízko položených priestoroch, čím sa zvyšuje potenciál jeho vznietenia a vzniku nebezpečného požiaru [52]. V dôsledku týchto vlastností sa pri úniku zle odvetráva, napríklad pri parkovaní v uzavretých priestoroch, a preto je vjazd vozidlám poháňaným LPG do podzemných garáží často zakázaný.

CNG v porovnaní s benzínom a naftou

Z hľadiska environmentálnych dopadov má CNG významné výhody. Spaľovanie CNG produkuje menej CO_2 , NO_x , pevných častíc a iných škodlivých emisií v porovnaní s benzínom a naftou [13]. To je dôležité pre znižovanie negatívneho vplyvu dopravy na ovzdušie, najmä v mestských oblastiach. Naopak, CNG má nižšiu objemovú energetickú hustotu, čoho dôsledkom je menší dojazd vozidiel, resp. potreba väčších nádrží alebo nádrží s vyšším maximálnym tlakom. To zvyšuje nároky na priestor alebo hmotnosť vozidla.

Medzi ďalšie výhody CNG patrí aj nižšia cena paliva v mnohých krajinách a nižšie náklady na údržbu motorov, pretože spaľovanie CNG je čistejšie a menej zaťažuje spaľovací systém [15]. Nevýhodou sú však náklady na vybudovanie infraštruktúry, ako sú plniace stanice a nádrže, ktoré sú stále menej rozšírené ako čerpacie stanice s benzínom a naftou. Okrem toho, adaptácia vozidiel na CNG môže byť finančne náročná, a nie všetky vozidlá sú technicky vhodné na prevádzku na CNG.

Benzín aj nafta sú naopak dostupnejšie a široko využívané, majú lepšiu výhrevnosť a umožňujú dlhšie trasy bez nutnosti častého tankovania. Naftové motory navyše ponúkajú lepší krútiaci moment a spotrebu, čo je dôležité najmä pre ťažkú dopravu. Na druhej strane sú však spojené s vyššími emisiami škodlivín a znečisťovaním životného prostredia.

Porovnanie motorov na CNG s motormi na konvenčné palivá

Tepelná účinnosť/kompresný pomer

Tepelná účinnosť motorov závisí od rôznych parametrov, ale asi najdôležitejším je kompresný pomer motora. Čím vyšší je kompresný pomer, tým je vyššia teoretická aj skutočná účinnosť motora. Oktánové číslo zemného plynu sa pohybuje od 120 do 130 (benzín zvyčajne 95 – 100), čo znamená, že motor môže pracovať s kompresným pomerom 16:1 bez klepania. Vysoké oktánové číslo umožňuje špeciálnemu motoru na CNG používať vyšší kompresný pomer na zvýšenie tepelnej účinnosti motora približne o 10 % v porovnaní s benzínovým motorom. Preto špeciálne motory na CNG môžu mať účinnosť až približne 35 % v porovnaní s 25 % u benzínového motora. Dodatočne upravené benzínové motory neumožňujú plne využiť vysoké oktánové číslo CNG, pretože kompresný pomer je nastavený na úroveň pre spaľovanie benzínu. Vysokú účinnosť preto dosahujú predovšetkým motory určené na spaľovanie samotného CNG [15].

Zmiešavanie paliva so vzduchom

Pomer množstva vzduchu a paliva je pre spaľovanie v spaľovacích motoroch dôležitým parametrom závislým od typu paliva. Keďže je zemný plyn ľahším palivom v porovnaní s benzínom, dokáže vytvoriť oveľa homogénnejšiu zmes vzduchu s palivom [50]. Na druhej strane, kvapalné palivo, akým je benzín, potrebuje čas na úplnú atomizáciu a odparenie a vytvorenie homogénnej zmesi so vzduchom. Zemný plyn, ako plynné palivo, sa za normálnych atmosférických podmienok so vzduchom mieša oveľa rýchlejšie. Vznik homogénnej výbušnej zmesi je nevyhnutný pre dokonalé spaľovanie paliva tvoriaceho túto zmes [15], [25], [50], [53].

Údržba vozidla

Servis CNG vozidiel zahŕňa nielen motor a jeho olej, ale aj komponenty palivového systému CNG: regulátor tlaku, prírodné hadice, ventily, zásobník. Výhodné je, že CNG nekontaminuje ani neriedi motorový olej, čo následne predlžuje jeho životnosť. CNG taktiež vstupuje do motora v plynnej forme, na rozdiel od benzínu, ktorý vstupuje do motora ako sprej alebo hmla a zmyva mazací olej z oblasti krúžkov piestov, čo následne zvyšuje opotrebovanie motora. Aj z tohto dôvodu CNG predlžuje životnosť motora [15], [54]. Interval medzi údržbami vozidiel na zemný plyn je aktuálne až 30 000 km v závislosti od typu vozidla [15].

V porovnaní s naftovými a benzínovými motormi, motory na CNG vyžadujú olej s nízkym obsahom sulfátového popola. Sulfátový popol je zvyšok, ktorý zostáva po spálení oleja. Ak má olej vysoký obsah sulfátového popola, môže to viesť k jeho usadzovaniu na vnútorných povrchoch v motore, čo môže znižovať jeho výkon a životnosť. Oleje pre CNG motory sú navrhnuté tak, aby tento popol obsahovali len v malých množstvách. Kvôli svojmu skupenstvu, CNG nedokáže motor premazať, čo vedie k tvorbe sulfátových usadenín na výfukových ventiloch valcov. Usadeniny obsahujú sírany kovov, vrátane bária, vápnika, horčíka, zinku, draslíka či sodíka. Zvýšené množstvo usadenín môže viesť k zhoršenému prechodu tepla, vzplanutiu, spáleniu ventilov a zaseknutiu alebo prasknutiu krúžkov [15].

Špecifická spotreba paliva pri brzdení

Špecifická spotreba paliva pri brzdení (BSFC) je veľmi dôležitou charakteristikou pre porovnávanie výkonu spaľovacích motorov poháňaných rôznymi palivami [15]. BSFC je ukazovateľ, ktorý vyjadruje, koľko paliva motor spotrebuje na výrobu určitej jednotky výkonu. Čím je BSFC nižšie, tým je práca motora efektívnejšia, lebo sa spotrebuje menej paliva na výrobu rovnakého výkonu [55]. Viacero štúdií potvrdzuje, že BSFC motorov poháňaných CNG bola o 12 až 20 % nižšia ako pri benzíne v celom rozsahu otáčok [15], [54], [55], [56], [57].

Rýchlosť plameňa

Rýchlosť šírenia plameňa v horľavej zmesi obsahujúcej zemný plyn je nižšia v porovnaní s konvenčnými palivami ako je nafta či benzín. Výsledkom je predĺženie celkového trvania spaľovania v porovnaní s benzínom/naftou a výstup väčšieho množstva nespáleného zemného plynu z motora ako súčasť výfukových plynov [15], [58]. V dôsledku nízkej rýchlosti plameňa, keď motor poháňaný CNG pracuje blízko hranice chudobnej zmesi, dochádza k problému s vynechávaním zapaľovania.

Metán je hlavnou zložkou zemného plynu a spomedzi uhľovodíkov má najnižšiu rýchlosť šírenia plameňa [59]. Jednou z účinných metód na zvýšenie tejto rýchlosti je prímes paliva s vysokou rýchlosťou horenia k CNG, napr. pridanie vodíka. Vodík sa považuje za najlepšiu prísadu do CNG kvôli jeho rýchlej rýchlosti šírenia plameňa ($265 - 325 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) a oveľa lepšej schopnosti spaľovania chudobnej zmesi. Táto kombinácia môže zlepšiť vlastnosti spaľovania chudobnej zmesi v motoroch poháňaných CNG [15], [60].

Štúdia spaľovania zmesi obsahujúcej 20 % vodíka a 80 % CNG v motore ťažkých úžitkových vozidiel ukázala možné zlepšenie energetickej účinnosti, ako aj zníženie emisií CO_2 v porovnaní so spaľovaním čistého CNG. Je však potrebné poznamenať, že spomínané zníženie emisií do vysokej miery závisí od pôvodu vodíka (viď kapitola 4, podkapitola Vodík a etanol – suroviny aj alternatívne palivá). V závislosti od spôsobu výroby vodíka sa menia ekonomické aj ekologické parametre využitia takejto palivovej zmesi [61].

Bezpečnosť áut poháňaných CNG

Bezpečnosť vozidiel poháňaných CNG, rovnako ako vozidiel, ktoré jazdia na iné typy palív, je jedným z najdôležitejších aspektov, vzhľadom na konečného spotrebiteľa, čiže majiteľa alebo užívateľa auta. Fyzikálnochemické vlastnosti zemného plynu naznačujú, že by CNG mohol byť jedným z najbezpečnejších dostupných palív používaných v doprave [15], [62]:

- I. CNG má vyššiu dolnú medzu výbušnosti po zmiešaní so vzduchom (5,3 obj. %, **tabuľka 1.1**) v porovnaní s benzínom (1,4 obj. %) a naftou (1,0 obj. %). Preto je v prípade úniku ťažšie dosiahnuť horľavú koncentráciu CNG vo vzduchu ako pri úniku pár benzínu alebo nafty. Naopak, už menšie množstvo pár benzínu alebo nafty môže vytvoriť výbušnú zmes, čo zvyšuje ich nebezpečnosť.
- II. CNG má vysokú teplotu samovznietenia – približne 540 °C, zatiaľ čo benzín sa vznieti približne už pri 260 °C a nafta pri 320 °C. Teplota samovznietenia je najnižšia teplota, pri ktorej sa palivo vznieti vplyvom tepla bez prítomnosti vonkajšieho zdroja zapálenia (iskry alebo plameňa). Vysoká teplota samovznietenia, spolu s vyššou dolnou medzou výbušnosti, znižujú pravdepodobnosť náhodného vznietenia CNG.
- III. Zemný plyn je ľahší ako vzduch – pri atmosférickom tlaku má hustotu približne 0,68 kg.m⁻³, zatiaľ čo vzduch má hustotu 1,202 kg.m⁻³. V prípade úniku sa preto CNG rýchlo rozptýli smerom nahor, na rozdiel od benzínu a nafty, ktoré pri úniku vytvárajú na zemi horľavé kaluže. To znižuje riziko požiaru v prípade poškodenia palivovej nádrže CNG. Ako už bolo diskutované vyššie, na rozdiel od LPG, ktorý je ťažší ako vzduch a má tendenciu hromadiť sa pri zemi, sa CNG nezdržiava v prípade úniku v podzemných priestoroch. Vďaka týmto vlastnostiam je parkovanie vozidiel na CNG povolené aj v podzemných garážach, na rozdiel od vozidiel na LPG, kde je to vo väčšine prípadov zakázané [63]. Zásobníky na CNG sú navrhnuté a vyrobené zo špeciálnych materiálov, aby odolávali vysokému tlaku. Majú bezpečnostný faktor zvyčajne vyšší ako 2, čo znamená, že sú odolnejšie a bezpečnejšie ako bežné palivové nádrže určené na benzín [56].

Fyzikálne vlastnosti CNG síce naznačujú že má viacero výhod, avšak celková bezpečnosť vozidiel, bez ohľadu na typ použitého paliva, závisí aj od ľudského faktora, teda bezpečnej jazdy a uvedomelosti vodiča [15].

4

Ekologické aspekty spaľovania CNG v porovnaní s inými pohonnými látkami, obnoviteľné zdroje CNG, ďalšie typy obnoviteľných palív

Európska únia v roku 2003 prijala smernicu, ktorá stanovila cieľ zvýšiť podiel biopalív v doprave na 5,75 % do roku 2010. Následne bola v roku 2009 prijatá prvá Smernica o obnoviteľnej energii (RED I), ktorá už stanovila cieľ 10 % obnoviteľnej energie v doprave do roku 2020 [64]. V dôsledku tejto smernice tvorila motorová nafta B5 (obsahujúca najviac 5 % metylesterov mastných kyselín – bionafty – a najmenej 95 % fosílnej nafty) približne 70 % obnoviteľných motorových palív v Európskej únii [65]. Medzi rokmi 2005 až 2015 sa produkcia bionafty v Európe strojnásobila, pričom hlavnou surovinou na jej výrobu bol repkový olej [66]. Nasledovala aktualizovaná verzia smernice, RED II (2018/2001/EÚ), ktorá stanovovala cieľ aspoň 32 % obnoviteľnej energie vo všetkých sektoroch do roku 2030 [67]. Zároveň zaviedla kritériá udržateľnosti pre biopalivá, vrátane bionafty, ktoré mali zamedziť negatívnym vplyvom na využívanie pôdy, biodiverzitu a produkciu potravín. EÚ tým reagovala na problémy spojené s využívaním pôdy na produkciu biopalív a zároveň podporila vývoj pokročilých biopalív, ktoré ponúkajú vyššiu udržateľnosť a nižšie emisie skleníkových plynov [68]. Rada EÚ následne prijala smernicu 2023/2413, tzv. RED III, o energii z obnoviteľných zdrojov, ktorá nadobudla účinnosť v novembri 2023 [69]. Podľa tejto smernice platí pre členské štáty pre oblasť dopravy výber z dvoch možností:

- záväzný cieľ znížiť do roku 2030 intenzitu emisií skleníkových plynov v doprave o 14,5 % vďaka využívaniu obnoviteľných zdrojov energie,
- alebo dosiahnuť do roku 2030 záväzný podiel aspoň **29 %** energie z obnoviteľných zdrojov v rámci konečnej spotreby energie v odvetví dopravy. V roku 2023 však predstavoval podiel obnoviteľnej energie v doprave v krajinách EÚ-27 v priemere len 10,8 % a na Slovensku 9,2 % [70].

Novými pravidlami sa stanovuje záväzný spoločný čiastkový cieľ vo výške **5,5 %** pre kombináciu pokročilých biopalív (tých, ktoré **nie sú** získavané z potravinových plodín) a obnoviteľných palív nebiologického pôvodu (RFNBOs, vrátane napr. obnoviteľného vodíka a syntetických palív na báze vodíka) v podiele energie z obnoviteľných zdrojov dodávanej do sektora dopravy. Z tohto cieľa musí obnoviteľné palivo nebiologického pôvodu (RFNBO) tvoriť **minimálne 1 %** podiel energie z obnoviteľných zdrojov v doprave do roku **2030** [69].

Dosiahnutie stanovených cieľov využitia obnoviteľných zdrojov energie (OZE) v doprave musí byť postupné. Už v súčasnosti sa bežne využívajú kvapalné biozložky ako etanol, FAME, alebo hydrorafinované rastlinné oleje a na vzostupe je výroba a využitie biometánu získaného čistením bioplynu. Vyrába sa aj vodík elektrolýzou vody s pomocou elektrickej energie z OZE.

Používanie stlačeného zemného plynu ako paliva pre dopravu je vyspelá a v niektorých častiach sveta široko používaná technológia. Hoci je zemný plyn fosílnym palivom, v súčasnosti je považovaný za jedno z najčistejších palív z hľadiska emisií NO_x a tvorby sadzí. CNG sa môže používať na pohon osobných automobilov ale aj mestských autobusov. Osobné vozidlá emitujú o 10 - 15 % menej CO₂ ako porovnateľné osobné vozidlá na benzínový pohon. Emisie NO_x a sadzí pri autách na CNG sú podstatne nižšie ako u vozidiel na naftový pohon [71]. Niektorí odborníci uvádzajú, že motor spaľujúci CNG pracuje tichšie v porovnaní s motorom na kvapalné palivá.

Pri sledovaní čistoty spaľovania jednotlivých palív je hlavným ukazovateľom množstvo a typ emisií vznikajúcich počas spaľovania paliva. Medzi najviac sledované patria [23]:

- Oxid uhoľnatý CO.
- Oxid uhličitý CO₂.
- Oxidy dusíka NO_x.

Osobné automobily

Energetická účinnosť osobného automobilu poháňaného zemným plynom (CNG) je mierne vyššia v porovnaní s vozidlom na benzínový pohon. Nižší obsah uhlíka v zemnom plyne má za následok o 10–15 % nižšie emisie CO₂ v porovnaní s benzínovými vozidlami. V porovnaní s naftovými motormi je významnou výhodou CNG výrazné zníženie emisií oxidov dusíka (NO_x) – približne o 96 % – ktoré patria medzi významné škodliviny vznikajúce v cestnej doprave. Z **tabuľky 4.1** vyplýva, že emisie CO₂ pri osobných automobiloch na CNG dosahujú hodnotu približne 144 g.km⁻¹, zatiaľ čo pri benzínových motoroch je to okolo 165 g.km⁻¹. Pokiaľ ide o emisie NO_x, vozidlá na CNG produkujú približne 0,009 g.km⁻¹, zatiaľ čo naftové motory až okolo 0,237 g.km⁻¹. Naftové motory pracujú s vyšším kompresným pomerom (zvyčajne 14:1 až 22:1), zatiaľ čo benzínové okolo 8:1 až 12:1. Vyšší kompresný pomer znamená efektívnejšie spaľovanie paliva a lepšiu premenu chemickej energie na mechanickú prácu. Výsledkom je, že naftový motor spotrebuje menej paliva na rovnaký výkon, čo priamo vedie k nižšej produkcii CO₂ v porovnaní s benzínom.

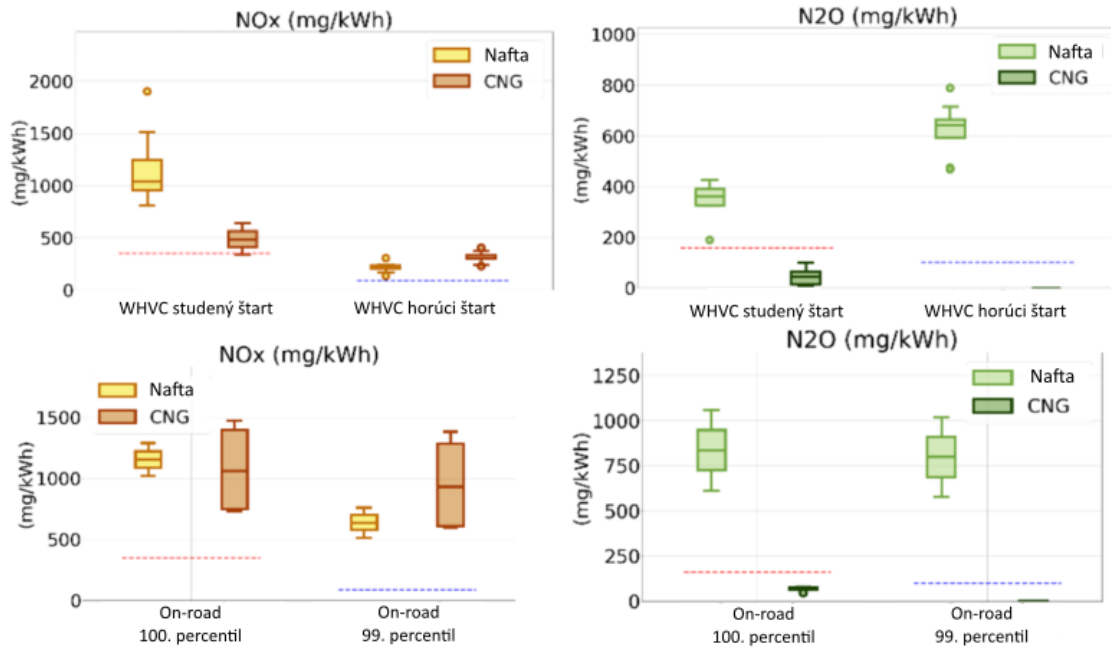
Tabuľka 4.1 Emisie CO₂ a NO_x z osobných áut spaľujúcich rôzne palivá [5].

Palivo	CO ₂ (g.km ⁻¹)	NO _x (g.km ⁻¹)	PM ₁₀ (g.km ⁻¹)
Benzín	165	0,076	0
Nafta	139	0,237	0,003
CNG	144	0,009	0

Ťažké úžitkové vozidlá

Medzi ťažké úžitkové vozidlá popri nákladnej doprave patria aj autobusy mestskej dopravy. Naftové autobusy emitujú značné množstvá oxidov dusíka (NO_x) a, ak nie sú vybavené filrami pevných častíc (staršie typy), aj veľké množstvá sadzí. Mestské autobusy, ktoré sa pohybujú prevažne v husto obývaných oblastiach, tak výrazne prispievajú k znečisteniu ovzdušia v mestách. Nie všetky technológie používané v autobusoch na stlačený zemný plyn (CNG) však vedú k výraznému zlepšeniu kvality ovzdušia [57].

Porovnanie emisií z autobusov s naftovým a CNG pohonom spĺňajúcich Euro VI D štandard pri rôznych cykloch motorových testov potvrdilo zníženie emisií NO_x a N₂O v prípade autobusov poháňaných CNG (**obrázok 4.1**). Emisie CO₂ boli v oboch prípadoch, CNG vs. nafta, porovnateľné. U oboch typov vozidiel sa pozorovalo zvýšenie všetkých meraných emisií pri studenom štarte, čo predstavuje výzvu pre vývoj týchto technológií tak, aby zodpovedali navrhovaným limitom normy Euro 7 [72].



Obrázok 4.1 Porovnanie emisií NO_x a N₂O autobusov na naftový a CNG pohon pri rôznych motorových testoch [72]. Modrá a červená čiara znázorňujú limity normy Euro 7.

Emisie CO₂ od zdroja až po kolesá (WTW – well to wheel)

Ak zohľadníme celkovú energiu potrebnú na ťažbu a spracovanie ropy na moderné automobilové palivá, emisie CO₂ v celom cykle „od zdroja po kolesá“ (WTW – Well-to-Wheel) sú pri zemnom plyne výrazne nižšie než pri benzíne a naftě. Ako už bolo spomenuté, energetická účinnosť osobného vozidla poháňaného zemným plynom je mierne vyššia v porovnaní s benzínovým vozidlom a je možné priamo porovnať hodnoty emisií CO₂ v celom WTW cykle pre benzín a zemný plyn, ako je uvedené v **tabuľke 4.2**. Emisie CO₂ od zdroja po kolesá pre vozidlo poháňané zemným plynom sú približne o 25 % nižšie ako v prípade benzínového vozidla.

Energetická účinnosť naftového motora je približne o 15 % vyššia ako pri benzínových motoroch. Napriek tomu je celkové zníženie emisií CO₂ od zdroja po kolesá pri použití zemného plynu v porovnaní s naftou stále približne 12 %.

Tabuľka 4.2 „Well-to-wheel“ emisie CO₂ [5].

Palivo	CO ₂ (g.MJ ⁻¹)
Benzín	82,8
Nafta	85,4
CNG	62,5

Ecotest – porovnanie vozidiel s rôznym pohonom

Vzhľadom na to, že sa v súčasnosti pri spaľovacích motoroch kladie dôraz najmä na environmentálny aspekt – teda na množstvo emisií vypúšťaných do ovzdušia – je dôležité objektívne porovnávať rôzne druhy pohonov. Jeden z najväčších európskych automobilových klubov, ADAC, organizuje hodnotenie Ecotest, v rámci ktorého sa porovnáva vyše 100 vozidiel s rôznymi typmi motorov.

Vozidlá na CNG sa dlhodobo umiestňujú na popredných priečkach z hľadiska nízkej úrovne znečisťujúcich emisií. Hodnotenie je prísne a komplexné – zahŕňa meranie množstva emitovaných látok ako oxid uhoľnatý (CO), oxidy dusíka (NO_x) a oxid uhličitý (CO₂). Za namerané emisie sa pridelujú body, ktoré sa následne prevádzajú do hviezdikového hodnotenia – zrozumiteľného aj pre bežného spotrebiteľa.

V roku 2021 získali dve vozidlá na CNG v hodnotení Ecotest najvyšší počet bodov aj hviezdíčiek, čím si zabezpečili prvé dve miesta v environmentálnom rebríčku. Predbehli aj plug-in hybridy alebo elektrické autá. Tieto výsledky potvrdzujú, že vozidlá s pohonom na CNG dlhodobo produkujú menej znečisťujúcich látok než ich benzínové či naftové ekvivalenty, predovšetkým keď CNG obsahuje biometán.

V konkrétnych číslach: vozidlo so spotrebou 4,2 kg CNG na 100 km produkovalo len 91 g CO₂.km⁻¹. Výpočty vychádzali zo zloženia zmesi CNG na nemeckých čerpacích staniciach, ktorá obsahovala približne 40 % biometánu. Pri vyššom podiele bioplynu sa emisie CO₂ ešte viac znižujú – pri použití 100 % biometánu môže byť vozidlo takmer CO₂ neutrálne. Rovnaký model vozidla s naftovým motorom pri spotrebe 4,7 litra na 100 km produkoval až 147 g CO₂.km⁻¹, čím výrazne zaostal za svojou CNG verziou [73], [74].

Biometán pre výrobu bio-CNG a bio-LNG – vlastnosti a výroba

Biometán je bežne definovaný ako metán z nefosílnych zdrojov. Je vyrábaný z rôznych typov biomasy a má vlastnosti blízke zemnému plynu. V širšom slova zmysle ide o metán pripravený akýmkoľvek spôsobom, ktorý zahŕňa biogénnu surovinu (napr. biomasu) alebo biologický proces (**tabuľka 4.3**) [75].

Najčastejšie používané spôsoby výroby biometánu sú založené na anaeróbných biologických procesoch, ktorých medziproduktom je bioplyn. V porovnaní s bioetanolom, alebo bionaftou sú pre výrobu bioplynu s dobrými výťažkami spracovateľné aj nepotravinové zdroje biomasy. Vo väčšine súčasných prevádzok sa ako surovina používa kal z čistenia odpadových vôd alebo potravinárske zvyšky [23].

Takto vyrobený bioplyn je zmesou viacerých zlúčenín, prevažne metánu. Jeho typické zloženie je uvedené v **tabuľke 4.4**. Podiel metánu sa môže výrazne líšiť v závislosti od použitej suroviny a metódy spracovania, a to v rozsahu 35 % až 75 % [76], [77]. Bioplyn obsahuje tiež veľké množstvo iných zložiek (hlavne CO₂ a H₂S), ktoré je potrebné pred jeho použitím ako CNG na pohon vozidiel odstrániť.

Tabuľka 4.3 Spôsob výroby biometánu [75].

	Surovina	1. krok technológie	Medziprodukt	2. krok technológie	Komerčný názov
A	biodegradovateľný organický materiál	rozklad bez prístupu kyslíka pri kontrolovaných podmienkach	bioplyn	úprava ^{a)}	Zelený plyn
B	kal z čistenia odpadových vôd	rozklad bez prístupu kyslíka pri kontrolovaných podmienkach	kanalizačný plyn	úprava ^{a)}	
C	odpad zo skládok	rozklad bez prístupu kyslíka pri kontrolovaných podmienkach	skládkový plyn	úprava ^{a)}	
D	lignocelulózoová biomasa	termické splyňovanie	syntézny plyn (CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄)	metanizácia ^{b)}	Bio-SNG, syngas
E	bioplyn	separácia CO ₂ z bioplynu	CO ₂ , H ₂	metanizácia ^{b)}	Syngas
F	voda a CO ₂	elektrolýza pomocou obnoviteľnej energie	H ₂ , CO ₂	biologická metanizácia ^{b)}	^{c)} Power to gas, syntetický metán

SNG – syntetický zemný plyn (angl. synthetic natural gas)

^{a)} Úprava (angl. upgrading) – separácia ostatných plynov, hlavne CO₂, od metánu.

^{b)} Metanizácia – chemická alebo biologická syntéza metánu.

^{c)} Premena elektriny na plyn (power to gas)

Tabuľka 4.4 Typické zloženie bioplynu [78].

Plyn	Typický obsah [obj. %]
Metán (CH ₄)	55-65
Oxid uhličitý (CO ₂)	35-45
Sulfán (H ₂ S)	0-1
Dusík (N ₂)	0-3
Vodík (H ₂)	0-1
Kyslík (O ₂)	0-2
Amoniak (NH ₃)	0-1

Často používanými metódami čistenia bioplynu sú tlakové premývanie vodou vo vodných práčkach, alebo membránová separácia (najčastejšie používaná medzi európskymi výrobcami biometánu) (**obrázok 4.2**). Premývanie vodou využíva vyššiu rozpustnosť oxidu uhličitého a sulfánu vo vode v porovnaní s metánom. Takto spracovaný plyn obsahuje viac ako 96 % metánu [4], [79]. Membránová

separácia využíva polopriepustné polymérne membrány, ktoré prepúšťajú molekuly oxidu uhličitého, amoniaku a vody, ale neprepúšťajú objemnejšie molekuly metánu [80].

Ďalšími metódami používanými na čistenie bioplynu sú pranie v organických rozpúšťadlách alebo adsorpcia kyslých plynov v roztokoch zásad (napr. monoetanolamínu) [79].

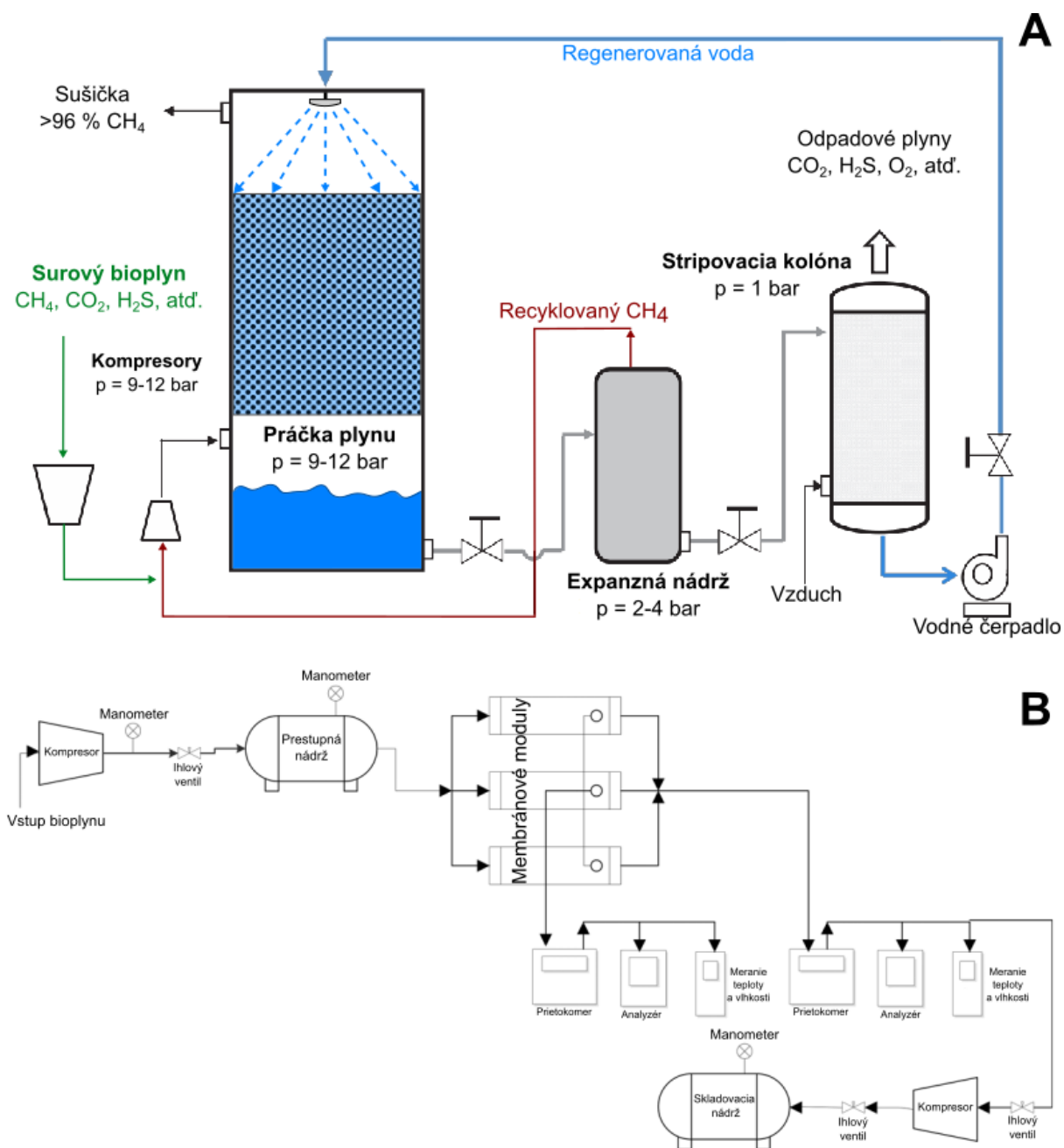
Bioplyn a biometán vo svete a v Európe

Celosvetová produkcia biometánu za ostatných päť rokov vzrástla takmer trojnásobne. Severná Amerika a Európa prispeli do svetovej produkcie v roku 2023 podielom 84 %. Silnú pozíciu na trhu získavajú Brazília, Čína aj India. Celosvetovo sa v roku 2024 vyrobilo 12 miliárd m³, čomu zodpovedá 0,442 EJ energie. V porovnaní so svetovou spotrebou energie za rok 2024, ktorá bola 592 EJ, to predstavuje ale len 0,07 % [81], [82]. V členských krajinách IEA Bioenergy Technology Collaboration Programme sa v roku 2024 vyčistilo v priemere len 38 % bioplynu na biometán, pričom najvyšší podiel upraveného bioplynu má Dánsko – premieňa na biometán takmer 100 % svojej domácej produkcie. Čína naopak čistí na biometán len 2 % svojej produkcie bioplynu, avšak vďaka trhovým investíciám sa v tejto oblasti predpokladá významný nárast [83]. Globálne majú krajiny s domácou výrobou bioplynu stále vysoký potenciál na zvyšovanie produkcie biometánu.

Najväčšími producentami biometánu v Európe podľa údajov z roku 2021 sú Nemecko (12 800 GWh), Spojené kráľovstvo (6 200 GWh) a Dánsko (5 700 GWh). V roku 2023 bolo v Európe v prevádzke viac ako 1 322 tovární produkujúcich biometán. 58 % európskej produkcie biometánu je napojenej na distribučnú sieť a 19 % je využívaných pre dopravu [84], [85].

Jedným z najväčších závodov vyrábajúcich biometán v Európe je Nature Energy Korskrø v Dánsku. Spracováva prevažne odpad zo živočíšnej výroby a priemyselný odpad (glycerol, melasa z cukrovej repy). Ich produkcia je 22 000 000 m³ biometánu ročne, pričom všetok čistia na úroveň kvality fosílného zemného plynu [86].

Na Slovensku sa najväčší podiel bioplynu vyrába z monokultúrnych plodín. V súčasnosti sa u nás biometán vyrába v dvoch prevádzkach – Bioplynová stanica Jelšava a Biometánová stanica Veľké Bierovce. V Jelšave sa z biologicky rozložiteľného odpadu vyrobí 300 – 600 m³·h⁻¹ biometánu. Pomocou trojstupňového membránového čistenia stanica produkuje biometán s čistotou 98,5 %. Zariadenie je pripojené do distribučnej siete [87]. Biometánová stanica Veľké Bierovce bola spustená koncom apríla 2025. Spracováva komunálny, potravinársky a poľnohospodársky bioodpad. Jej produkcia je okolo 14 000 m³ biometánu za deň a taktiež je pripojená do distribučnej siete [88]. Týmto spôsobom sa do fosílného metánu primieša metán obnoviteľného pôvodu.



Obrázok 4.2 Schéma tlakového premývania vodou (A) [79], schéma membránového čistenia (B) [89].

Využitie bio-CNG a bio-LNG v osobnej a nákladnej doprave

Bio-CNG a bio-LNG sa vyrábajú z biometánu po jeho vyčistení rovnakými procesmi, aké slúžia pre výrobu CNG a LNG z fosílného zemného plynu.

Jednou z možností členských štátov EÚ ako dosiahnuť zníženie emisií skleníkových plynov dopravou je využitie biometánu vyrobeného z nepotravinových, odpadových, alebo zvyškových surovín. Vzhľadom na veľké množstvo súčasne fungujúcich výrobní bioplynu a biometánu v Európe je práve využitie biometánu ako paliva pre dopravný sektor vhodnou stratégiou pre dosiahnutie týchto cieľov [90].

Viacere mestské dopravné podniky aj komerční dopravcovia zaraďujú do prevádzky vozidlá využívajúce bio-CNG, resp. bio-LNG. Dopravná spoločnosť v meste San Antonio v Texase prevádzkuje od roku 2022 viac ako 400 autobusov, ktoré čerpajú CNG z miestnej siete. Do tejto siete je privádzaný aj čistený biometán z miestnych skládok. Okrem nižších emisií CO₂ má takéto palivo aj nižšiu cenu v porovnaní s naftou [91].

Jeden z dopravných podnikov vo Francúzsku má v súčasnosti 13 autobusových dep využívajúcich biometán a do konca roka 2025 plánuje biometánom poháňať štvrtinu svojej celkovej flotily [92].

Viacere mestá vo Švédsku poháňajú svoju verejnú dopravu úplne (Linköping) alebo čiastočne (Malmö, Štokholm) biometánom. Zdroje pre výrobu biometánu vo Švédsku sú rôzne – poľnohospodársky a komunálny odpad či kal z čistenia odpadových vôd [92].

Niektoré komerčné dopravné spoločnosti si taktiež vytýčili cieľ znižovať svoju uhlíkovú stopu. Jednou z uplatňovaných stratégií je využívanie biometánu namiesto fosílného CNG vo svojich vozidlách [93].

Na Slovensku je veľký potenciál využitia biometánu ako paliva pre hromadnú dopravu. Vo viacerých okresných a krajských mestách tvoria časť vozového parku mestských hromadných dopravných vozidiel s pohonom na CNG.

V Bratislave boli do konca roku 2024 v príležitostnej prevádzke 4 kusy modelu Solaris Urbino 15 CNG [94]. Plánované je však rozšírenie vozového parku o 130 vozidiel na CNG pohon, ktoré by mali byť Dopravnému podniku Bratislava dodané do konca roku 2025 [95].

Vo vozovom parku košickej mestskej hromadnej dopravy sú aktuálne v prevádzke 3 autobusy na CNG, a to dva modely SOR NSG 12 a jeden model SOR NSG 18. Dopravný podnik mesta Košice taktiež zverejnil výsledky súťaže na dodanie ďalších 30 kusov CNG autobusov [96].

Dopravný podnik mesta Martin aktuálne prevádzkuje dva autobusy MAN Lion's City Ü CNG a 35 autobusov Iveco Urbanway 12M CNG. Tiež im bolo v roku 2024 dodaných 7 kusov modelu SOR NSG 12 [97].

MHD vo Zvolene a Banskej Bystrici aktuálne prevádzkujú spolu 45 autobusov na CNG pohon [98]. Podľa výsledkov súťaže z roku 2025 pribudne podniku SAD Zvolen do vozového parku 36 nových autobusov na CNG [99].

Vozidlá s pohonom na CNG a LNG nachádzajú na Slovensku využitie aj v nákladnej doprave. Prevádzkujú ich napríklad reťazce supermarketov, či nákladní dopravcovia [100]. Potenciál pre zelenú dopravu je

veľký a využitíu biometánu napomáhajú aj napr. plniace stanice na bio-LNG v Bratislave, Bytči a v Prešove [101].

Alternatívne palivá na báze olejatej biomasy

Tuky a oleje obsiahnuté v biomase je možné po rôznych procesoch transformácie využívať ako alternatívne palivá. Najznámejším typom je bionafta tvorená esterami vyšších mastných kyselín (angl. „Fatty Acid Methyl Esters“ – FAME). Ďalšou možnosťou sú hydrogenačne upravené rastlinné oleje (angl. „Hydrotreated Vegetable Oils“ - HVO), ktoré je možné využiť ako rôzne typy paliva (benzín, nafta, letecký petrolej) v závislosti od dĺžky a štruktúry uhlíkového reťazca zložiek výsledného produktu.

Výroba a využitie bionafty založenej na FAME

Bionafta založená na FAME (ďalej len FAME) je obnoviteľným palivom, ktoré môžeme vyrábať zo širokej škály obnoviteľných surovín, ako napr. rastlinné oleje, živočíšne tuky alebo odpadové potravinárske oleje (**tabuľka 4.5**). Pri výrobe FAME sa najnovšie trendy zameriavajú na vývoj procesov na spracovanie nepotravinových surovín (odpadové oleje, mikroriasy, nepotravinové olejnaté plodiny), s cieľom prípravy biopalív II. a III. generácie, ktoré nekonkurujú produkcii potravinárskych surovín.

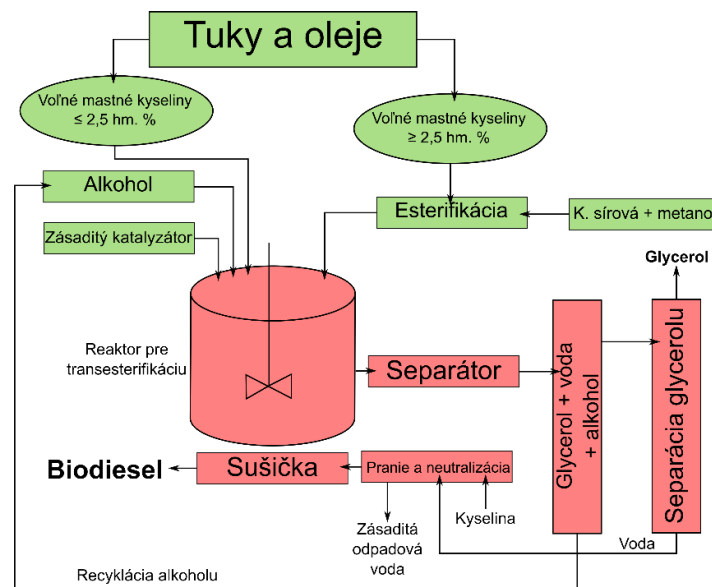
Tabuľka 4.5 Zdroje tukov pre výrobu FAME [23].

Živočíšne tuky	Rastlinné oleje	Odpadové oleje (angl. „Used Cooking Oils,“ UCO)
jedlý hovädzí loj	sójový	použitý olej z domácností
nejedlý hovädzí loj	kukuričný	oleje z reštaurácií
bravčová masť	repkový	
hydínový tuk	slnečnicový	
rybí olej	bavlníkový	

Priemyselne sa FAME vyrábajú procesom zásadito katalyzovanej transesterifikácie esterov vyšších mastných kyselín a glycerolu (triacylglycerolov, TAG), ktoré sú majoritnou zložkou rastlinných olejov a živočíšnych tukov. Táto metóda je najrozšírenejším spôsobom zníženia viskozity olejnatých surovín s cieľom ich využitia ako biopaliva. Väčšinou sa na transesterifikáciu spomínaných esterov používa metanol, nakoľko je to najlacnejší alkohol. V niektorých krajinách, ako napr. Brazília, sa však kvôli lokálnej lepšej dostupnosti využíva aj etanol [102]. Takmer všetci komerční výrobcovia využívajú na transesterifikáciu homogénny zásaditý katalyzátor, ako napr. hydroxidy alkalických kovov. Kvôli zlej separovateľnosti a nemožnosti recyklácie takéhoto katalyzátora je veľkou výzvou pre odbornú komunitu vývoj efektívnych a stabilných heterogénnych katalyzátorov [103].

Bežný priemyselný proces výroby FAME začína reakciou, pre priebeh ktorej je potrebné zmiešať metanol, resp. etanol s homogénnym zásaditým katalyzátorom a olejnatou surovinou. Túto zmes je potrebné počas celej reakcie intenzívne miešať, nakoľko metanol a TAG, alebo aj niektoré medziprodukty nie sú navzájom dobre rozpustné. Reakcia prebieha vo vsádzkovom systéme počas

jednej až troch hodín pri teplote varu použitého alkoholu. Po prebehnutí reakcie je vzniknutý metyl- alebo etylester mastných kyselín potrebné oddeliť od majoritného vedľajšieho produktu – glycerolu, najčastejšie v usadzovacej nádrži alebo centrifúge. Surové FAME sa následne neutralizuje a čistí sa od zvyškového metanolu vákuovou destiláciou. Vodným premývaním sa v predposlednom kroku odstraňujú zvyšky katalyzátora, metanolu, solí mastných kyselín a voľného glycerolu. Separácia tejto vodnej fázy je posledným krokom procesu (**obrázok 4.3**) [104].



Obrázok 4.3 Schéma výroby FAME [104].

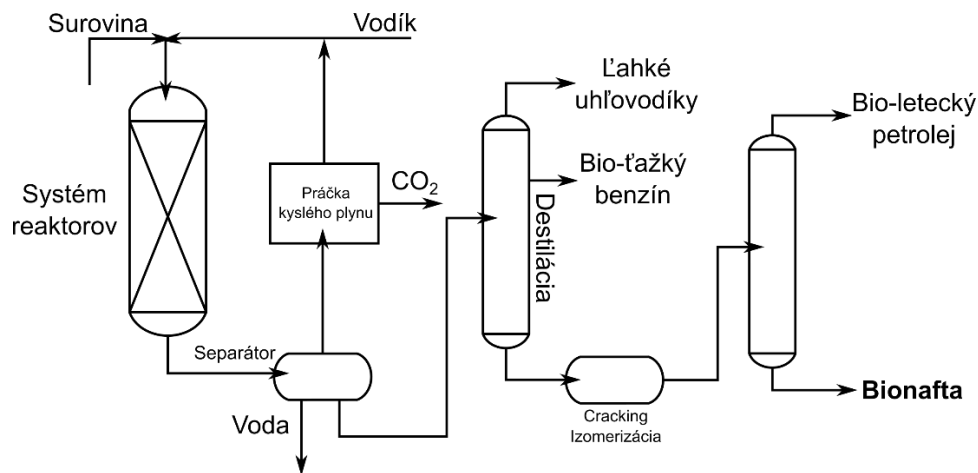
Bionaftu je možné využiť pre pohon širokej škály strojov, medzi ktoré patria cestné vozidlá (osobné vozidlá, nákladné vozidlá), terénne vozidlá (poľnohospodárske stroje, lodné motory, lokomotívy) aj stacionárne motory (generátory elektrickej energie). Využitie FAME v rôznych aplikáciách prináša potenciálne výhody, ako napr. zníženie emisií CO_2 , NO_x , tuhých častíc a uhlíkov, zníženie spotreby paliva pri brzdení alebo zvýšenie tepelnej účinnosti brzdzenia [105].

Na Slovensku sa vyrába okolo 120-tisíc ton FAME a 14,5-tisíc ton glycerolu ročne [106]. FAME sa využívajú ako obnoviteľná zložka do nafty napr. typov B7, B10, aj ako stopercentná bionafta B100. Na Slovensku obsahuje v súčasnosti klasická nafta do 7 % obj. biozložky [107].

Výroba a vlastnosti hydrorafinovaných rastlinných olejov

Hydrorafinácia rastlinných olejov pre využitie na produkciu obnoviteľnej nafty alebo leteckého petroleja je relatívne nový proces. Jej produktom je tzv. hydrorafinovaný rastlinný olej (angl. „Hydrotreated Vegetable Oil,“ HVO). Hydrogenačným prepracovaním sa dosahuje úprava vlastností rastlinného oleja, aby bol vhodný na použitie v spaľovacích motoroch, ako napr. zníženie kinematickej viskozity, zníženie tvorby usadenín a zvýšenie stability paliva. HVO sú uhlíkovodíky s dĺžkou reťazca na úrovni parafínov bez prítomnosti aromatických kruhov, kyslíka a síry. Ich cetánové číslo je vyššie ako pri FAME alebo letnej nafta. Testy ukázali, že HVO vykazuje dobrú dlhodobú stabilitu, výhodné vlastnosti pre použitie pri nízkych teplotách a nižšiu tvorbu usadenín [23], [108].

Pre výrobu HVO je taktiež možné využiť širokú škálu obnoviteľných olejnatých surovín (viď **tabuľka 4.6**). Na rozdiel od FAME sa pri výrobe tejto základnej suroviny využíva vodík, ktorého pôvod prispieva k celkovej environmentálnej prijateľnosti výroby HVO.



Obrázok 4.4 Schéma výroby HVO pre účely využitia ako bionafta a bio-letecký petrolej [109].

Dôležitými krokmi tohto procesu sú predpríprava suroviny, deoxygenácia a hydrokrakovanie, a následné čistenie produktu destiláciou. Pre reakčné stupne tohto procesu (**obrázok 4.4**) sú vhodné katalyzátory na báze niklu [110].

Výstupom z takéhoto procesu sú HVO priamo využiteľné ako rôzne palivá v závislosti od dĺžky uhľovodíkových reťazcov ich zložiek. Stopercentná nafta HVO 100 má minimálne o 65 % nižšie emisie CO₂ v porovnaní s naftou vyrobenou z ropy. Je vhodná pre autá s modernými naftovými motormi vyhovujúcimi norme Euro 6 bez akýchkoľvek úprav. Jej použitie znižuje emisie pevných častíc a uhľovodíkov o 30 %, emisie oxidu uhoľnatého o 24 % a produkuje o 9 % menej oxidov dusíka [111].

Vyššie spomínané smernice upravujúce podiel obnoviteľných palív používaných v Európe podporujú aj dopyt po palivách založených na HVO v krajinách EÚ. Aktuálne je možné palivá založené na HVO natankovať vo väčšine členských krajín Európskej únie. Čerpacie stanice predávajúce stopercentnú HVO 100 sa nachádzajú v 20 z 27 členských štátov vrátane Slovenska [112].

Najväčšími výrobcami HVO v Európe sú Taliansko, Holandsko a Španielsko. V roku 2023 bola výrobná kapacita HVO v celej EÚ 5,1 MT/rok. Do roku 2030 sa predpokladá takmer dvojnásobný nárast jeho výroby [113], [114].

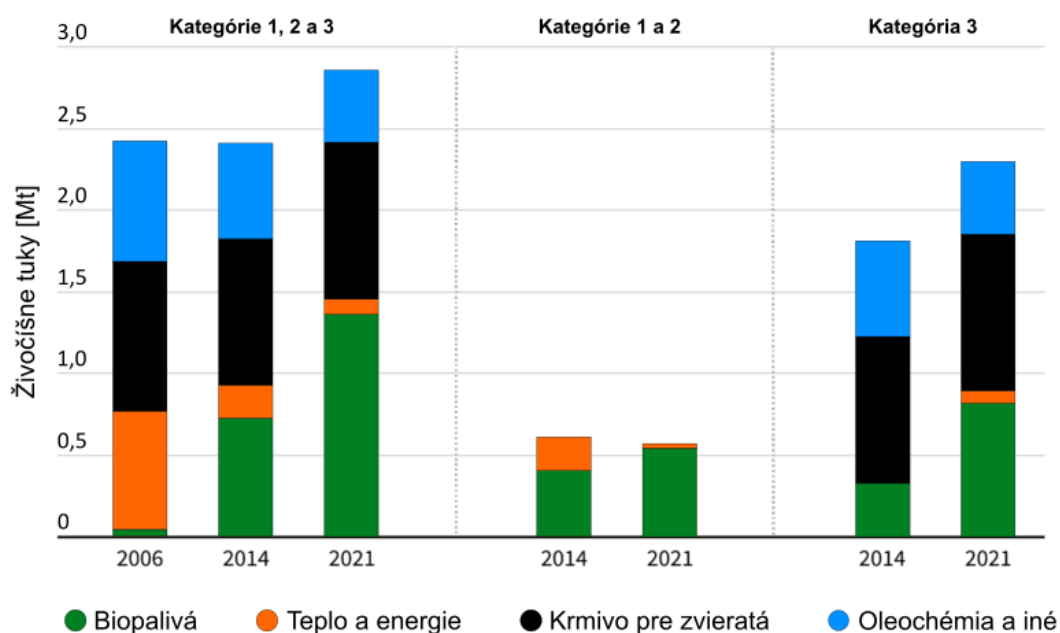
Udržateľnosť surovín pre výrobu FAME a HVO

Olejnaté suroviny pre výrobu FAME a HVO vo väčšine prípadov stále pochádzajú z poľnohospodárskych plodín. V krajinách EÚ sa najviac využíva repkový a slnečnicový olej, v USA sójový olej, v krajinách juhovýchodnej Ázie palmový olej a zvyšky z jeho spracovania [115]. S týmito surovinami sú spojené isté environmentálne riziká, a to hlavne z hľadiska pestovania monokultúrnych plodín. Alternatívnou olejnatou surovinou pre výrobu FAME a HVO sú použité odpadové kuchynské oleje – UCO (z angl. Used Cooking Oils). Tie pochádzajú z potravinárskeho priemyslu, reštaurácií aj domácností. V krajinách EÚ sú treťou najčastejšie používanou surovinou na výrobu FAME. V Európe je odhadované potenciálne zozbierateľné množstvo UCO 4 Mt za rok. V súčasnosti sa z tohto množstva zbiera a využíva len

sedmina. Na výrobu FAME a HVO z UCO sa pre požiadavky krajín EÚ importuje viac ako 80 % spracovaného UCO z krajín ako Čína, Indonézia a Malajzia. Vzhľadom na rastúci domáci dopyt týchto krajín bude možnosť importu tejto obnoviteľnej suroviny limitovaná, preto je dôležité sústrediť sa na dôslednejší zber vlastných použitých kuchynských olejov. Alternatívou k UCO je ďalšia olejnatá surovina – odpadové živočíšne tuky z potravinárskeho a kozmetického priemyslu [116], [117].

Odpadové živočíšne tuky delíme do troch kategórií podľa rizika prenosu chorôb pri ich konzumácii človekom (kategória 1 – najvyššie riziko, kategória 2 – stredné riziko, kategória 3 – najnižšie riziko, potravinovo využiteľná a menej vhodná pre výrobu FAME a HVO). Tuky Kategórie 3 je stále povolené v krajinách EÚ využívať pre výrobu biopalív. Pre minimalizáciu využitia tukov kategórie 3 na výrobu biopalív je potrebná zmena európskej legislatívy a vyradenie tejto kategórie z možnosti ich použitia na výrobu biopalív [118].

Na **obrázku 4.5** je zobrazený trend nárastu využitia živočíšnych tukov pre výrobu biopalív medzi rokmi 2006 a 2021. Do roku 2030 sa predpokladá trojnásobný nárast dopytu po živočíšnych tukoch pre biopalivá, preto je zvlášť potrebný robustný systém auditov, aby sa predišlo nesprávnej kategorizácii a potenciálnemu podvodnému zaobchádzaniu so živočíšnymi tukmi vhodnými pre výrobu potravín [118].



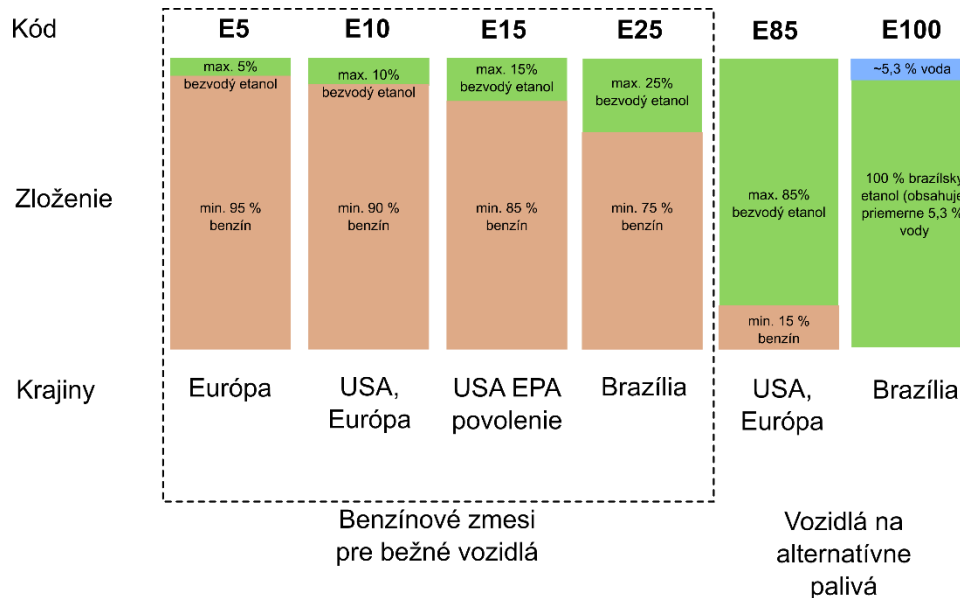
Obrázok 4.5 Využitie živočíšnych tukov v rôznych odvetviach priemyslu v EÚ a Spojenom kráľovstve [118].

Vodík a etanol – suroviny aj alternatívne palivá

Pre výrobu FAME v niektorých krajinách sa využíva etanol ako surovina namiesto metanolu. Vodík je surovinou pri výrobe HVO. Obe tieto komodity sú zároveň využiteľné priamo v rôznych typoch spaľovacích motorov. Nasledujúca kapitola je venovaná týmto chemikáliám, ich výrobe a použitiu ako palív v sektore dopravy.

Bioetanol

Bioetanol je jednou z najčastejšie pridávaných biozložiek do benzínu. Radí sa medzi oxygenáty, čo sú aditíva obsahujúce kyslík. Zvyšujú oktánové číslo benzínu a tiež zabezpečujú dokonalé horenie paliva, čo zamedzuje tvorbe oxidu uhoľnatého, tuhých častíc a aromatických uhľovodíkov vo výfukových plynoch [119]. Vo svete sa používa celá škála zmesí benzínu a etanolu v rôznych pomeroch (**obrázok 4.6**).



Obrázok 4.6 Komerčne dostupné zmesi benzínu a etanolu v rôznych krajinách [120].

Bioetanol sa celosvetovo najviac vyrába fermentáciou, pri ktorej sa organický materiál založený na biomase – napríklad cukrová trstina, kukurica alebo iné plodiny bohaté na cukry a škroby – premení pomocou mikroorganizmov na etanol a oxid uhličitý. Kategorizácia na základe typu, procesov potrebných na spracovanie biomasy a úrovne súčasného uplatnenia je uvedená v **tabuľke 4.6**.

V krajinách Európskej únie sa najčastejšie predáva benzín s obsahom etanolu vo forme zmesí E10 (max. 10 % obj. etanolu) alebo E5 (max. 5 % obj. etanolu). Väčšina automobilov vyrobených po roku 2000 je kompatibilných s benzínom s vyšším obsahom etanolu (E10) a automobily vyrobené po roku 2016 sú na tento typ benzínu optimalizované.

Podiel benzínu E10 na európskom trhu rastie, čo prispieva k zníženiu emisií skleníkových plynov z fosílnych palív [121]. Podľa štatistík z roku 2023 predstavovala výrobná kapacita bioetanolu v členských štátoch EÚ viac ako 9 miliárd litrov. Najväčšími výrobcami boli Francúzsko, Nemecko a Maďarsko [122]. Na Slovensku dosiahol benzín E10 v roku 2023 87% trhový podiel z celkového objemu predaného benzínu [123].

Tabuľka 4.6 Generácie biopalív [124].

Gen.	Surovina	Výhody	Nevýhody
1. gen.	jedlé cukornaté plodiny (cukrová trstina, kukurica, cukrová repa)	<ul style="list-style-type: none"> • široko využívaná technológia • vysoké výťažky 	<ul style="list-style-type: none"> • konkurencia pri výrobe potravín • vyžaduje ornú pôdu a vodu
2. gen.	nejedlá lignocelulózo­vá biomasa (slama, šupy)	<ul style="list-style-type: none"> • nekonkuruje s výrobou potravín • dostupný odpadový materiál 	<ul style="list-style-type: none"> • potrebná nákladná predpríprava suroviny • prevádzky väčšej škály sú ekonomicky náročné
3. gen.	mikroriasy, huby, baktérie	<ul style="list-style-type: none"> • nepotre­bujú pôdu a vodu • rýchly rast biomasy • malá konkurencia s výrobou potravín 	<ul style="list-style-type: none"> • finančne náročná kultivácia • skoré štádium vývoja, iba pilotné prevádzky
4. gen.	geneticky modifikované mikroorganizmy alebo plodiny	<ul style="list-style-type: none"> • potenciálne vysoké výťažky a rýchla produkcia • dizajn pre rýchlejšiu konzumáciu CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • skoré štádium vývoja • nízka ekonomická návratnosť

Vodík

Využitie vodíka ako paliva pre dopravu bolo zatiaľ implementované v dvoch hlavných technológiách. Tými sú vodíkové palivové články (angl. „Hydrogen Fuel Cells,“ HFC) a vodíkový spaľovací motor (angl. „Hydrogen-fuelled Internal Combustion Engine,“ HICE).

HFC je galvanický článok, ktorý generuje elektrickú energiu elektrochemickou reakciou vodíka a kyslíka v systémoch rôznych elektród a elektrolytov. Na anóde prebieha oxidácia vodíka, pričom vznikajú protóny a elektróny. Na katóde sa elektróny spájajú s kyslíkom a vytvárajú vodu ako hlavný produkt [125].

Vozidlá s vodíkovým palivovým článkom (HFC) dosahujú podobnú účinnosť celkového energetického reťazca („Well-To-Wheel“) ako batériové elektromobily, no ich výhodou je rýchle tankovanie a často aj dlhší dojazd. Hmotnosť týchto vozidiel je spravidla porovnateľná s batériovými elektromobilmi. Technickými nevýhodami sú nižšia účinnosť pri čiastočnom zaťažení a pomalšia odozva výkonu, ktorá sa kompenzuje doplnkovými batériami. Najväčšou prekážkou rozšírenia je dnes nedostatočná sieť čerpacích staníc a bezpečnostné riziká spojené so skladovaním vodíka [126].

Spaľovacie aj vznetové motory boli adaptované pre vodík. Výhodou vodíka pre spaľovacie motory je nižšia teplota plameňa pri jeho horení v zmesi so vzduchom, ktorej výsledkom sú nižšie úniky tepla a vyššia účinnosť motora. Vodík je tiež možné miešať s inými palivami pre spaľovacie motory, ako napr. benzín alebo metán [127].

Vodík je možné využiť aj pre vznetové motory, a to vstrekaním vysokotlakového vodíka do valca motora alebo v zmesi s konvenčnou naftou. Výhodami sú, podobne ako v prípade spaľovacieho motora, dokonalejšie horenie a menší obsah škodlivín vo výfukových plynch [126], [127].

Vodík samotný má rôzny dopad na životné prostredie v závislosti od spôsobu jeho výroby. Aktuálne existuje sedem kategórií vodíka, ktorých charakteristiky sú zosumarizované na **obrázku 4.7** [128].

Zelený vodík je najviac udržateľný. Jeho výroba je založená na elektrolyze vody, pričom sa využívajú obnoviteľné zdroje elektrickej energie (veterná, slnečná, vodná).

Modrý vodík je prechodným riešením medzi fosílnymi a obnoviteľnými zdrojmi. Vyrába sa parným reformingom zemného plynu, pričom sa zachytáva a ukladá vznikajúci CO₂ („Carbon Capture and Storage“ – CCS).

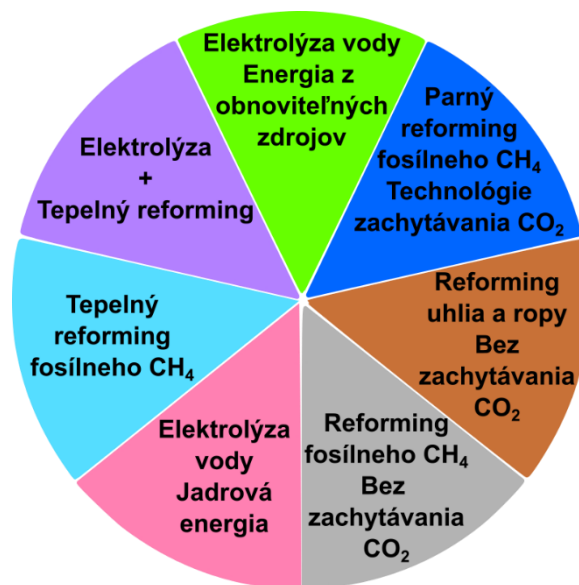
Hnedý alebo čierny vodík je najmenej environmentálne priateľský zo všetkých druhov. Vyrába sa splyňovaním uhlia, pričom sa uvoľňuje veľké množstvo emisií.

Sivý vodík sa vyrába rovnakou technológiou ako modrý (parný reforming zemného plynu), ale bez CCS, a preto má vysoké emisie, hoci menšie než výroba vodíka z uhlia.

Ružový vodík sa vyrába elektrolyzou vody, avšak ako zdroj energie pre túto elektrolyzu sa využíva jadrová energia. Táto metóda má potenciálne vyššiu účinnosť, nakoľko je možné recyklovať odpadové teplo z jadrového reaktora. Tiež neemituje žiadne skleníkové plyny.

Tyrkysový vodík sa vyrába vysokoteplotným štiepením metánu, čo je alternatíva tradičného parného reformingu. Táto metóda okrem vodíka produkuje iba tuhé uhlíkové zvyšky, nie CO₂. Tiež má potenciálne nižšie energetické náklady v porovnaní s parným reformingom.

Fialový vodík je kombináciou tyrkysového a ružového vodíka. Využíva jadrovú energiu a elektrolyza vody prebieha pri vysokých teplotách.



Obrázok 4.7 Typy vodíka podľa spôsobu jeho výroby [128].

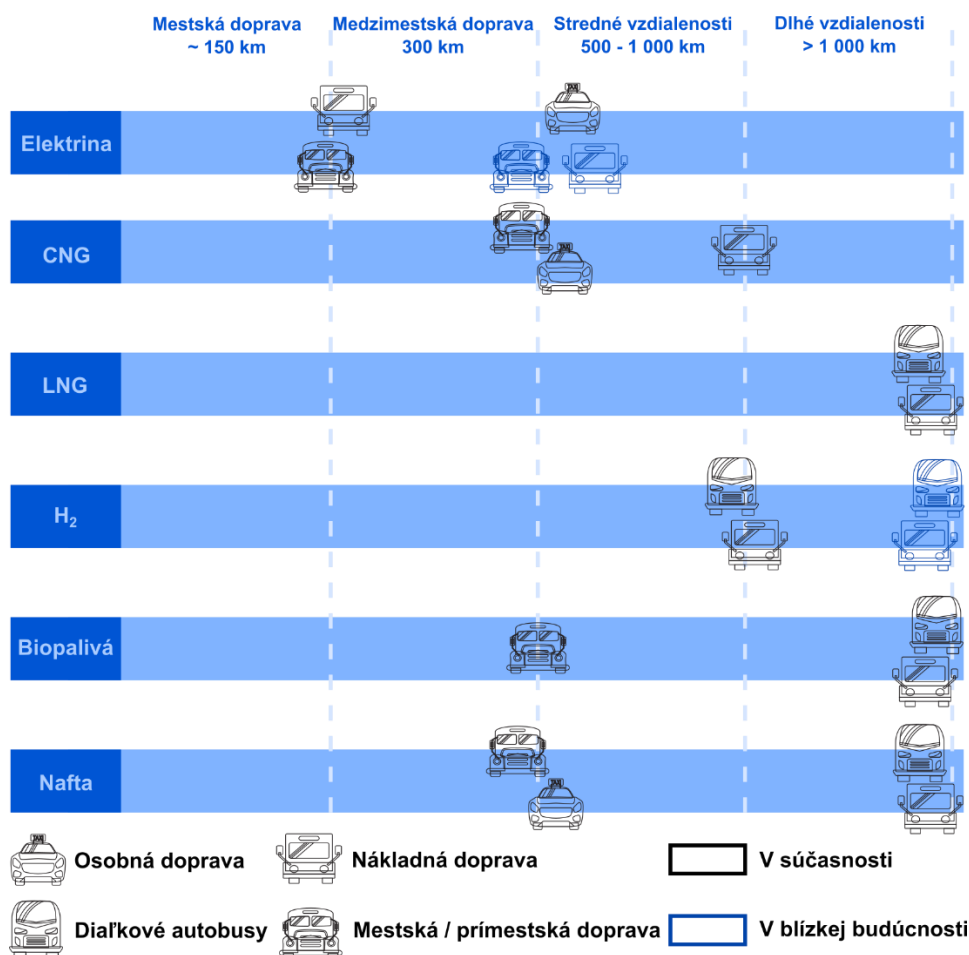
Vozidlá s alternatívnym pohonom na Slovensku

Na Slovensku jazdí široká škála vozidiel na alternatívny pohon. Patria sem vozidlá využívajúce výhradne alternatívne palivá, ako aj tzv. hybridy, ktoré kombinujú viacero druhov pohonu. V roku 2024 bolo na Slovensku evidovaných viac ako 190 000 vozidiel s čisto alternatívnym pohonom alebo s kombinovaným

fosílnym a alternatívnym pohonom (**tabuľka 4.7**) [129]. Medzi alternatívne palivá používané na Slovensku patria CNG, LNG, LPG, etanol, vodík a elektrina.

Tri hlavné typy elektrických vozidiel (EV) sú batériové elektrické vozidlá (angl. *Battery Electric Vehicles*, BEV), plug-in hybridy (PHEV) a hybridné vozidlá (HEV). BEV sú plne elektrické a poháňané výhradne dobíjateľnou batériou. PHEV kombinujú elektrický pohon s benzínovým alebo naftovým motorom; batéria sa nabíja zo siete a pri jej vybití vozidlo pokračuje v jazde so spaľovacím motorom. HEV tiež kombinujú spaľovací motor a batériu, avšak batériu nemožno nabiť zo siete – nabíja sa iba rekuperačným brzdením, ktoré premieňa kinetickú energiu pri brzdení na elektrickú energiu, zatiaľ čo v tradičných motoroch sa táto energia stráca vo forme tepla [130].

Rôzne druhy alternatívneho pohonu sú optimálne pre odlišné vzdialenosti a oblasti využitia. Prehľad dojazdov a vhodných druhov dopravy pre jednotlivé palivá je uvedený na **obrázku 4.8**.



Obrázok 4.8 Možnosti uplatnenia alternatívnych palív v rôznych typoch dopravy [131].

Tabuľka 4.7 Typy vozidiel s alternatívnym pohonom na Slovensku v roku 2024 [129].

Typ pohonu	Kategória vozidla					
	M1	N1	N2	N3	M2	M3
Benzín + CNG	1 692	280	0	0	0	0
Benzín + elektrický pohon (nie plug-in)	82 076	21	0	0	0	0
Benzín + elektrický pohon (plug in)	9 925	2	0	0	0	0
Benzín + elektrina	5 201	8	0	0	0	0
Benzín + etanol	24	2	0	0	0	0
Benzín + LNG	7	3	0	0	0	0
Benzín + LPG	49 675	3 067	2	0	0	0
Benzín + LPG + elektrický pohon (nie plug-in)	180	29	0	0	0	0
Benzín + LPG + elektrický pohon (plug-in)	16	0	0	0	0	0
Benzín + LPG + elektrina	91	2	0	0	0	0
CNG	1 240	157	16	74	1	241
Elektrina	14 599	877	27	15	0	52
Etanol + elektrický pohon (nie plug-in)	1	0	0	0	0	0
Etanol + elektrický pohon (plug-in)	2	0	0	0	0	0
LNG	0	0	0	117	0	0
LPG	6	1	0	1	0	3
Nafta + CNG	2	2	0	4	0	0
Nafta + elektrický pohon (nie plug-in)	22 619	10	0	1	0	4
Nafta + elektrický pohon (plug in)	939	1	0	0	0	0
Nafta + elektrina	378	1	0	1	0	0
Nafta + LNG	0	0	0	9	0	0
Nafta + LPG	1	0	0	2	0	0
Vodík	5	0	0	0	0	4

Kategórie vozidiel: Motorové vozidlá s najmenej štyrmi kolesami projektované a konštruované na prepravu cestujúcich: M1 – vozidlá projektované a konštruované na prepravu cestujúcich, najviac s ôsmimi sedadlami okrem sedadla pre vodiča; M2 – vozidlá projektované a konštruované na prepravu cestujúcich, s viac ako ôsmimi sedadlami okrem sedadla pre vodiča, s najväčšou prípustnou celkovou hmotnosťou neprevyšujúcou 5 000 kg; M3 – vozidlá projektované a konštruované na prepravu cestujúcich, s viac ako ôsmimi sedadlami okrem sedadla pre vodiča, s najväčšou prípustnou celkovou hmotnosťou vyššou ako 5 000 kg. Motorové vozidlá s najmenej štyrmi kolesami projektované a konštruované na prepravu tovaru: N1 – vozidlá projektované a konštruované na prepravu tovaru s najväčšou prípustnou celkovou hmotnosťou neprevyšujúcou 3 500 kg; N2 – vozidlá projektované a konštruované na prepravu tovaru s najväčšou prípustnou celkovou hmotnosťou vyššou ako 3 500 kg, ale neprevyšujúcou 12 000 kg; N3 – vozidlá projektované a konštruované na prepravu tovaru s najväčšou prípustnou celkovou hmotnosťou vyššou ako 12 000 kg.

Záverom je dôležité zdôrazniť, že na porovnanie rôznych typov alternatívnych palív používaných na pohon automobilov by bola potrebná dôkladná a pomerne zložitá analýza nákladov napr. na výstavbu infraštruktúry, nákladov na obstaranie vozidla, prevádzkových nákladov, nákladov na palivo a tiež emisií CO₂ spojených nielen s používaním paliva, ale aj s jeho výrobou, resp. spojených s výrobou a recykláciou samotných automobilov. Posledný z vymenovaných parametrov bol nedávno spracovaný v štúdiu, ktorá porovnávala CTC (od kolísky ku kolíske) emisie CO₂ zohľadňujúce komplexné posúdenie životného cyklu vozidla, od výroby vozidiel, cez ich používanie až po recykláciu. V prípade osobného vozidla na CNG sa dosiahla hodnota emisií CTC 36 – 48 t CO₂eq, pri elektromobile 1,9 – 59 t CO₂eq a pri

vozidle s palivovými článkami 2,5 – 79 t CO₂eq. Pri vodíku aj elektrine pri samotnom spaľovaní síce nedochádza ku tvorbe CO₂, ale pri bilancii CTC je zahrnutá tvorba emisií oxidu uhličitého aj v súvislosti s výrobou týchto zdrojov energie. Miera environmentálnej záťaže sa líši v závislosti od pôvodu paliva. Pre vodík bol tento princíp ilustrovaný na **obrázku 4.7**, v prípade elektriny je to podobné – napr. elektrina z tepelných elektrární predstavuje vyššiu environmentálnu záťaž v porovnaní s elektrinou z obnoviteľných zdrojov (vodná, slnečná, veterná). Z tohto dôvodu majú hodnoty pre elektrinu a vodík široký interval, ktorý priamo súvisí so spôsobom ich výroby v jednotlivých krajinách a najvyššie hodnoty sa dosahovali v prípade elektriny vyrobenej v uhoľných elektrárňach [132].

5

Potenciálne možnosti vplyvu výroby a logistiky jednotlivých druhov palív vzhľadom na ekológiu a základnú ekonomiku procesov

Priemerná cena CNG v porovnaní s inými palivami

Pre vodiča motorového vozidla je jednou z kľúčových informácií cena paliva potrebného na 100 km jazdy. Európska únia dlhodobo zhromažďuje a publikuje údaje o priemerných cenách jednotlivých palív. **Tabuľka 5.1** uvádza porovnanie cien palív v niektorých členských krajinách za príslušný rok. Porovnávané sú bežne používané motorové palivá, ako benzín, nafta, CNG, LPG, ako aj vodík a elektrina.

Na Slovensku bola v prvom kvartáli 2025 cena CNG nižšia ako cena benzínu a len mierne nižšia ako cena nafty. Odráža sa tu menšie daňové zaťaženie na naftu (42 % z ceny), v porovnaní s benzínom (51 % z ceny) [133], [134]. Dôležitým predpokladom širšieho rozšírenia CNG je vybudovaná infraštruktúra, teda dostatočný počet a vhodné rozmiestnenie plniacich staníc. Počet staníc v jednotlivých európskych krajinách v posledných rokoch je uvedený v **tabuľke 5.2**.

Tabuľka 5.1 Ceny rôznych palív na 100 prejazdených kilometrov pre osobné automobily v rôznych krajinách Európy* [134].

Krajina	Časové obdobie	Elektrina (€/100km)	Benzín 95 E10 (€/100km)	Nafta B7 (€/100km)	CNG (€/100km)	LPG (€/100km)	Vodík (€/100km)
Česko	2025 Q4	4,9	9,42	7,93	-	-	-
Fínsko	2025 Q1	2,6	9,5	9,8	7,2	-	-
Holandsko	2025 Q1	6,69	10,72	9,46	7,88	6,85	-
Nemecko	2025 Q2	5,27	10,37	7,98	8,93	7,06	13,99
Poľsko	2024 Q2	9,81	9,65	7,87	9,67	5,12	15,97
Slovensko	2025 Q1	4,77	8,59	7,02	6,98	4,38	18,14
Slovinsko	2025 Q1	5,93	8,86	7,35	6,79	5,83	23,91
Švédsko	2025 Q2	3,18	8,73	9,44	12,90	-	20,85
Španielsko	2024 Q4	2,58	9,89	7,18	4,33	7,94	-

* Údaje pre vytvorenie porovnania v [134] boli poskytnuté Európskej komisii priamo členskými štátmi. Každý z nich môže dodržiavať odlišné metodiky a harmonogramy podávania správ.

Tabuľka 5.2 Počet plniacich CNG staníc v európskych krajinách k februáru 2025 [135].

Krajina (rok)	Česko (2025)	Rakúsko (2024)	Chorvátsko (2024)	Francúzsko (2025)	Nemecko (2024)	Maďarsko (2024)	Poľsko (2024)	Slovensko (2025)	Taliansko (2024)
Počet CNG staníc	232	170	4	90	867	22	27	27	1 300

Základné ekonomické aspekty CNG

Jednou z výhod CNG je jeho cenová dostupnosť, najmä v porovnaní s drahším palivom, ako je benzín a v menšej miere nafta. Ceny pohonných hmôt sa ale líšia v závislosti od regiónu a krajiny, preto je ekonomickú bilanciu potrebné vždy robiť pre aktuálne ceny v danom štáte a pre určitý typ dopravného

prostriedku (osobný automobil, autobus, nákladné vozidlo). Hoci environmentálne aspekty a kontrola emisií boli pôvodne hlavným dôvodom využitia zemného plynu v cestnej doprave, najmä vo veľkých mestách, nárast a nestabilita cien ropy zvýšil význam CNG, ktorý sa stáva kľúčovým faktorom pre mnohých nových používateľov [15], [50].

V mnohých krajinách je CNG lacnejšie pri porovnaní ceny na prejdených 100 km, v porovnaní s cenou benzínu a nafty (**tabuľka 5.1**), a to aj po zohľadnení nákladov na kompresiu ZP.

Zemný plyn ako palivo nevyžaduje zložité úpravy od ťažby až po použitie vo vozidle. Na druhej strane výroba nafty a benzínu je omnoho zložitejšia – ropa sa spracúva prostredníctvom deliacich, rafinačných a konverzných technológií, pričom sa pridávajú aj bio-zložky a rôzne prísady na zlepšenie jej vlastností. CNG je tiež menej náchylné na cenové výkyvy, pretože zdroje metánu sú rovnomernejšie rozložené v porovnaní s ropou [136].

Potvrdilo sa, že vozové parky firiem na odvoz a recykláciu odpadov ušetrili náklady na palivo pri prechode z nafty na CNG. Druhá najväčšia spoločnosť poskytujúca služby v oblasti odpadového hospodárstva v USA, dosiahla zníženie nákladov na palivo vďaka nasadeniu CNG vo viacerých vozových parkoch o približne 0,42 €·km⁻¹ [137], [138]. Rovnako NREL (Národné laboratórium pre obnoviteľnú energiu) USA vykonalo porovnávacie hodnotenie emisií autobusov prevádzkovaných dopravnou spoločnosťou vo Washingtone. Okrem emisných výhod autobusov na CNG tento projekt odhalil aj úspory paliva pre autobusy na CNG v porovnaní s naftovými autobusmi od 4,2 % do 9 % v závislosti od typu autobusu s naftovým pohonom [139].

Cenná je štúdia z roku 2018 Komisie pre reguláciu elektriny a plynu v Belgicku pre využitie CNG v osobných autách (rad VW Golf, **tabuľka 5.3**), pretože sa porovnával rovnaký typ osobného automobilu ale jazdiaci na rôzne palivá. CNG vyšlo výhodnejšie v porovnaní s benzínom aj naftou po 70 000 najazdených km. Pozoruje sa tiež 80 – 90 % zníženie množstva tuhých častíc a NO_x vo výfukových plynch a 7 – 16 % zníženie emisií CO₂. Cena paliva na kilometer bola v prípade CNG nižšia o 33 % v porovnaní s naftou a o 77 % v porovnaní s benzínom [140]

Tabuľka 5.3 Cena paliva pre vozidlá radu VW Golf Comfortline [140].

VW Golf Comfortline (päťdverový)	Cena (€ za l alebo kg alebo kWh)	Cena (€ na 100 km)	Cena (€ na 15 000 km)	Cena (€ na 75 000 km)
Benzín (TSI)	1,272	6,49	973	4 865
Nafta (TDI)	1,272	4,83	725	3 625
CNG (TGI)	1,020	3,67	551	2 754
e-golf	0,250	4,33	649	3 244
GTE (plug-in hybrid)	1,522	5,95	892	4 461

Implementácia ťažkých vozidiel s alternatívnym pohonom, napr. autobusov verejnej dopravy, však môže byť náročná z ekonomického hľadiska. Štúdia z roku 2021 porovnávala dva modely náhrady počas postupnej obnovy vozového parku Dopravného podniku Košice, a to výmenu autobusov na konci životnosti výlučne autobusmi na elektrický pohon, alebo ich náhradou za kombináciu autobusov s elektrickým pohonom a autobusov s CNG pohonom. Prvý variant nedosiahol pozitívnu čistú súčasnú hodnotu ani po desiatich rokoch životnosti pri predpoklade, že dopravná spoločnosť financovala túto

implementáciu čisto z vlastných zdrojov. Druhý variant dosiahol pri rovnakom predpoklade pozitívnu čistú súčasnú hodnotu počas deviateho roku. Pre implementáciu takýchto stratégií sú preto potrebné ďalšie zdroje financovania [141].

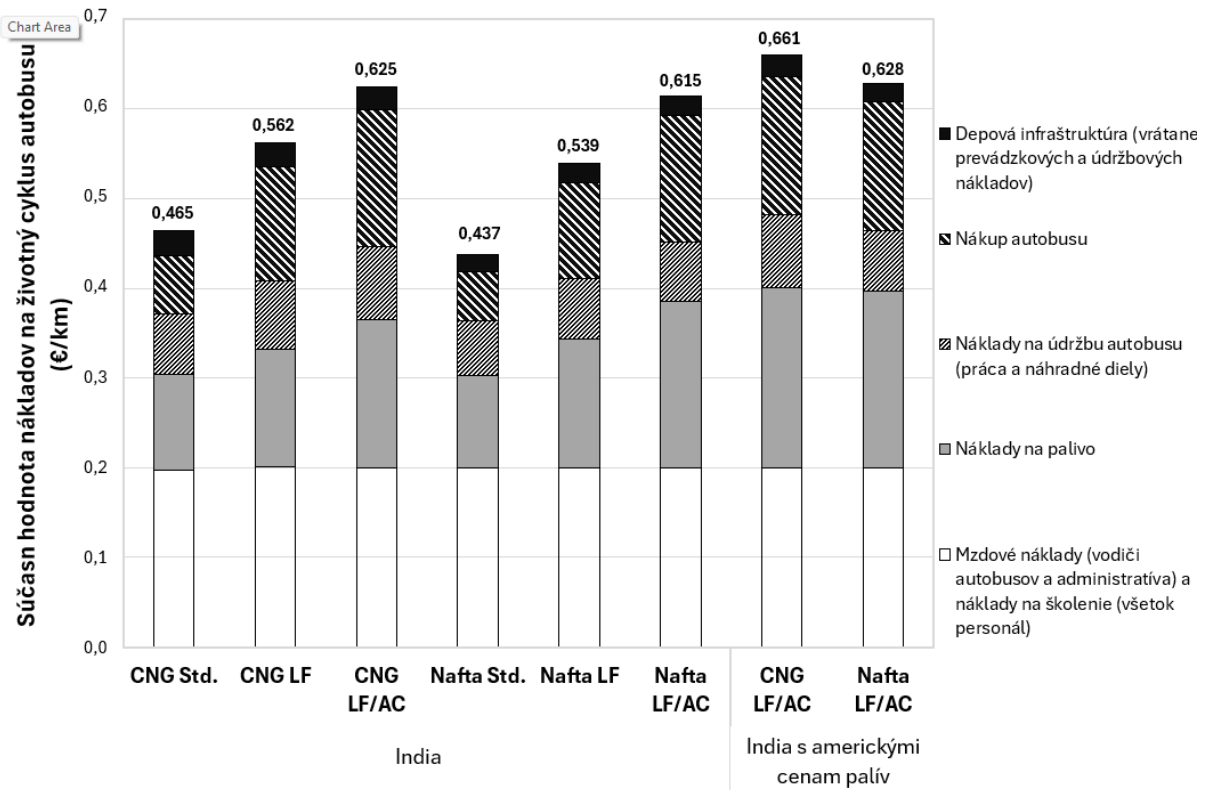
Analýza efektívnosti nákladov zavedenia CNG autobusov v hromadnej doprave pre zlepšenie kvality vzduchu v Novom Delí porovnávala s odstupom času od ich zavedenia pomery nákladov na životný cyklus a vyprodukovaných emisií tuhých častíc, CO₂, NO_x a iných znečisťujúcich látok. Vďaka CNG autobusom sa znížili emisie týchto látok v porovnaní s Diesel-Std. autobusmi najnižšieho štandardu (**tabuľka 5.4**). Vylepšenie autobusovej flotily na čistejšie BS-III a BS-IV naftové autobusy by však poskytlo podobné benefity z hľadiska zlepšenia kvality vzduchu pri podobnej cenovej efektívnosti [142].

Tabuľka 5.4 Rozpis výpočtu pomeru nákladovej efektívnosti [142].

(1) Prírastkové náklady životných cyklov	€/autobus					
a) CNG-Std. BS-I/II (-) Nafta-Std. BS-I/II	22 936					
b) CNG-LF BS-III/IV (-) Nafta-LF BS-III/IV	15 182					
c) CNG-LF BS-III/IV (-) Nafta-Std. BS-III/IV	109 797					
d) Nafta-Std. BS-III/IV (-) Nafta-Std. BS-I/II	12 268					
(2) Rozdiely v emisiách počas prevádzkovej životnosti autobusu	PM_{2,5} (kg)	NO_x (kg)	CO₂(e) (t)	CH₄ (kg)	CO₂(e) (t)	BC (kg)
a) Nafta-Std. BS-I/II (-) CNG-Std. BS-I/II	5 473	-7 610	1 274	-4 119	-166	2 603
b) Nafta-LF BS-III/IV (-) CNG-LF BS-III/IV	2 090	-3 595	379	-2 425	-147	994
c) Nafta-Std. BS-III/IV (-) CNG-LF BS-III/IV	1 924	-6 335	162	-2 425	-318	917
d) Nafta-Std. BS-I/II (-) Nafta-Std. BS-III/IV	3 803	22 832	940	780	-128	1750
(3) Pomer nákladovej efektívnosti = [(1) + (2)]	PM_{2,5} (€/kg⁻¹)	NO_x (€/kg⁻¹)	CO₂(e) (€/t⁻¹)	CH₄ (€/kg⁻¹)	CO₂(e) (€/t⁻¹)	BC (€/kg⁻¹)
a) CNG-Std. BS-I/II vs. Nafta-Std. BS-I/II	4,2	-3,0	17,6	-5,5	-138,1	8,8
b) CNG-LF BS-III/IV vs. Nafta-LF BS-III/IV	7,3	-4,2	40,5	-6,2	-102,9	15,3
c) CNG-LF BS-III/IV vs. Nafta-Std. BS-III/IV	57,1	-17,3	678,4	-45,3	-344,9	119,7
d) Nafta-Std. BS-III/IV vs. Nafta-Std. BS-I/II	3,3	0,5	13,2	15,8	-95,9	7,0

Ďalšia štúdia z Indie dokazuje, že čisto z hľadiska nákladov na životný cyklus bez uváženia benefitov zníženia emisií a zlepšenia kvality vzduchu bola prevádzka CNG autobusov nižších štandardov podobná ako prevádzka naftových autobusov a pri CNG autobusoch vyšších štandardov je cena životného cyklu mierne vyššia v porovnaní s naftovými autobusmi (**obrázok 5.1**) [143].

Na základe predikcie rastu populácie v Indii do roku 2035 bola vypracovaná štúdia optimálneho zastúpenia vozidiel na alternatívny pohon pre maximalizáciu znižovania emisií a minimalizáciu nákladov. Skúmali sa scenáre s rôznou mierou zastúpenia viacerých druhov vozidiel s alternatívnym pohonom. Najviac zastúpeným druhom vozidiel s alternatívnym pohonom vo všetkých scenároch boli vozidlá na elektrický pohon. Scenáre s najvyšším skóre však uvažovali aj s malým podielom vozidiel na CNG a dosahovali zníženie emisií skleníkových plynov o 54 % v porovnaní s hodnotami z roku 2022 [144]. Niektoré štúdie však naznačujú, že CNG vozidlá sú v porovnaní s benzínovými vozidlami menej výhodné kvôli nižšej kapacite palivovej nádrže a častejšej potrebe dopĺňania paliva [145].



Obrázok 5.1 Grafické znázornenie výpočtov nákladov na životný cyklus pri diskontnej sadzbe 12 % (Std. – štandardný model, LF – nízkopodlažný model, LF/AC – nízkopodlažný model s klimatizáciou) [143].

Záver

Stlačený zemný plyn fosílného alebo bio-pôvodu sa dnes ukazuje ako jedna z najzaujímavejších alternatív ku klasickým kvapalným fosílnym palivám – benzínu, nafte a LPG. Na základe podrobnej rešerše je možné zhrnúť viacero poznatkov, ktoré odhaľujú jeho prednosti, limity aj perspektívy.

V úvodných častiach bolo ukázané, že zemný plyn patrí medzi najčistejšie fosílné palivá. Má jednoduchšie zloženie než ropa, tvorí ho prevažne metán a už samotná jeho ťažba a úprava je menej energeticky náročná než spracovanie ropy. História využívania CNG siaha do 19. storočia a potvrdzuje, že nejde o krátkodobý trend, ale o riešenie s dlhodobým technologickým základom. V posledných desaťročiach sa navyše výrazne rozvinula infraštruktúra plniacich staníc a technológie vysokotlakových zásobníkov.

Údaje o fyzikálno-chemických vlastnostiach ukázali jasné rozdiely medzi CNG a kvapalnými palivami. Výhodou CNG je vysoké oktánové číslo a nižší obsah uhlíka, čo znamená menšiu uhlíkovú stopu pri jeho spaľovaní. Z pohľadu prevádzky to umožňuje motorom pracovať pri vyššom kompresnom pomere a dosahovať čisté spaľovanie. V porovnaní s benzínom a naftou má však CNG nižšiu energetickú hustotu, a preto vozidlá dosahujú kratší dojazd a potrebujú väčšie alebo viaceré nádrže. Tento kompromis je významný pri posudzovaní praktického využitia CNG ako pohonnej hmoty.

Pri porovnaní výhod a nevýhod je zdôraznené, že CNG má priaznivejší profil emisií než benzín, nafta aj LPG. Rovnaký ekologický benefit vyplynul aj z prípadovej štúdie (viď Príloha, Prípadová štúdia: Kúpa 12 m dlhého mestského autobusu — CNG vs. nafta), v ktorej je porovnaný autobus na CNG a autobus jazdiaci na naftu. Z hľadiska bezpečnosti je výhodou CNG, že metán je ľahší než vzduch a pri úniku stúpa nahor, čím sa znižuje riziko výbuchu v uzavretých priestoroch – v kontraste s LPG, ktoré sa drží pri zemi. Nevýhodou CNG ostáva kratší dojazd a vyššie náklady na tlakové zásobníky.

Pri hodnotení typov vozidiel sa ukázalo, že existujú tri základné koncepcie: monopolívové vozidlá, ktoré jazdia výlučne na CNG; bi-fuel vozidlá umožňujúce prepínanie medzi benzínom a plynom; a dual-fuel vznetové motory kombinujúce CNG s menším množstvom nafty. Každý typ má svoje výhody – monopolívové autá naplno využívajú vysoké oktánové číslo plynu, bi-fuel riešenia ponúkajú flexibilitu pri tankovaní, a duálne motory umožňujú úsporu nafty v nákladnej doprave. Technicky je teda CNG univerzálnym palivom a umožňuje doplniť rôzne typy pohonov.

Kľúčovým faktorom pri rozširovaní CNG je infraštruktúra. Nádrže na CNG musia odolávať vysokému tlaku a vyrábajú sa z ocele, hliníka či moderných kompozitov. Najmodernejšie kompozitné nádrže sú ľahšie a bezpečnejšie, no aj drahšie. Pri plnení nádrže rozlišujeme rýchle, pomalé a kombinované stanice. Rýchle plnenie sa približuje komfortu tankovania benzínu, zatiaľ čo pomalé plnenie sa hodí pre podnikové flotily, ktoré môžu dopĺňať pohonné hmoty vozidiel počas noci. Kombinované riešenia poskytujú flexibilitu, no sú investične náročnejšie. Rozvoj siete staníc je preto rozhodujúci pre širšie rozšírenie CNG.

Dôležitou témou sú ekologické aspekty použitia CNG ako pohonnej hmoty. Spaľovanie CNG znamená výrazne nižšie emisie CO₂ a NO_x, ako aj takmer nulové emisie pevných častíc, v porovnaní s ropnými produktami. To má zásadný význam pre zlepšovanie kvality ovzdušia. Ešte dôležitejší je však príspevok biometánu – obnoviteľného ekvivalentu zemného plynu. Po vyčistení bioplynu možno získať bio-CNG

alebo bio-LNG, ktoré dokážu plnohodnotne nahradiť fosílné palivo a dramaticky znížiť uhlíkovú stopu dopravy. V tejto oblasti má Európa, vrátane Slovenska, veľký potenciál.

Rešerš zároveň poukázala na existenciu ďalších alternatívnych palív – ako bionafta FAME, hydrorafinované oleje HVO, bioetanol či vodík. V porovnaní s nimi má CNG výhodu, že táto alternatíva je technologicky vyspelá, dostupná a už dnes má svoje miesto na trhu. Vodík a elektromobilita predstavujú dlhodobjšie riešenia, no vyžadujú ešte výrazné investície do infraštruktúry a výroby. CNG tak možno chápať ako praktické „prechodové“ palivo, ktoré je okamžite využiteľné a pritom výrazne ekologickejšie než benzín a nafta.

Informácie o ekonomike používania CNG potvrdili, že cena CNG na 100 prejdených kilometrov býva nižšia v porovnaní s tradičnými kvapalnými palivami, čo môže byť významnou motiváciou. Nevýhodou sú však vyššie vstupné náklady na vozidlá aj infraštruktúru. Investície do plniacich staníc a zásobníkov sú finančne náročné a môžu spomaľovať ich rozšírenie. Na druhej strane, ak sa rozvinie produkcia biometánu a vznikne stabilná sieť staníc, môže sa CNG stať ekonomicky aj ekologicky najvýhodnejšou možnosťou.

Zhrnutím všetkých poznatkov možno konštatovať, že CNG je palivo s reálnym potenciálom výrazne prispieť k zníženiu emisií v doprave. Má jasné výhody – nižšie emisie, vysokú bezpečnosť pri úniku plynu, technologickú dostupnosť a možnosť prechodu na obnoviteľný biometán. Nevýhody sú tiež zreteľné – kratší dojazd, potreba vysokotlakových nádrží a zatiaľ nedostatočne rozvinutá infraštruktúra. Citované informácie potvrdzujú, že na Slovensku vo viacerých mestách prebieha nákup nových mestských a prímestských autobusov na CNG. Pri uplatnení vozidiel poháňaných CNG v mestskej a prímestskej hromadnej doprave nie je problematický ich limitovaný dojazd. Zároveň prevádzka autobusov poháňaných CNG pomôže zlepšiť kvalitu ovzdušia v mestách. Z tohto pohľadu je CNG typickým „mostným“ palivom – riešením, ktoré umožní prechod od tradičných fosílnych palív k udržateľnejším alternatívam.

Budúcnosť CNG bude závisieť od investícií do infraštruktúry, ale aj od toho, do akej miery sa podarí rozvinúť výrobu biometánu. Ak sa tieto podmienky naplnia, môže sa CNG stať nielen ekologickou, ale aj ekonomickou voľbou pre osobnú a hlavne nákladnú dopravu. Už dnes má svoje pevné miesto a jeho rozvoj môže predstavovať jeden z kľúčových krokov k udržateľnej doprave najbližších desaťročí.

Príloha

Prípadová štúdia: Kúpa 12 m dlhého mestského autobusu — CNG vs. nafta

Predpoklady

Táto prípadová štúdia modeluje situáciu existujúceho dopravného podniku s vybudovanou infraštruktúrou na tankovanie motorovej nafty, ktorý plánuje zakúpiť dvadsať nových autobusov buď na CNG pohon, alebo na naftu. Štúdia porovnáva obstarávacie náklady, investíciu do novej infraštruktúry na plnenie CNG, spotrebu paliva, ročné prevádzkové náklady a v neposlednom rade ekologické faktory.

Základné parametre vozidla

- Typ vozidla: 12 m dlhý mestský nízkopodlažný autobus.
- Ročný nájazd: 60 000 km.

Obstarávacía cena vozidla

- Naftový autobus (nový, 12 m): 240 000 € [146].
- CNG autobus: +12 % oproti nafte (stredná hodnota v literatúre: +10 – 15 %) → 268 800 € (platí pre nové dedikované CNG vozidlá) [147].

Investícia do infraštruktúry

- Stavba/úprava CNG plniacej stanice pre depot [148], tieto náklady sú v rozsahu 400 000 € – 1,5 milióna € (v závislosti od typu stanice s rýchlym plnením (fast-fill) / s pomalým plnením (time-fill), kapacity a lokality). Pre príklad použijeme hodnotu: 800 000 €, ktorá vychádza z kapacity pre 20 nových autobusov. V prípade autobusov s naftovým pohonom sa predpokladá existencia podnikovej čerpacej stanice t.j. žiadne nové investície do plniacej stanice nie sú potrebné.

Spotreba paliva

- Naftový autobus mestská doprava 35 až 55 l na 100 km: počítame s hodnotou 45 l.(100 km)⁻¹.
- CNG autobus: 30 – 40 kg na 100 km; použijeme priemer 35 kg.(100 km)⁻¹.
- Nafta: 1,18 €.l⁻¹ (priemerná cena na čerpacích staniach bez DPH, september 2025, SR) [149], [150]
- CNG: 1,35 €.kg⁻¹ (priemerná cena na čerpacích staniach bez DPH, september 2025, SR) [149], [150]

Ostatné ročné prevádzkové náklady

- Základná údržba + diely + rezervy (nafta): nastavíme 0,30 €.km⁻¹ → pre 60 000 km = 18 000 €.rok⁻¹ (toto zahŕňa bežné opravy, servis, práce; reálne sa líši podľa mesta).
- Údržba CNG: +15 % oproti naftovému autobusu → 0,35 €.km⁻¹ → ročne 20 700 € [147].
- Poistenie, administratíva: odhad 3 000 €.rok⁻¹ (rovnako pre oba typy).

- Pneumatiky + drobný materiál (obe): 3 000 €.rok⁻¹ (priemerná trhová cena).

Výpočet — ročné prevádzkové náklady (prípadová štúdia)

Náklady na palivo (ročne)

- Autobus na naftu: Spotreba približne 45 l na 100 km → pri 60 000 km = $(60\,000 / 100) * 45 = 27\,000$ l.rok⁻¹. Cena 1,18 €.l⁻¹ → $27\,000 * 1,18 = 31\,860$ €.rok⁻¹ (palivo).
- Autobus na CNG: Spotreba približne 35 kg na 100 km → pri 60 000 km = $(60\,000 / 100) * 35 = 21\,000$ kg.rok⁻¹. Cena 1,35 €.kg⁻¹ → $21\,000 * 1,35 = 28\,350$ €.rok⁻¹(palivo).

Údržba a servis (ročne)

- Autobus na naftu: 0,30 €.km⁻¹ → 18 000 €.rok⁻¹ (pri 60 000 km).
- Autobus na CNG: +15% → 20 700 €.rok⁻¹.
- Iné prevádzkové náklady (ročne): (poistenie, pneumatiky, malé materiály) — rovnaké pre oba: 6 000 €.rok⁻¹.

Amortizácia infraštruktúry (CNG)

- Predpokladaná investícia do stanice: 800 000 €; amortizácia je počítaná na 15 rokov → ročne 53 333 €.
- Ak táto stanica slúži 20 autobusom, ročný podiel na jeden autobus $53\,333 \text{ €} / 20 = 2\,667 \text{ €.rok}^{-1}$.

Tabuľka P1 Sumár — ročné náklady.

Položka	Nafta (€.rok ⁻¹)	CNG (€.rok ⁻¹)
Palivo	31 860	28 350
Údržba & servis	18 000	20 700
Poistenie + pneumatiky + drobné	6 000	6 000
Infraštruktúra (CNG)	—	2 667
Spolu (ročné OPEX)	55 860	57 717
Investičné náklady (CAPEX)	240 000	268 800*

*Investičné náklady do infraštruktúry sa rozrátali a ako amortizácia (počítaná na 15 rokov) sa zahrnuli do OPEX.

Investičné náklady na autobus s CNG pohonom sú zhruba o 12 % vyššie. Ročné prevádzkové náklady sú pre obidva typy paliva porovnateľné v rámci zvoleného základu výpočtu. Naproti tomu však CNG poskytne rad environmentálnych benefitov. V **tabuľke P2** sa porovnávajú kľúčové environmentálne faktory:

Tabuľka P2 Stručné porovnanie ekologických faktorov autobusov poháňaných naftou a CNG.

parameter	autobus na naftu	autobus na CNG	Ref.
CO ₂ /km (Well-to-Wheel)	1 300 – 1 600 g.km ⁻¹	970 – 1 300 g.km ⁻¹ (-20 % až -25 %)	[151]
Uhlíková stopa CO ₂ e	vyššia uhlíková intenzita	až o ~18 % nižšie (RNG až o 88 %)	[152]
Externé náklady CO ₂	vyššie	znižujú o 2 – 24 % (model)	[153]
Častice (PM)	vysoké (100 – 200 mg.km ⁻¹) s filtrom (desiatky mg.km ⁻¹)	omnoho nižšie (1 – 3 mg.km ⁻¹)	[154]
NO _x (mestský režim)	cca 2 g.km ⁻¹ (Euro VI)	cca 0,6 g.km ⁻¹ – výrazne nižšie	[155]
CO, VOC, NMHC	nižšie (pred úpravou)	vyššie (pred úpravou), po úpravách obdobné	[156]

Záverom je možné konštatovať, že výpočet ročných nákladov na prevádzku, údržbu, poistenie a infraštruktúru závisí od počtu obstarávaných autobusov u dopravcu (rozdelenie obstarávacích nákladov na plniacu stanicu), od typu autobusu, jeho obstarávacej ceny, priemernej spotreby, ročného nájazdu kilometrov a zazmluvnenej ceny palív. Táto cena je spravidla nižšia, než cena palív na čerpacích staniach, ktorá bola použitá v uvedenom referenčnom výpočte. Preto je vždy potrebné vypracovať kalkuláciu pre konkrétneho dopravcu v konkrétnom časovom období.

Použité zdroje

- [1] "Statistical Review of World Energy 2025". Cit: 04. október 2025. [Online]. Available at: <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- [2] "bp Statistical Review of World Energy 2021". Cit: 04. október 2025. [Online]. Available at: <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-statistical-review-of-world-energy-2021-a-dramatic-impact-on-energy-markets.html>
- [3] E. Himona a A. Poullikkas, "Comparative Review of Natural Gas Vehicles During the Energy Transition", *Energies* 2025, Vol. 18, Page 3512, roč. 18, č. 13, s. 3512, júl. 2025, doi: 10.3390/EN18133512.
- [4] G. T. Chala, A. R. A. Aziz, a F. Y. Hagos, "Natural Gas Engine Technologies: Challenges and Energy Sustainability Issue", *Energies* 2018, Vol. 11, Page 2934, roč. 11, č. 11, s. 2934, okt. 2018, doi: 10.3390/EN11112934.
- [5] "Compressed Natural Gas (CNG) as fuel | Climate Technology Centre & Network | 1184949". Cit: 09. september 2025. [Online]. Available at: <https://www.ctc-n.org/technology-library/vehicle-and-fuel-technologies/compressed-natural-gas-cng-fuel>
- [6] "bp Energy Outlook 2025". Cit: 04. október 2025. [Online]. Available at: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>
- [7] "Global NGV fleet reaches 29.5mn in 2020: IGU". Cit: 06. október 2025. [Online]. Available at: https://www.naturalgasworld.com/global-ngv-fleet-reaches-29.5mn-in-2020-igu-88803?utm_source=chatgpt.com
- [8] "Gas Bag Vehicles | LOW←TECH MAGAZINE". Cit: 14. august 2025. [Online]. Available at: <https://solar.lowtechmagazine.com/2011/11/gas-bag-vehicles>
- [9] "The History of CNG Vehicles: A Journey Towards Cleaner Transportation Amazing 24". Cit: 14. august 2025. [Online]. Available at: <https://autocarweb.com/the-history-of-cng-vehicles-a-journey-towards-clean/>
- [10] D. Stenning, "The Coselle CNG carrier : a new way to ship natural gas by sea", 1999. Cit: 14. august 2025. [Online]. Available at: <https://inis.iaea.org/records/9c571-42j17>
- [11] "CNG Technology: How It Has Evolved Over The Years | CarDekho.com". Cit: 14. august 2025. [Online]. Available at: <https://www.cardekho.com/india-car-news/evolution-of-cng-technology-and-cars-over-the-years-30935.htm>
- [12] Speight James G., *Natural Gas: A Basic Handbook*, 2. vyd. Oxford: Elsevier, 2019.
- [13] A. Bahadori, *Natural Gas Processing*. Gulf Professional Publishing, 2014. doi: 10.1016/C2013-0-13070-X.
- [14] S. Trivedi, R. Prasad, A. Mishra, A. Kalam, a P. Yadav, "Current scenario of CNG vehicular pollution and their possible abatement technologies: an overview", *Environmental Science and Pollution Research*, roč. 27, č. 32, s. 39977–40000, nov. 2020, doi: 10.1007/S11356-020-10361-7/TABLES/12.

- [15] M. I. Khan, T. Yasmin, a A. Shakoor, “Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 51, s. 785–797, nov. 2015, doi: 10.1016/J.RSER.2015.06.053.
- [16] Blažek Josef a Rábl Vratislav, *Základy zpracování a využití ropy*, 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. Cit: 22. august 2025. [Online]. Available at: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-619-2/pages-img/obsah.html
- [17] J. G. Speight, “Fuels | Oil-Based”, *Encyclopedia of Analytical Science*, s. 97–106, jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-409547-2.14561-5.
- [18] “Compressed Natural Gas Fuel Use Training Manual”, sep. 1992, doi: 10.21949/1503647.
- [19] “Vyhláška č. 271/2011 Z. z. Vyhláška Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky, ktorou sa ustanovujú kritériá trvalej udržateľnosti a ciele na zníženie emisií skleníkových plynov z pohonných látok”. Cit: 04. november 2025. [Online]. Available at: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/slo124738.pdf>
- [20] M. I. Khan, T. Yasmeen, M. I. Khan, M. Farooq, a M. Wakeel, “Research progress in the development of natural gas as fuel for road vehicles: A bibliographic review (1991–2016)”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 66, s. 702–741, dec. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2016.08.041.
- [21] L. Raslavičius, A. Keršys, S. Mockus, N. Keršiene, a M. Starevičius, “Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport”, 2014, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.052.
- [22] “LPG vehicles in Underground Parking”, sep. 2016. [Online]. Available at: <http://www.bauordnung.at/oesterreich/salzburg>
- [23] B. Elvers a A. Schurtze, Ed., *Handbook of Fuels*, Second. Weinheim: Wiley-VCH GmbH, 2022.
- [24] “Alternative Fuels Data Center: Natural Gas Vehicles”. Cit: 22. august 2025. [Online]. Available at: <https://afdc.energy.gov/vehicles/natural-gas>
- [25] M. I. Jahirul, H. H. Masjuki, R. Saidur, M. A. Kalam, M. H. Jayed, a M. A. Wazed, “Comparative engine performance and emission analysis of CNG and gasoline in a retrofitted car engine”, *Appl Therm Eng*, roč. 30, č. 14–15, s. 2219–2226, okt. 2010, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2010.05.037.
- [26] “(PDF) OCTANE NUMBER”. Cit: 22. august 2025. [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/348336480_OCTANE_NUMBER#fullTextFileContent
- [27] “The Basics of CNG Storage - CNG”. Cit: 22. október 2025. [Online]. Available at: https://www.cngwire.com/the-basics-of-cng-storage/?utm_source=chatgpt.com
- [28] M. Farzaneh-Gord, M. Deymi-Dashtebayaz, a H. R. Rahbari, “Studying effects of storage types on performance of CNG filling stations”, *J Nat Gas Sci Eng*, roč. 3, č. 1, s. 334–340, mar. 2011, doi: 10.1016/J.JNGSE.2011.02.001.
- [29] “Virtual Pipeline Solutions - companies offering CNG via the virtual pipeline”. Cit: 22. august 2025. [Online]. Available at: <https://cngdelivery.com/virtual-pipeline/>

- [30] “Alternative Fuels Data Center: Compressed Natural Gas Fueling Stations”. Cit: 22. august 2025. [Online]. Available at: <https://afdc.energy.gov/fuels/natural-gas-cng-stations>
- [31] Mokhatab Saeid, Poe William A., a Speight James G., *Handbook of Natural Gas: Transmission and Processing*, 2. vyd. Burlington: Elsevier, 2017.
- [32] Y. Ni, L. Yao, F. Liao, J. Chen, C. Yu, a G. Zhu, “Geochemical Comparison of the Deep Gases From the Sichuan and Tarim Basins, China”, *Front Earth Sci (Lausanne)*, roč. 9, s. 634921, apr. 2021, doi: 10.3389/FEART.2021.634921/BIBTEX.
- [33] L. Zhu, L. Li, J. Zhu, L. Qin, a J. Fan, “Analytical methods to calculate water content in natural gas”, *Chemical Engineering Research and Design*, roč. 93, s. 148–162, jan. 2015, doi: 10.1016/J.CHERD.2014.05.021.
- [34] “What is CNG fuel? A detailed explanation”. Cit: 22. august 2025. [Online]. Available at: <https://group.met.com/en/media/energy-insight/cng-fuel/>
- [35] V. Pandey, I. A. Badruddin, a T. M. Y. Khan, “Effect of H2 blends with compressed natural gas on emissions of SI engine having modified ignition timings”, *Fuel*, roč. 321, s. 123930, aug. 2022, doi: 10.1016/J.FUEL.2022.123930.
- [36] “ETC CM report 2025/01: Fuel quality monitoring in the EU in 2023 — Eionet Portal”. Cit: 04. november 2025. [Online]. Available at: https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-cm/products/etc-cm-report-2025-01?utm_source=chatgpt.com
- [37] “Differences & Advantages of LNG and Natural Gas | THINK Gas”. Cit: 22. august 2025. [Online]. Available at: <https://www.think-gas.com/blogs/lng-vs-natural-gas-understanding-the-differences-and-benefits>
- [38] S. Rotaru *et al.*, “CNG impact on combustion quality of a diesel engine fueled in diesel-gas mode”, *Heliyon*, roč. 10, č. 15, s. e35010, aug. 2024, doi: 10.1016/J.HELİYON.2024.E35010.
- [39] T. H. Nguyen *et al.*, “A comprehensive review of compressed natural gas (CNG)-fueled engines under different operating conditions and combustion strategies on performance and combustion characteristics”, *Energy and Environment*, roč. 36, č. 3, s. 1536–1576, máj. 2025, doi: 10.1177/0958305X251315402;JOURNAL:JOURNAL:EAEA.
- [40] “MB Energy Holding - Glossary: CNG (compressed natural gas)”. Cit: 22. august 2025. [Online]. Available at: <https://www.mbenergy.com/global/en/news-info/industry-glossary-energy-encyclopaedia/cng-compressed-natural-gas/>
- [41] “Working Document of the Npc Future Transportation Fuels Study Made Production of Alternative Liquid Hydrocarbon Transportation Fuels from Natural Gas, Coal, and Coal and Biomass (xtl)”.
- [42] G. Palmer, “Methane Number”, *Journal of Natural Gas Engineering*, roč. 2, č. 2, s. 134–142, nov. 2018, doi: 10.7569/JNGE.2017.692506.
- [43] D. H. Tjojudo a S. Kartohardjono, “Methane Number Improvement of Gas from LNG Regasification Unit”, *E3S Web of Conferences*, roč. 67, s. 04033, nov. 2018, doi: 10.1051/E3SCONF/20186704033.
- [44] P. Sarothi Roy, C. Ryu, S. K. Dong, a C. S. Park, “Development of a natural gas Methane Number prediction model”, *Fuel*, roč. 246, s. 204–211, jún. 2019, doi: 10.1016/J.FUEL.2019.02.116.

- [45] “Technical Statement on Commercial Natural Gas in CNG-and LNG-Fueled Mobile Heavy-Duty Engine Applications”, Chicago, jún. 2014. Cit: 22. august 2025. [Online]. Available at: <https://www.truckandenginemanufacturers.org/file.asp?A=Y&F=EMA+-+Technical+Position+Statement+-+Natural+Gas+Fuels.pdf&N=EMA+-+Technical+Position+Statement+-+Natural+Gas+Fuels.pdf&C=documents>
- [46] D. R. Michanowicz *et al.*, “Natural gas odorants: A scoping review of health effects”, *Curr Environ Health Rep*, roč. 10, č. 3, s. 337–352, sep. 2023, doi: 10.1007/S40572-023-00403-W,.
- [47] Uwaezuoke N., Izuwa N., a Onwukwe S. I., “Water Content of Sweet Natural Gas: A Simplified Formula-Based Approach - CORE Reader”, *Advances in Petroleum Exploration and Development*, roč. 17, č. 1, s. 114–121, 2019, Cit: 22. august 2025. [Online]. Available at: <https://core.ac.uk/reader/236297180>
- [48] N. Petchers, “Integrated Approach to Energy Resource Optimization Projects”, v *Combined Heating, Cooling & Power Handbook*, New York: River Publishers, 2020. doi: 10.1201/9781003151692.
- [49] M. Farzaneh-Gord, A. Niazmand, M. Deymi-Dashtebayaz, a H. R. Rahbari, “Effects of natural gas compositions on CNG (compressed natural gas) reciprocating compressors performance”, *Energy*, roč. 90, s. 1152–1162, okt. 2015, doi: 10.1016/J.ENERGY.2015.06.056.
- [50] M. Ehsan, “Effect of Spark Advance on a Gas Run Automotive Spark Ignition Engine”, *Journal of Chemical Engineering*, roč. 24, č. 1, s. 42–49, júl. 2006, doi: 10.3329/JCE.V24I0.5584.
- [51] Hassan Sahid, Momin Sourove Akther, Dutta Mihir, Iftakher Shovon, a Kader Golam, “Study of LPG (Liquefied Petroleum Gas) And CNG (Compressed Natural Gas) Vehicles And It’s Future Aspects”, v *International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering 2016*, Khulna, dec. 2016. Cit: 22. august 2025. [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/341450385_Study_of_LPG_Liquefied_Petroleum_Gas_And_CNG_Compressed_Natural_Gas_Vehicles_And_It’s_Future_Aspects
- [52] “CNG vs. LPG: A Detailed Comparison”. Cit: 22. august 2025. [Online]. Available at: <https://ioagpl.com/cng-vs-lpg/>
- [53] A. Alagumalai, “Internal combustion engines: Progress and prospects”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 38, s. 561–571, okt. 2014, doi: 10.1016/J.RSER.2014.06.014.
- [54] R. A. Bakar a A. R. Ismail, “Compressed natural gas as an alternative fuel for internal combustion engines: A technical review”, *International Review of Mechanical Engineering*, roč. 3, č. 2, s. 188–195, 2009, Cit: 22. august 2025. [Online]. Available at: <https://scholar.its.ac.id/en/publications/compressed-natural-gas-as-an-alternative-fuel-for-internal-combus>
- [55] C. C. Enweremadu a H. L. Rutto, “Combustion, emission and engine performance characteristics of used cooking oil biodiesel—A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 14, č. 9, s. 2863–2873, dec. 2010, doi: 10.1016/J.RSER.2010.07.036.
- [56] M. U. Aslam, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, H. Abdesselam, T. M. I. Mahlia, a M. A. Amalina, “An experimental investigation of CNG as an alternative fuel for a retrofitted gasoline vehicle”, *Fuel*, roč. 85, č. 5–6, s. 717–724, mar. 2006, doi: 10.1016/J.FUEL.2005.09.004.

- [57] R. Singh, "PERFORMANCE AND EXHAUST GAS EMISSIONS ANALYSIS OF DIRECT INJECTION CNG-DIESEL DUAL FUEL ENGINE", *International Journal of Engineering Science and Technology*, roč. 4, č. 3, mar. 2012.
- [58] T. B. Shinde, "Experimental investigation on effect of combustion chamber geometry and port fuel injection system for CNG engine", 2012. [Online]. Available at: www.iosrjen.org
- [59] F. Ma, Y. Wang, H. Liu, Y. Li, J. Wang, a S. Zhao, "Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine", *Int J Hydrogen Energy*, roč. 32, č. 18, s. 5067–5075, dec. 2007, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2007.07.048.
- [60] A. L. Jones a R. L. Evans, "Comparison of Burning Rates in a Natural-Gas-Fueled Spark Ignition Engine", *J Eng Gas Turbine Power*, roč. 107, č. 4, s. 908–913, okt. 1985, doi: 10.1115/1.3239835.
- [61] P. Gupta, W. Zhuge, S. Luo, a F. Ma, "The well-to-wheel analysis of hydrogen enriched compressed natural gas for heavy-duty vehicles using life cycle approach to a fuel cycle", *International Journal of Low-Carbon Technologies*, roč. 14, č. 3, s. 432–439, sep. 2019, doi: 10.1093/ijlct/ctz020.
- [62] H. M. Cho a B. Q. He, "Spark ignition natural gas engines—A review", *Energy Convers Manag*, roč. 48, č. 2, s. 608–618, feb. 2007, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2006.05.023.
- [63] J. Berghmans a M. Vanierschot, "Safety Aspects of CNG Cars", *Procedia Eng*, roč. 84, s. 33–46, jan. 2014, doi: 10.1016/J.PROENG.2014.10.407.
- [64] "Directive - 2009/28 - EN - Renewable Energy Directive - EUR-Lex". Cit: 04. október 2025. [Online]. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/28/oj/eng>
- [65] R. L. Naylor a M. M. Higgins, "The political economy of biodiesel in an era of low oil prices", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 77, s. 695–705, sep. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2017.04.026.
- [66] M. Aldhaidhawi, R. Chiriac, a V. Badescu, "Ignition delay, combustion and emission characteristics of Diesel engine fueled with rapeseed biodiesel – A literature review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 73, s. 178–186, jún. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2017.01.129.
- [67] "Directive - 2018/2001 - EN - EUR-Lex". Cit: 04. október 2025. [Online]. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1759587121413&uri=CELEX%3A32018L2001>
- [68] "Renewable Energy Directive". Cit: 28. júl 2025. [Online]. Available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en
- [69] "Renewable energy: Council adopts new rules - Consilium". Cit: 11. september 2025. [Online]. Available at: https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/10/09/renewable-energy-council-adopts-new-rules/?utm_source=chatgpt.com
- [70] "[nrg_ind_ren] Share of energy from renewable sources". Cit: 11. september 2025. [Online]. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_ren__custom_15120255/default/table?lang=en

- [71] “Compressed Natural Gas (CNG) as fuel | Climate Technology Centre & Network | 1184949”. Cit: 25. august 2025. [Online]. Available at: <https://www.ctc-n.org/technology-library/vehicle-and-fuel-technologies/compressed-natural-gas-cng-fuel>
- [72] R. Gioria *et al.*, “Regulated and unregulated emissions from Euro VI Diesel and CNG heavy-duty vehicles”, *Transp Res D Transp Environ*, roč. 134, s. 104349, sep. 2024, doi: 10.1016/J.TRD.2024.104349.
- [73] “CNG cars are the most environmentally friendly! | CNG-Mobility”. Cit: 25. august 2025. [Online]. Available at: <https://www.cng-mobility.ch/en/beitrag/cng-cars-are-the-most-environmentally-friendly/>
- [74] “ADAC Ecotest 2024: Das sind die saubersten Autos”. Cit: 25. august 2025. [Online]. Available at: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/ecotest/ecotest-ranking-sauberste-autos/>
- [75] A. Kovacs, “The prospects of biomethane as a road transport fuel in Europe”, *MOL Group Professional J.*, roč. 1, s. 42–51, 2015.
- [76] Y. Li *et al.*, “Composition and Toxicity of Biogas Produced from Different Feedstocks in California”, *Environ Sci Technol*, roč. 53, č. 19, s. 11569–11579, 2019, doi: 10.1021/ACS.EST.9B03003/ASSET/IMAGES/MEDIUM/ES9B03003_M002.GIF.
- [77] A. Calbry-Muzyka, H. Madi, F. Rüscher-Pfund, M. Gandiglio, a S. Biollaz, “Biogas composition from agricultural sources and organic fraction of municipal solid waste”, *Renew Energy*, roč. 181, s. 1000–1007, jan. 2022, doi: 10.1016/J.RENENE.2021.09.100.
- [78] M. Balat a H. Balat, “Biogas as a renewable energy sourcea review”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, roč. 31, č. 14, s. 1280–1293, jan. 2009, doi: 10.1080/15567030802089565.
- [79] L. Yang, X. Ge, C. Wan, F. Yu, a Y. Li, “Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels”, 2014, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2014.08.008.
- [80] Tim Gould, “Outlook for Biogas and Biomethane: A global geospatial assessment”, Paris, máj. 2025. [Online]. Available at: www.iea.org
- [81] “EXECUTIVE SUMMARY Global Dynamics, Drivers and Challenges”, máj. 2025. Cit: 01. august 2025. [Online]. Available at: <https://www.cedigaz.org/shop-with-selector/?type=publications&search=GLOBAL%20BIOMETHANE%20MARKET%202025>
- [82] “Statistical Review of World Energy 2025 | 74 th edition In collaboration with”, London, 2025. [Online]. Available at: www.energyinst.org/statistical-review
- [83] M. Gustafsson *et al.*, “A perspective on the state of the biogas industry in 12 member countries of IEA Bioenergy Task 37”, sep. 2024.
- [84] “EUROPEAN INFRASTRUCTURE FOR BIOMETHANE PRODUCTION 2023”. Cit: 15. júl 2025. [Online]. Available at: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2023/05/GIE_EBA_Biomethane-Map-2022-2023.pdf
- [85] “Countries-leaders in the production of biomethane”. Cit: 15. júl 2025. [Online]. Available at: <https://uabio.org/en/materials/analytics/14227/>

- [86] "Biggest biomethane plants in Europe | Technologies and experience". Cit: 15. júl 2025. [Online]. Available at: <https://uabio.org/en/materials/13496/>
- [87] "Prvá bioplynová stanica na Slovensku vyrába biometán. Využíva na to odpad (FOTO) | ENERGIE-PORTAL.SK". Cit: 15. júl 2025. [Online]. Available at: <https://www.energie-portal.sk/Dokument/bioplynova-stanica-vyraba-biometan-107870.aspx>
- [88] "Pribudla druhá výroba biometánu na Slovensku. Obnoviteľný plyn budú vtláčať do siete | ENERGIE-PORTAL.SK". Cit: 15. júl 2025. [Online]. Available at: <https://www.energie-portal.sk/Dokument/velke-bierovce-vyroba-biometanu-bioplynova-stanica-111582.aspx>
- [89] V. Vrbová a K. Ciahotný, "Upgrading Biogas to Biomethane Using Membrane Separation", *Energy and Fuels*, roč. 31, č. 9, s. 9393–9401, sep. 2017, doi: 10.1021/ACS.ENERGYFUELS.7B00120/ASSET/IMAGES/LARGE/EF-2017-001209_0005.JPEG.
- [90] M. Noussan, V. Negro, M. Prussi, a D. Chiamonti, "The potential role of biomethane for the decarbonization of transport: An analysis of 2030 scenarios in Italy", *Appl Energy*, roč. 355, feb. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122322.
- [91] "Energy partnership turns biogas into fuel for San Antonio buses". Cit: 15. júl 2025. [Online]. Available at: <https://www.expressnews.com/business/article/via-cps-energy-edl-republic-services-rng-buses-20397652.php>
- [92] "European Cities Leading the Biomethane Public Transport - Sempre-Bio". Cit: 15. júl 2025. [Online]. Available at: <https://sempre-bio.com/european-cities-leading-the-biomethane-public-transport/>
- [93] "LNG and CNG Trucks: How Sustainable Are Gas Trucks | DHL Freight". Cit: 15. júl 2025. [Online]. Available at: <https://dhl-freight-connections.com/en/sustainability/lng-and-cng-trucks-how-sustainable-are-gas-powered-trucks-in-road-freight/>
- [94] "Solaris Urbino 15 CNG • imhd.sk Bratislava". Cit: 04. august 2025. [Online]. Available at: <https://imhd.sk/ba/popis-typu-vozidla/233/Solaris-Urbino-15-CNG>
- [95] "SOR NSG 18 • imhd.sk Bratislava". Cit: 04. august 2025. [Online]. Available at: <https://imhd.sk/ba/popis-typu-vozidla/1118/SOR-NSG-18>
- [96] "Nové autobusy s CNG pohonom by mal dodať opäť SOR • imhd.sk Košice". Cit: 04. august 2025. [Online]. Available at: <https://imhd.sk/ke/doc/sk/24220/Nov%C3%A9-autobusy-s-CNG-pohonom-by-mal-doda%C5%A5-op%C3%A4%C5%A5-SOR>
- [97] "DP mesta Martin: autobusy SOR NSG 12 | evidencia-dopravcov.eu". Cit: 04. august 2025. [Online]. Available at: <https://evidencia-dopravcov.eu/zoznam?trakce=autobus&iddopravce=5290&manufacturer=SOR&ntyp=NSG&typ=NSG+12>
- [98] "Vozidlá • imhd.sk Banská Bystrica". Cit: 04. august 2025. [Online]. Available at: <https://imhd.sk/bb/vozidla-menu>
- [99] "Nové CNG autobusy by mal dodať Tempus-Trans • imhd.sk Banská Bystrica". Cit: 04. august 2025. [Online]. Available at: <https://imhd.sk/bb/doc/sk/24283/Nov%C3%A9-CNG-autobusy-by-mal-doda%C5%A5-Tempus-Trans>

- [100] “Vypiekli s emisiami! Oblúbené predajne zásobuje prvý 100 % elektrický kamión | Aktuality.sk”. Cit: 04. august 2025. [Online]. Available at: <https://www.aktuality.sk/clanok/tJ2k8Q6/vypiekli-s-emisiami-oblubene-predajne-zasobuje-prvy-100-percent-elektricky-kamion/>
- [101] “LNG je dobrá zelená cesta | Alternatívne palivá LNG, CNG, BioLNG, BioCNG”. Cit: 04. august 2025. [Online]. Available at: <https://www.habolng.sk/lng-je-dobra-zelena-cesta/>
- [102] W. Soetaert a E. J. Vandamme, “Biofuels”, *Biofuels*, s. 1–242, feb. 2009, doi: 10.1002/9780470754108.
- [103] G. Knothe, J. Krahl, a J. Van Gerpen, “The Biodiesel Handbook: Second Edition”, *The Biodiesel Handbook: Second Edition*, s. 1–501, máj. 2010, doi: 10.1016/C2015-0-02453-4.
- [104] M. A. Coronado Ortega *et al.*, “Materials technological challenges for the biodiesel industry development in Mexico”.
- [105] A. Suhara *et al.*, “Biodiesel Sustainability: Review of Progress and Challenges of Biodiesel as Sustainable Biofuel”, 01. september 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/cleantechnol6030045.
- [106] “MEROOCO - najväčší producent biodieselu v Slovenskej republike”. Cit: 28. júl 2025. [Online]. Available at: <https://www.meroco.sk/sk>
- [107] “Prvá čerpacia stanica s bionaftou na Slovensku | filtreaoleje”. Cit: 28. júl 2025. [Online]. Available at: <https://filtreaoleje.sk/blog/prva-cerpacia-stanica-s-bionaftou-na-slovensku/>
- [108] M. Kuronen, S. Mikkonen, P. Aakko, a T. Murtonen, “Hydrotreated Vegetable Oil as Fuel for Heavy Duty Diesel Engines”.
- [109] M. C. Vásquez, E. E. Silva, a E. F. Castillo, “Hydrotreatment of vegetable oils: A review of the technologies and its developments for jet biofuel production”, 2017, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.biombioe.2017.07.008.
- [110] T. J. Hilbers, L. M. J. Sprakel, L. B. J. van den Enk, B. Zaalberg, H. van den Berg, a L. G. J. van der Ham, “Green Diesel from Hydrotreated Vegetable Oil Process Design Study”, *Chem Eng Technol*, roč. 38, č. 4, s. 651–657, apr. 2015, doi: 10.1002/ceat.201400648.
- [111] “Na Slovensku už môžete natankovať naftu HVO 100 vyrábanú pomocou vodíka - Národná vodíková asociácia Slovenska”. Cit: 29. júl 2025. [Online]. Available at: <https://nvas.sk/na-slovensku-uz-mozete-natankovat-naftu-hvo-100-vyrabanu-pomocou-vodika-11464/>
- [112] “KIT - reFuels – Rethinking Fuels - Practical efuels & HVO - Alles über HVO”. Cit: 30. júl 2025. [Online]. Available at: <https://www.refuels.de/english/563.php#Anker1>
- [113] Suren Rangajaru, “10 years of EU fuels policy increased EU’s reliance on unsustainable biofuels”, júl. 2021.
- [114] Nicolae Scarlat, “Advanced Biofuels in the European Union: STATUS REPORT ON TECHNOLOGY DEVELOPMENT, TRENDS, VALUE CHAINS & MARKETS, 2024”, Luxembourg, 2024. doi: 10.2760/6538066.
- [115] “Market and Industry Trends | Bioenergy”. Cit: 04. august 2025. [Online]. Available at: <https://www.ren21.net/gsr->

2024/modules/energy_supply/02_market_and_industry_trends/01_bioenergy/?utm_source=chatgpt.com

- [116] “Used Cooking Oil – European Biomass Industry Association”. Cit: 04. august 2025. [Online]. Available at: <https://www.eubia.org/cms/wiki-biomass/biomass-resources/challenges-related-to-biomass/used-cooking-oil-recycling/>
- [117] “HVO as Road Fuel – Markets and Sustainability – EnergyComment”. Cit: 04. august 2025. [Online]. Available at: https://www.energycomment.de/hvo-as-road-fuel-markets-and-sustainability/?utm_source=chatgpt.com
- [118] Barbara Smailagic, “Pigs do fly ! Growing demand for animal fats biofuels to power Europe’s transport system raises concerns over climate impacts and potential fraud”, máj. 2023.
- [119] F. Inal a S. M. Senkan, “Effects of oxygenate additives on polycyclic aromatic hydrocarbons(pahs) and soot formation”, *Combustion Science and Technology*, roč. 174, č. 9, s. 1–19, sep. 2002, doi: 10.1080/00102200290021353.
- [120] F. H. Reboredo, F. Lidon, F. Pessoa, a J. C. Ramalho, “The Fall of Oil Prices and the Effects on Biofuels”, *Trends Biotechnol*, roč. 34, č. 1, s. 3–6, jan. 2016, doi: 10.1016/j.tibtech.2015.10.002.
- [121] “Quality and greenhouse gas intensities of transport fuels in the EU in 2017 | European Environment Agency’s home page”. Cit: 31. júl 2025. [Online]. Available at: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/quality-and-greenhouse-gas-intensities-1>
- [122] C. Winneker, “European renewable ethanol – key figures 2023”, Brussels, 2011. [Online]. Available at: www.epure.org
- [123] “Fuel Blends - ePURE”. Cit: 31. júl 2025. [Online]. Available at: <https://www.epure.org/about-ethanol/fuel-market/fuel-blends/>
- [124] N. S. Mat Aron, K. S. Khoo, K. W. Chew, P. L. Show, W. H. Chen, a T. H. P. Nguyen, “Sustainability of the four generations of biofuels – A review”, *Int J Energy Res*, roč. 44, č. 12, s. 9266–9282, okt. 2020, doi: 10.1002/ER.5557.
- [125] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, a K. Ebrahimi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Third Edition*, 3rd edition. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2018.
- [126] S. E. Hosseini a B. Butler, “An overview of development and challenges in hydrogen powered vehicles”, 02. január 2020, *Taylor and Francis Inc*. doi: 10.1080/15435075.2019.1685999.
- [127] S. K. Dash, S. Chakraborty, M. Roccotelli, a U. K. Sahu, “Hydrogen Fuel for Future Mobility: Challenges and Future Aspects”, 01. júl 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/su14148285.
- [128] “Types of Hydrogen - Stargate Hydrogen”. Cit: 31. júl 2025. [Online]. Available at: <https://stargatehydrogen.com/blog/types-of-hydrogen/>
- [129] “Štatistika Zväzu slovenského automobilového priemyslu”, 2024.
- [130] “Types of Electric Vehicles: BEVs, PHEVs, HEVs - What’s the Difference?” Cit: 04. august 2025. [Online]. Available at: <https://www.evgo.com/ev-drivers/types-of-evs/#bevs>
- [131] “Decarbonising Road Transport For a world in motion”, Geneva, 2021.

- [132] B. Knápek, J. Furch, a Z. Krobot, “Life cycle assessment of selected parameters of passenger vehicles with different propulsion”, *Energy Convers Manag*, roč. 342, s. 120143, okt. 2025, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2025.120143.
- [133] “Statistical Report 2024 Publications - FuelsEurope”. Cit: 15. september 2025. [Online]. Available at: <https://www.fuelseurope.eu/publications/publications/statistical-report-2024>
- [134] “Fuel price comparison | European Alternative Fuels Observatory”. Cit: 25. august 2025. [Online]. Available at: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/consumer-portal/fuel-price-comparison>
- [135] “CNG Europe | Map of Natural Gas Vehicle (NVG) Compressed natural gas (CNG) filling stations in Europe, Mappa Stazioni di rifornimento di metano, Landkarten Methantankstellen erdgastankstellen”. Cit: 09. september 2025. [Online]. Available at: <https://cng europe.com>
- [136] M. V. Prati, A. Mariani, R. Torbati, A. Unich, M. A. Costagliola, a B. Morrone, “Emissions and Combustion Behavior of a Bi-Fuel Gasoline and Natural Gas Spark Ignition Engine”, *SAE Int J Fuels Lubr*, roč. 4, č. 2, s. 328–338, 2011, [Online]. Available at: <http://www.jstor.org/stable/26272155>
- [137] Valentine Jay, Noorlag Joseph, a Lovato Victor, “Experiences with Compressed Natural Gas in Colorado Vehicle Fleets”, 2012. [Online]. Available at: <http://www.antaesgroupinc.com/>.
- [138] M. Laughlin a A. Burnham, “Case Study - Compressed Natural Gas Refuse Fleets”, 31. január 2014.
- [139] M. Melendez, J. Taylor, W. S. Wayne, D. Smith, a J. Zuboy, “Emission Testing of Washington Metropolitan Area Transit Authority (WMATA) Natural Gas and Diesel Transit Buses”, nov. 2005, doi: 10.2172/861488.
- [140] Laurent JACQUET a Marie-Pierre FAUCONNIER, “Study on the cost-effectiveness of natural gas (CNG or compressed natural gas) used as fuel in cars”, Brussels, mar. 2018.
- [141] J. Fabianova a J. Janekova, “Assessment of investment in electric buses: A case study of a public transport company”, *Open Engineering*, roč. 11, č. 1, s. 907–914, jan. 2021, doi: 10.1515/eng-2021-0089.
- [142] C. Krelling a M. G. Badami, “Cost-effectiveness analysis of compressed natural gas implementation in the public bus transit fleet in Delhi, India”, *Transp Policy (Oxf)*, roč. 115, s. 49–61, jan. 2022, doi: 10.1016/J.TRANPOL.2021.10.019.
- [143] C. Krelling a M. G. Badami, “CNG and diesel urban buses in India: A life-cycle cost comparison”, *Int J Sustain Transp*, roč. 14, č. 8, s. 591–605, jún. 2020, doi: 10.1080/15568318.2019.1594468.
- [144] A. K. Digalwar, P. G. Tillu, S. R. Singh, a P. B. Mane, “Assessment of optimal fuel and drive mix for automobile sector decarbonization in India: a scenario analysis of 2035”, *Clean Technol Environ Policy*, 2025, doi: 10.1007/s10098-025-03311-9.
- [145] A. Soltani-Sobh, K. Heaslip, R. Bosworth, a R. Barnes, “Compressed natural gas vehicles: Financially viable option?”, *Transp Res Rec*, roč. 2572, s. 28–36, 2016, doi: 10.3141/2572-04.
- [146] “DPB nakúpi naftové autobusy SOR NS 12 Diesel • imhd.sk Bratislava”. Cit: 09. september 2025. [Online]. Available at: <https://imhd.sk/ba/doc/sk/21185/DPB-nak%C3%BApi-naftov%C3%A9-autobusy-SOR-NS-12-Diesel>

- [147] Jain Alok a Draexler Stephen, "Background paper: Comparative analysis of bus technologies for fleet renewal i". [Online]. Available at: <https://tinyurl.com/ndctia-survey>
- [148] J. Gonzales, "Costs Associated With Compressed Natural Gas Vehicle Fueling Infrastructure Factors to consider in the implementation of fueling stations and equipment Margaret Smith, New West Technologies (DOE HQ Technical Support)", 2014.
- [149] "European Fuel Prices". Cit: 09. september 2025. [Online]. Available at: https://www.cargopedia.net/europe-fuel-prices?utm_source=chatgpt.com
- [150] "Average fuel prices in the Slovak Republic (weekly) [sp0207ts] - IBM Cognos Viewer". Cit: 09. september 2025. [Online]. Available at: https://statdat.statistics.sk/cognosext/cgi-bin/cognos.cgi?b_action=cognosViewer&cv.header=false&run.outputFormat=&run.prompt=true&ui.action=run&ui.backURL=%2Fcognosext%2Fcps4%2Fportlets%2Fcommon%2Fclose.html&ui.name=Average+fuel+prices+in+the+Slovak+Republic+%28weekly%29+%5Bsp0207ts%5D&ui.object=storeId%28%22i4B1941EAC9154096A2C339E0666EA7E6%22%29&utm_source=chatgpt.com
- [151] M. V. Prati, M. A. Costagliola, A. Unich, a A. Mariani, "Emission factors and fuel consumption of CNG buses in real driving conditions", *Transp Res D Transp Environ*, roč. 113, s. 103534, dec. 2022, doi: 10.1016/J.TRD.2022.103534.
- [152] "A comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of European heavy-duty vehicles and fuels - International Council on Clean Transportation". Cit: 09. september 2025. [Online]. Available at: https://theicct.org/publication/lca-ghg-emissions-hdv-fuels-europe-feb23/?utm_source=chatgpt.com
- [153] I. Ivković, S. Kaplanović, a D. Sekulić, "Analysis of external costs of CO2 emissions for CNG buses in intercity bus service", *Transport*, roč. 34, č. 5, s. 529–538, nov. 2019, doi: 10.3846/TRANSPORT.2019.11473.
- [154] Å. M. Hallquist, M. Jerksjö, H. Fallgren, J. Westerlund, a Å. Sjödin, "Particle and gaseous emissions from individual diesel and CNG buses", *Atmos Chem Phys*, roč. 13, č. 10, s. 5337–5350, 2013, doi: 10.5194/ACP-13-5337-2013.
- [155] M. Perdikopoulos *et al.*, "Developing Emission Factors from Real-World Emissions of Euro VI Urban Diesel, Diesel-Hybrid, and Compressed Natural Gas Buses", *Atmosphere 2025, Vol. 16, Page 293*, roč. 16, č. 3, s. 293, feb. 2025, doi: 10.3390/ATMOS16030293.
- [156] T. W. Hesterberg, C. A. Lapin, a W. B. Bunn, "A comparison of emissions from vehicles fueled with diesel or compressed natural gas", *Environ Sci Technol*, roč. 42, č. 17, s. 6437–6445, sep. 2008, doi: 10.1021/ES071718I/SUPPL_FILE/ES071718I-FILE005.PDF.