

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

**Analýza a porovnanie spaľovania zemného plynu
a iných komodít akými sú uhlie a biomasa vo forme
štiepky a peliet**

Odborná štúdia

Vypracovali:

prof. Ing. Juma Haydary, PhD.

doc. Ing. Pavol Steltenpohl, PhD.

Ing. Matej Koritár

Bratislava 2025

Súhrn

Cieľom štúdie je posúdenie výhod a nevýhod použitia zemného plynu na výrobu tepla a energie a jeho porovnanie s uhlím a biomasou, ako zdrojmi energie. V štúdiu sa neobmedzujeme len na priemyselnú výrobu tepla a elektrickej energie, ale tiež na použitie týchto druhov paliva na kúrenie a varenie v domácnosti. Pre potreby porovnania sme zohľadnili fyzikálne a chemické vlastnosti sledovaných druhov palív, ich energetický obsah ako aj tvorbu emisií a odpadov spojených s ich použitím. Okrem samotných charakteristík sme sa zamerali aj na dostupnosť sledovaných typov palív, náklady spojené s ich ťažbou, úpravou a dopravou, a tiež na technologické postupy, ktoré sú nevyhnutné pre efektívne a bezpečné využitie týchto zdrojov. Práve stupeň rozvoja technológií, počínajúc od priemyselných spaľovacích zariadení až po moderné domácnosti vybavené úspornými spotrebičmi, zohráva kľúčovú úlohu pri posudzovaní výhodnosti použitia týchto palív.

Na základe zistených údajov sa zemný plyn ukazuje ako flexibilný a relatívne ekologický zdroj energie, ktorý, vďaka modernej infraštruktúre, ponúka stabilný výkon a nižšiu emisnú záťaž pre životné prostredie. Uhlie síce poskytuje vysokú energetickú hustotu a stabilitu dodávok, no environmentálne dopady jeho použitia sú výrazné aj napriek dostupným technológiám umožňujúcim minimalizáciu množstva škodlivých emisií vznikajúcich pri jeho spaľovaní (filtre na separáciu tuhých častíc, zariadenia na zachytávanie oxidov sýry a dusíka, atď.). Biomasa predstavuje obnoviteľnú a lokálne dostupnú alternatívu paliva, ktorá je atraktívna najmä pri menších zdrojoch tepla a v prostredí, kde je dôraz kladený na použitie domácich zdrojov. Jej potenciál je tak úzko spätý s rozvojom zariadení na efektívne spaľovanie tuhých palív a minimalizáciu emisií z tohto procesu. Úlohou moderných zariadení je zvýšenie účinnosti spaľovania biomasy a minimalizácia s ním spojenej environmentálnej záťaže.

Porovnanie ukazuje, že výber vhodného paliva nemožno redukovať iba na jeho cenu alebo dostupnosť, ale musíme sa zamerať tiež na technologickú vyspelosť použitých zariadení a súvisiacu dlhodobú udržateľnosť procesov výroby tepla a energie. Táto štúdia tak ponúka komplexný pohľad na možnosti a limity použitia vybraných zdrojov pri výrobe energie a podčiarkuje význam inovácií a zodpovedného prístupu pri ich využívaní.

Správa bola vypracovaná na základe verejne dostupných informácií, ktoré vystihujú aktuálny stav poznatkov o spracovanej téme. Berúc do úvahy globálny charakter a previazanosť trhov s energiou vidíme, že prezentované kvantitatívne údaje a z nich vyhodnotený výsledky môže už v blízkej budúcnosti podrobiť skúške správnosti volatilita komoditných trhov, meniace sa právne prostredie a dostupnosť jednotlivých zdrojov energie.

Nakoľko predmetom tejto štúdie je aj zemný plyn a možnosti jeho energetického využitia v porovnaní s uhlím a drevnou biomasou, nevenujeme takmer žiadnu pozornosť obnoviteľnej alternatíve zemného plynu, biometánu. Na jeho výrobu sa používa biologické spracovanie rozložiteľných odpadov za vzniku bioplynu. Odstránením kontaminantov z bioplynu získame takmer čistý metán. V budúcnosti by aspoň čiastočná náhrada zemného plynu biometánom priniesla lepšiu akceptáciu použitia ZP ako zdroja energie a zníženie závislosti na jeho dovoze bez nutnosti mimoriadnych investícií do infraštruktúry a to pri súčasnom využití bioodpadov.

Zoznam symbolov a skratiek

Skratka	Význam
AAR	Asociácia amerických železníc (Association of American Railroads)
AGA	Americká plynárenská asociácia (American Gas Association)
C ₅₊	izoméry pentánu a vyššie uhľovodíky
C ₇₊	izoméry heptánu a vyššie uhľovodíky
CAPEX	investičné náklady (Capital Expenditures)
CNG	stlačený zemný plyn (Compressed Natural Gas)
DOE	Americký úrad pre energiu (Department of Energy, US)
DPH	daň z pridanej hodnoty
EEA	Európska agentúra pre životné prostredie (European Environment Agency)
EIA	Správa informácií z energetiky (Energy Information Administration, US)
EPA	Agentúra na ochranu životného prostredia (Environmental Protection Agency, US)
GWP	potenciál globálneho otepľovania (Global Warming Potential)
EU ETS	Systém Európskej únie na obchodovanie s emisiami skleníkových plynov (European Union Emissions Trading System)
CHP	kogenerácia tepla a energie (Cogeneration of Heat & Power)
IEA	Medzinárodná agentúra pre energiu (International Energy Agency)
IPCC	Medzivládny panel o zmene klímy (Intergovernmental Panel on Climate Change)
LNG	skvapalnený zemný plyn (Liquified Natural Gas)
NIST	Národný inštitút pre štandardy a technológie (National Institute of Standards and Technology)
NO _x	oxidy dusíka
NR SR	Národná rada Slovenskej republiky
OPEX	prevádzkové náklady (Operational Expenditures)
PM _{2.5}	tuhé častice (Particulate Matter) s hydraulickým priemerom menším ako 2,5 μm
RD	rodinný dom
SCR	selektívna katalytická redukcia (Selective Catalytic Reduction)
SIA	Asociácia výrobcov krbov (Stove Industry Association, UK)
SIEA	Slovenská inovačná a energetická agentúra
SITA	Slovenská tlačová agentúra
TCO	celkové náklady vlastníctva (Total Cost of Ownership)
UBA	Spolkový úrad pre životné prostredie (Umweltbudesamt, FRG)
UNEP	Program Organizácie Spojených národov pre životné prostredie (United Nations Environment Programme)
ÚRSO	Úrad pre reguláciu sieťových odvetví
VOC	prchavé organické látky (Volatile Organic Compounds)
ZP	zemný plyn

Jednotka	Význam
CO ₂ e	ekvivalent CO ₂
EJ	exajoule
GJ	gigajoule
GWh	gigawatthodina
kt	kilotona
kWh	kilowatthodina
MJ	megajoule
MMBtu	milión britských tepelných jednotiek (milions of British thermal units)
Mt	megatona
MW	megawatt
MWh	megawatthodina
ppmv	počet dielov z milióna v objemovom vyjadrení (parts per million by volume)
µg m ⁻³	mikrogramy v metri kubickom
µm	mikrometer

Obsah

Úvod	1
1 Všeobecná charakteristika zemného plynu a vybraných tuhých palív, uhlia a biomasy, ako zdrojov energie	2
Úvod	2
Zemný plyn	2
Zloženie zemného plynu	2
Ťažba, úprava a transport zemného plynu	3
Použitie zemného plynu	4
Uhlie	6
Zloženie uhlia	6
Ťažba, úprava a transport uhlia	7
Použitie uhlia	7
Drevená biomasa	8
Zloženie drevnej biomasy	8
Zber, úprava a transport drevnej biomasy	9
Použitie drevnej biomasy	10
2 Vlastnosti zemného plynu ako paliva v porovnaní s uhlím a biomasou, možnosti a rozsah ich použitia pri výrobe tepla a elektrickej energie	11
Úvod	11
Vlastnosti zemného plynu ako zdroja energie	11
Použitie zemného plynu na výrobu tepla a elektrickej energie	12
Vlastnosti uhlia ako zdroja energie	14
Použitie uhlia na výrobu tepla a elektrickej energie	16
Vlastnosti biomasy ako zdroja energie	17
Použitie biomasy na výrobu tepla a elektrickej energie	18
Použitie zemného plynu, uhlia a biomasy ako zdroja tepla a na varenie v domácnosti	20
Porovnanie účinnosti výroby energie a tepla z vybraných zdrojov energie	22
3 Výhody a nevýhody použitia zemného plynu ako paliva v porovnaní s uhlím a biomasou	24
Úvod	24
Výhody a nevýhody použitia zemného plynu na výrobu tepla a energie	24
Výhody a nevýhody použitia uhlia na výrobu tepla a energie	25
Výhody a nevýhody použitia biomasy na výrobu tepla a energie	25
Porovnanie vybraných zdrojov energie	26
Prípadová štúdia: vykurovanie domu s obytnou plochou 150 m ² plynom, uhlím a biomasou	27

4 Ekologické aspekty spaľovania zemného plynu v porovnaní s uhlím a biomasou (emisie, potenciál globálneho otepľovania, odpady)	32
Úvod	32
Emisie zo spaľovania vybraných zdrojov energie	32
Ťažké kovy	32
Ekvivalent CO ₂	32
Tuhé častice.....	34
5 Potenciál vplyvu ťažby a logistiky na ekológiu a ekonomiku procesu výroby tepla a energie zo zemného plynu, uhlia a biomasy	35
Úvod	35
Výrobná cena zemného plynu, uhlia a biomasy.....	35
Náklady na spracovanie a transport zemného plynu, uhlia a biomasy.....	36
Ekologické aspekty výroby zemného plynu, uhlia a biomasy.....	38
Ekologické aspekty logistiky zemného plynu, uhlia a biomasy	39
Záver	41
Použitá literatúra	44

Úvod

Primárnym cieľom použitia fosílnych ako aj obnoviteľných zdrojov energie je konverzia ich chemicky viazanej energie na teplo a prácu. Na dosiahnutie tohto cieľa potrebujeme chemickú energiu uvoľniť, čo sa zvyčajne dosahuje spaľovaním zdroja energie a premenou uvoľneného tepla na ušľachtilejšie typy energie (mechanickú, elektrickú). Na účinnosť celého procesu vplývajú jednak vlastnosti použitého zdroja energie, ako aj podmienky, pri ktorých sa proces realizuje, a aktuálna úroveň technológie a zariadení používaných pri spaľovaní energetických médií. V ostatnom období sa ako ďalšie rozhodujúce hľadisko a kritérium na hodnotenie výhodnosti použitia rozličných zdrojov energie etablovalo posudzovanie vplyvu sledovaných procesov na trvalo udržateľný rozvoj. Preto pri hodnotení procesov a technológií používaných na konverziu zdrojov energie, berieme do úvahy popri ekonomických kritériách aj ich morálny rozmer a dopady na životné prostredie.

Táto štúdia je venovaná použitiu zemného plynu (ZP) ako paliva. Venuje sa charakteristike ZP a jeho porovnaniu s tuhými palivami, akými sú uhlie a drewná biomasa, z hľadiska účinnosti výroby a tiež berúc na zreteľ ekologické, ekonomické a logistické aspekty ich použitia na výrobu tepla a elektrickej energie. Správa je rozdelená do piatich kapitol a ich najdôležitejšie výstupy sú zhrnuté v závere. Prvá kapitola sa zameriava na všeobecné charakteristiky vybraných druhov palív. V druhej kapitole posudzujeme vlastnosti týchto paliva z hľadiska ich použitia na výrobu elektrickej energie a tepla. Tretia kapitola je venovaná porovnaniu výhod a nevýhod použitia jednotlivých typov palív ako zdrojov energie. Súčasťou tejto kapitoly je prípadová štúdia zameraná na určenie nákladov na vykurovanie typizovanej domácnosti. Vo štvrtej kapitole je uvedené porovnanie vplyvu použitia vybraných zdrojov energie na životné prostredie. Piata kapitola sumarizuje ekonomické a ekologické náklady získavania, úpravy a prepravy zdrojov energie na miesto ich použitia na výrobu elektrickej energie a tepla.

1

Všeobecná charakteristika zemného plynu a vybraných tuhých palív, uhlia a biomasy, ako zdrojov energie

Úvod

Na využiteľnosť jednotlivých typov paliva ako zdrojov energie má zásadný vplyv ich zloženie a stav, v akom sa nachádzajú v prírode. Rovnako dôležité sú aj ekologické a ekonomické aspekty spaľovania palív a možnosti logistiky, ktoré súvisia s ich zložením a vlastnosťami. Táto kapitola je venovaná základnej charakteristike a zloženiu zemného plynu, uhlia a drevnej biomasy. Zároveň kapitola poskytuje stručný prehľad informácií o ťažbe, procesoch čistenia a možnostiach transportu jednotlivých druhov palív, ktoré v konečnom dôsledku významne ovplyvňujú udržateľnosť ich použitia.

Zemný plyn

Pod pojmom zemný plyn (ZP) rozumieme plyn bohatý na uhľovodíky, najmä metán, vyskytujúci sa vo veľkých ložiskách v zemskej kôre. Zdrojom zemného plynu sú najmä živočíšne a rastlinné fosílie, ktoré sa termogenickými a/alebo biogenickými procesmi pomaly rozložili na jednoduchšie zlúčeniny. Zdrojom ZP môžu byť aj vulkanické plyny. Počas chladnutia magmy môže v prítomnosti vody prebehnúť redukcia CO₂ prítomného vo vulkanických plynch na metán (Gold & Soter, 1982). Zemný plyn sa často vyskytuje spolu s ropou v ropných poliach alebo s uhlím v uholných ložiskách. Zemný plyn je z ekologického hľadiska považovaný za najčistejšie fosílné palivo a predpokladá sa jeho použitie ako premostujúceho paliva od fosílnych k obnoviteľným zdrojom energie.

Zloženie zemného plynu

Zemný plyn ihneď po ťažbe (surový, neupravený plyn) má veľmi variabilné zloženie, ktoré závisí od konkrétneho ložiska. Okrem metánu obsahuje aj množstvo ďalších plynov a nečistôt. Takýto plyn sa označuje tiež ako nespracovaný zemný plyn. **Tabuľka 1.1** sumarizuje rozsah zastúpenia zložiek v surovom zemnom plyne.

Tabuľka 1.1 Rozsah zastúpenia zložiek v surovom zemnom plyne (Katz et al., 1959; Speight, 2018).

Zložka	Objemový podiel (%)	Zložka	Objemový podiel (%)
Metán	40–90	Oxid uhličitý	0–15
Etán	2–15	Dusík	0–10
Propán	0,5–10	Sulfán	0–5
Butány	0,2–5	Vodná para	stopy až vysoké hodnoty
C ₅₊	0,1–3	Hélium	0–7 (niektoré ložiská)

Z hľadiska spôsobu získavania zemného plynu z jeho ložísk sa zemný plyn delí na *konvenčný* a *nekonvenčný*, podľa toho, či pri jeho ťažbe postačujú bežné metódy, alebo potrebujeme použiť špeciálne technológie. Doposiaľ sa hlavný podiel zemného plynu získava ako konvenčný, no postupné vyčerpávanie ľahšie dostupných ložísk zemného plynu a vylepšujúce sa technológie favorizujú do budúcnosti ťažbu nekonvenčného zemného plynu (Mokhatab et al., 2019).

V prípade konvenčného zemného plynu, ktorý je pre ťažbu voľne dostupný v poréznych štruktúrach hornín, môže byť tento buď *asociovaný* alebo *rozpustený*. Asociovaný zemný plyn vytvára samostatnú plynnú fázu, ktorá je obvykle v kontakte s ropou. Rozpustený zemný plyn je, podľa svojho názvu,

rozpustený v kvapalnej fáze. Vplyvom zmeny podmienok sa z kvapalnej fázy desorbuje. V oboch prípadoch je v tomto type zemného plynu obsah uhľovodíkov s vyšším počtom atómov uhlíka (C₂–C₇₊) pomerne vysoký a preto je tento zemný plyn označovaný ako *vlhký* či *bohatý*. Naproti tomu *neasociovaný* zemný plyn pochádza z ložísk, v ktorých je iba minimum alebo žiadna ropa a preto je v tomto plyne obsah vyšších uhľovodíkov pomerne nízky. Preto je tento typ zemného plynu charakterizovaný ako *suchý* alebo *chudobný* (Speight, 2018; Mokhatab et al., 2019). Obvyklé zloženie asociovaného a neasociovaného zemného plynu je uvedené v **tabuľke 1.2** (Speight, 2018). Ďalšie označenie zemného plynu súvisí s vyšším obsahom nežiaducich prímiesí sulfánu (sírovodíka, H₂S) a oxidu uhličitého, CO₂, (*kyslý zemný plyn*). Vo všeobecnosti, ako kyslý je označený zemný plyn s obsahom H₂S vyšším ako 4 ppmv. Okrem H₂S a CO₂ môže zemný plyn obsahovať aj ďalšie minoritné zložky, vzácne plyny a vodnú paru. Prítomnosť vodnej pary v zemnom plyne predstavuje problém, ktorý súvisí s možnosťou jej kondenzácie či tvorby klatrátov metánu (Caputo et al., 2015). Ak vodná para prítomná v zemnom plyne skondenzuje, môže spôsobiť koróziu a predčasnú opotrebenie potrubnej siete a jej súčastí. Klatráty metánu, ktoré vznikajú pri vyššom tlaku a nízkej teplote, môžu upchať ventily alebo iné armatúry a spôsobiť tak nepriechodnosť potrubnej siete. Navyše, pri náhlom znížení tlaku sú klatráty metánu náchylné na explozívny rozklad (Speight, 2018).

Tabuľka 1.2 Zloženie asociovaného a neasociovaného zemného plynu (Speight, 2018).

Zložka	Neasociovaný ZP		Zložka	Asociovaný ZP	
	Obsah (obj. %)			Obsah (obj. %)	
CO ₂	0,10	1,41	C ₄ (izoméry)	1,72	0,52
N ₂	2,07	0,25	C ₅ (izoméry)	0,50	0,21
CH ₄	86,1	92,5	C ₆ (izoméry)	–	0,14
C ₂ H ₆	5,91	3,18	C ₇₊	–	0,82
C ₃ H ₈	3,58	1,01			

Surový ZP sa pred distribúciou musí podrobiť viacerým procesom čistenia a úpravy. Typické zloženie vyčisteného a upraveného zemného plynu v distribúcii je uvedené v **tabuľke 1.3**.

Tabuľka 1.3 Typické zloženie zemného plynu (Katz et al.,1959; Speight, 2018).

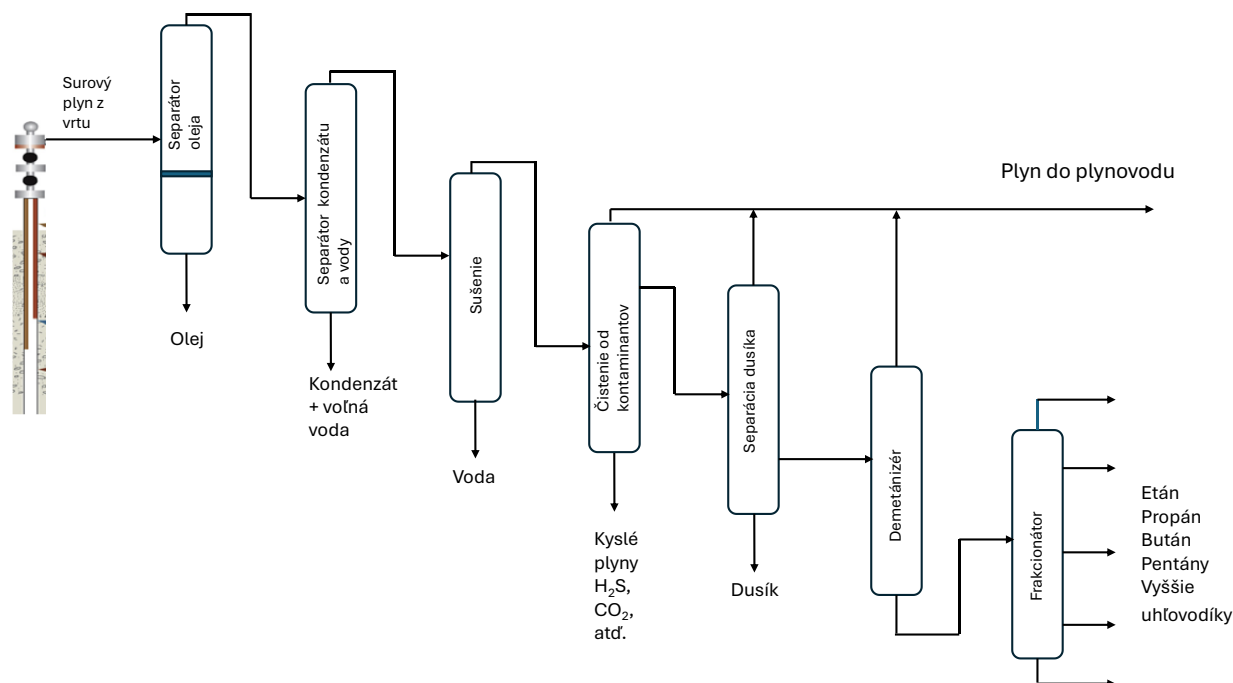
Zložka	Objemový podiel (%)	Zložka	Objemový podiel (%)
Metán	85–96	Dusík	0,1–1,0
Etán	2–6	Vodík	0–0,5
Propán	0,1–2	Sulfán	0–0,02
Butány (<i>n</i> - a <i>i</i> -bután)	0–0,5	Voda (vodná para)	stopy
Oxid uhličitý	0,1–1,0	Hélium (niektoré ložiská)	0–0,3

V distribučných sieťach v Európe sa obsah metánu pohybuje v rozsahu od 93–96 obj. % a vyhovuje prísnyh technickým normám pre výhrevnosť a bezpečnosť distribúcie.

Ťažba, úprava a transport zemného plynu

Ťažba zemného plynu prebieha buď z konvenčných ložísk (napr. pieskovce s vysokou permeabilitou), alebo z nekonvenčných zdrojov, akými sú bridlicové plyny alebo plyn uvoľnený z ložísk uhlia. V prípade konvenčnej ťažby sa navráta vrt do ložiska plynu. Tlak plynu v ložisku umožňuje jeho prirodzený výstup na povrch. Pri ťažbe nekonvenčného plynu sa často používa hydraulické štiepenie („fracking“), pri ktorom sa do podložia pod vysokým tlakom vháňa zmes vody, piesku a chemikálií, aby sa narušili štruktúry horniny

a uvoľnil sa plyn (King, 2012). Surový plyn z ložiska sa následne podrobí čisteniu a úprave, aby spĺňal požiadavky jeho prepravy k spotrebiteľovi. **Obrázok 1.1**, vytvorený autormi na základe dát z literatúry napr. (Faramawy et al., 2016), schematicky prezentuje hlavné procesy čistenia a úpravy zemného plynu transportovaného plynovodom.



Obrázok 1.1 Procesy čistenia surového zemného plynu.

Preprava surového plynu bez čistenia a úpravy je technicky a ekonomicky veľmi nákladná, preto sa procesy čistenia plynu realizujú na mieste jeho ťažby. Vo všeobecnosti platí, že vyťažovaný plyn sa po čistení a úprave okamžite transportuje. Dôvodom tohto postupu sú limitované kapacity pre jeho uskladnenie (Cranmore & Stanton, 2000). Preprava ZP ku spotrebiteľovi sa realizuje rôznymi spôsobmi, medzi ktoré patrí najmä transport plynovodom, transport vo forme skvapalneného zemného plynu (LNG), vo forme stlačeného zemného plynu (CNG) a v ostatnom čase sa skúmajú aj možnosti transportu vo forme hydrátov (v tuhom skupenstve). V **tabuľke 1.4** sú zhrnuté výhody a nevýhody jednotlivých spôsobov prepravy zemného plynu (Mokhatab et al., 2019).

Ťažba, úprava a transport zemného plynu má vplyv na celkovú ekonomiku a ekologické dopady použitia zemného plynu ako paliva. Detailná analýza nákladov a ekologických dopadov súvisiacich s ťažbou, úpravou a transportom ZP je uvedená v 5. kapitole.

Použitie zemného plynu

Zemný plyn sa primárne používa ako zdroj energie pre domácnosti a priemysel. Môže sa použiť na výrobu tepla a/alebo elektrickej energie. Okrem energetického využitia, je zemný plyn základnou surovinou na výrobu vodíka, amoniaku, kyseliny dusičnej, hnojív, metanolu a mnohých iných látok, ktoré sa získavajú v sekundárnych krokoch. Globálne najväčší podiel zemného plynu sa používa na výrobu elektrickej energie, cca 48 % a ďalších 5 % slúži na krytie energetickej spotreby samotného energetického sektora (Faramawy et al., 2016). Nakoľko rôzni autori pri klasifikácii sektorov použitia zemného plynu aplikujú odlišné definície a časové škály, môžu sa prezentované údaje od seba líšiť aj o niekoľko

percentuálnych bodov. Navyše, meniace sa postoje verejnosti k problematike ochrany životného prostredia a súvisiaca snaha o znižovanie závislosti na fosílnych zdrojoch energie ovplyvňujú využitie ZP v jednotlivých sektoroch. V **tabuľke 1.5** je uvedený prehľad celosvetovej spotreby zemného plynu podľa jednotlivých sektorov za vybrané obdobia od roku 2007 po súčasnosť (IEA, 2025a).

V prípade Slovenska sme v dôveryhodných literárnych zdrojoch nedokázali nájsť jednoznačné štatistické údaje o rozdelení spotreby ZP v uvedených sektoroch. Vo všeobecnosti však z dostupných dát vyplýva, že podiel využitia zemného plynu pri výrobe elektriny je na Slovensku výrazne nižší v porovnaní s inými krajinami. Naproti tomu v domácnostiach a v komerčnom sektore sa na Slovensku spotrebuje oveľa viac zemného plynu v porovnaní s podielom jeho spotreby na globálnej úrovni. Takisto podiel priemyselného využitia ZP a jeho využitia v doprave je na Slovensku nižší než na globálnej úrovni.

Tabuľka 1.4 Výhody a nevýhody jednotlivých spôsobov transportu zemného plynu.

Spôsob transportu	Výhody	Nevýhody
Plynovod	<ul style="list-style-type: none"> - Pomerne spoľahlivý a kontinuálny tok plynu - Nízke prevádzkové náklady po vybudovaní - Vhodný na prepravu veľkých objemov a dlhodobé dodávky - Relatívne nízka ekologická stopa počas prevádzky 	<ul style="list-style-type: none"> - Veľké počiatkové investičné náklady - Nákladná výstavba (čas, legislatíva, terén) - Obmedzená flexibilita (fixná trasa) - Riziko spojené s nerovnomerným rozložením ložísk plynu vo svete
LNG (skvapanený zemný plyn)	<ul style="list-style-type: none"> - Vhodný pri doprave na veľké vzdialenosti (aj cez oceán) - Možnosť skladovania - Vyššia energetická hustota ako CNG - Väčšia flexibilita pri dodávkach 	<ul style="list-style-type: none"> - Nákladný a energeticky náročný proces skvapanenia a regazifikácie - Riziko únikov a bezpečnostné riziká pri manipulácii - Vyžaduje špeciálnu infraštruktúru (terminály, tankery)
CNG (stlačený zemný plyn)	<ul style="list-style-type: none"> - Nižšie náklady na kompresiu než pri skvapanení LNG - Vhodný pri preprave na krátke až stredné vzdialenosti - Rýchla a lacnejšia manipulácia - Môže sa využívať aj ako palivo pre vozidlá 	<ul style="list-style-type: none"> - Nízka energetická hustota a preto väčšie nároky na prepravovaný objem - Nevhodný na prepravu na veľké vzdialenosti ani na prepravu veľkých objemov - Vyšší tlak znamená potrebu robustných nádrží
Hydráty (klatráty) zemného plynu	<ul style="list-style-type: none"> - Skladovanie a transport pri miernych tlakoch a teplotách (cca 0–10 °C) - Menšie nároky na bezpečnosť pri manipulácii v porovnaní s LNG/CNG - Vhodné na sezónne skladovanie 	<ul style="list-style-type: none"> - Technológia je zatiaľ málo rozšírená a drahá - Nižšia účinnosť uvoľňovania plynu - Vyžaduje špecifické podmienky pre tvorbu a stabilitu hydrátov

Tabuľka 1.5 Podiel využitia zemného plynu v rôznych sektoroch na globálnej úrovni (IEA, 2025a).

Obdobie	2007–2013	2013–2019	2019–2025 ^a
Sektor	Podiel na celkovej spotrebe ZP (%)		
Výroba elektrickej energie	41	42	34
Priemysel	31	29	41
Domácnosť a obchod	12	16	8
Energetika	12	9	9
Doprava	4	4	8

^aOdhadnutý podiel.

Uhlie

Uhlie je horľavá hornina, ktorá vznikla rozkladom rastlinného materiálu bez prístupu vzduchu účinkom tlaku a teploty v uhoľných panvách. Uhlie sa získava z povrchových lomov alebo hlbinných baní a používa sa predovšetkým ako palivo alebo surovina na výrobu koksu. Uhlie patrí medzi najstaršie využívané fosílné palivá. Jeho používanie siaha až do starovekej Číny, kde sa používalo na kúrenie už pred viac ako 3000 rokmi. V Európe sa uhlie začalo intenzívnejšie ťažiť a používať v stredoveku, najmä vo Veľkej Británii. Skutočný rozmach však nastal počas priemyselnej revolúcie v 18. a 19. storočí, keď sa uhlie stalo hlavným zdrojom energie pre parné stroje, továrne a neskôr aj elektrárne. Uhlie tak zohralo kľúčovú úlohu v industrializácii a rozvoji modernej spoločnosti. Uhlie delíme podľa stupňa premeny a obsahu uhlíka na štyri hlavné typy. Rašelina je najmladšia forma uhlia s pomerne nízkym obsahom uhlíka a vysokým obsahom vody. Lignit (hnedé uhlie) je v porovnaní s rašelinou starší druh uhlia, ktorý sa používa najmä na výrobu elektriny. Čierne uhlie má v porovnaní s predošlými vyšší energetický obsah a je cenným palivom. Najkvalitnejším typom uhlia je antracit, ktorý má najvyšší obsah uhlíka, horí najčistejšie a poskytuje najviac energie (Picheu et al., 2022).

Na Slovensku sa už uhlie v tepelných elektrárnach prakticky nepoužíva, v marci 2024 bola výroba elektriny z uhlia ukončená. Vo svete je však uhlie stále významným zdrojom energie. V roku 2024 predstavovalo približne 35 % globálnej produkcie elektriny (34–35 %). Hoci sa tento podiel mierne znižuje (napr. z 36 % v roku 2023), uhlie naďalej zostáva dominantným zdrojom elektrickej energie najmä v Ázii. V Číne a Indii je podiel uhlia na výrobe elektriny 60–75 % (IEA, 2025b). Spaľovanie uhlia však spôsobuje znečistenie ovzdušia a prispieva ku klimatickým zmenám.

Na problematiku znečistenia životného prostredia v dôsledku spaľovania uhlia myslí aj legislatíva Slovenskej republiky, menovite ustanovenia Zákon číslo 146/2023 Z. z. o ochrane ovzdušia a o zmene a doplnení niektorých zákonov (NR SR, 2023). Podľa § 32 zákona číslo 146/2023 Z. z. o ochrane ovzdušia, je v spaľovacích zariadeniach s menovitým tepelným príkonom do 0,3 MW zakázané spaľovať palivá nízkej kvality na báze uhlia, konkrétne hnedé uhlie energetické, lignit, uhoľné kaly, uhoľný prach a preplástky.

Zloženie uhlia

Uhlie sa skladá z horľavej organickej zložky (nad 50 hmot. %), popola a vody. V **tabuľke 1.6** je uvedené zloženie rôznych druhov uhlia a ich výhrevnosť. Hlavnými prvkami zastúpenými v uhlí sú uhlík (C), vodík (H), kyslík (O), síra (S) a dusík (N). Obsah síry v uhlí je environmentálne kritickým faktorom, pretože pri jeho spaľovaní vzniká oxid siričitý (SO₂), ktorý prispieva ku tvorbe kyslých dažďov. Vysoký obsah popola znižuje energetický obsah uhlia a v spaľovacom zariadení spôsobuje problémy s usadzovaním trosky.

Tabuľka 1.6 Zloženie a výhrevnosť rôznych druhov uhlia (Speight, 2012).

Zložka	Lignit (hnedé uhlie)	Čierne uhlie	Antracit
	Zastúpenie (hmot. %)		
Uhlík (C)	60–70	75–85	86–95
Vodík (H)	5–6	5–6	2–4
Kyslík (O)	20–30	10–20	2–5
Síra (S)	0,5–3	0,5–3	0,5–1,5
Popol	5–15	5–10	2–8
Výhrevnosť (MJ kg ⁻¹)	9–18	24–30	30–35
(kWh kg ⁻¹)	2,5–5,0	6,7–8,3	8,3–9,7

Ťažba, úprava a transport uhlia

Uhlie sa nachádza v podzemných ložiskách v rôznej hĺbke pod povrchom zeme, čo podmieňuje výber ťažobnej metódy (Hartman & Mutmansky, 2002). Ťažba sa delí na povrchovú (odkryvné bane) a hlbinnú (podzemné bane). Povrchová ťažba je efektívnejšia z hľadiska nákladov a bezpečnosti, no má výrazne negatívny dopad na krajinu a ekosystémy (Bian et al., 2010). Hlbinná ťažba sa používa pri hlbšie uložených ložiskách a je technologicky náročnejšia, pričom so sebou nesie vyššie riziko geomechanických havárií a prašnosti (Bell & Donnelly, 2006). Ťažba uhlia je sprevádzaná environmentálnymi problémami, akými sú znečistenie vody, únik metánu (CH₄) do ovzdušia, deformácia terénu a produkcia banského odpadu.

Po ťažbe sa uhlie podrobí procesom mechanického triedenia, drvenia a čistenia od anorganických prímiesí. Tieto technológie umožňujú zníženie obsahu popola o 30–50 % a pomáhajú významne znížiť emisie znečisťujúcich látok v priebehu spaľovania uhlia (Bian et al., 2010). Ďalším krokom úpravy uhlia je jeho sušenie a homogenizácia. Procesy úpravy uhlia produkujú kalové vody, jemné frakcie uhlia a pevné odpady, ktoré je potrebné ekologicky spracovať.

Doprava uhlia predstavuje kľúčový článok v reťazci ťažby, logistiky a využitia tohto fosílného paliva, ktorý výrazne ovplyvňuje ekonomickú efektivitu a environmentálne dopady uhoľného priemyslu. Železničná doprava je najrozšírenejším spôsobom prepravy uhlia vo vnútrozemských oblastiach, najmä pri veľkých objemoch prepravovaného paliva. Pre medzinárodný obchod je kľúčová lodná doprava, ktorá umožňuje prepravu uhlia na tisíce kilometrov. Riečna doprava je významná napríklad na Dunaji alebo v oblasti Veľkých jazier v USA. Nákladná automobilová doprava sa používa najmä pri lokálnych presunoch uhlia z baní do úpravni alebo skladov. Tento spôsob dopravy uhlia je flexibilný, ale menej ekonomicky výhodný a produkuje vyššie emisie CO₂ a prachových častíc (Bian et al., 2010). Z environmentálneho hľadiska je kľúčová požiadavka minimalizovať prašnosť, znečistenie vody a emisie pri doprave uhlia.

Náklady spojené s ťažbou, úpravou a dopravou uhlia a ekologické dopady týchto procesov sú podrobnejšie analyzované v 5. kapitole správy.

Použitie uhlia

Uhlie sa globálne používa predovšetkým na výrobu elektrickej energie, tepla, ako aj v priemyselnej výrobe a chemickom priemysle. Vďaka svojej energetickej hustote, dostupnosti a relatívne nízkej cene zohráva dôležitú úlohu v energetickom mixe viacerých krajín. Najrozšírenejším spôsobom použitia uhlia je jeho spaľovanie v tepelných elektrárnach, kde sa energetický obsah uhlia premieňa na teplo a následne, prostredníctvom parných turbín, na elektrickú energiu. V metalurgii sa uhlie používa vo forme koksu, špeciálne spracovanej forme čierneho uhlia s vysokým obsahom uhlíka a nízkym obsahom prchavých látok. Koks sa používa vo vysokých peciach pri výrobe surového železa ako redukčné činidlo na odstránenie kyslíka z rudy. Uhlie je aj významnou surovinou pre chemickú syntézu, najmä pri výrobe syntézneho plynu

(zmesi H₂ a CO), ktorý je základom pre výrobu metanolu, amoniaku a syntetických palív (Bell & Donnelly, 2006). Tento proces, známy ako splynovanie uhlia, umožňuje efektívnejšie využitie uhlia a môže byť integrovaný s technológiami zachytávania CO₂.

Drevná biomasa

Biomasa je prírodný materiál, ktorého zdrojom sú rastliny a živočíchy. V užšom zmysle sa ako biomasa najčastejšie označuje materiál rastlinného pôvodu, predovšetkým drevo a z neho odvodené deriváty. Historicky sa na ohrev, varenie a tradičnú remeselnú výrobu takmer výlučne používalo drevo a drevené uhlie. Až príchod priemyselnej revolúcie spôsobil, že sa ľudstvo preorientovalo na fosílny zdroje energie. Napriek tomu, v menej rozvinutých krajinách zostáva biomasa stále dôležitým palivom. Naviac, v dôsledku klimatických zmien sa ľudská spoločnosť postupne odkláňa od použitia fosílnych a smeruje k využívaniu obnoviteľných zdrojov energie (Baskar et al., 2012; Breeze, 2019; McKendry, 2002a).

Biomasa (rastlinného pôvodu) je obnoviteľný zdroj energie, ktorý vďaka slnečnému žiareniu a fotosyntéze účinne zachytáva uhlík z atmosféry. Motorom produkcie biomasy je slnečné žiarenie, ktoré je biologickou cestou viazané v biomase a následne ho dokážeme uvoľniť jej spálením. O obnoviteľnom zdroji energie hovoríme preto, lebo CO₂, vznikajúci spálením biomasy, sa opakovane využije na rast novej biomasy. Treba si však uvedomiť, že rast novej biomasy vyžaduje istý čas a preto produkcia tohto zdroja energie zaostáva za jej spotrebou. S tým súvisí nutnosť nájsť také rastliny, ktoré zaostávajú produkcie za jej spotrebou minimalizujú. Požiadavky na takéto rastliny sú predovšetkým maximálna produkcia sušiny z jednotkovej plochy, nízka spotreba energie pri jej výrobe, nízka cena biomasy, minimálny obsah kontaminantov a minimálne požiadavky a náklady na výživu a zavlažovanie rastliny počas jej rastu (McKendry, 2002a; Twidell & Weir, 2015).

Energiu z biomasy získavame rôznymi spôsobmi, spomedzi ktorých najviac rozšírené sú (Baskar et al., 2012; McKendry, 2002b; van Loo & Koppejan, 2008):

- spaľovanie spojené s výrobou vodnej pary a jej použitím na výrobu elektrickej energie v parnej turbíne,
- spaľovanie biomasy spolu s uhlím v tepelnej elektrárni,
- pyrolýza a splynovanie biomasy, spaľovanie získaného oleja a plynu a výroba elektrickej energie v plynovej turbíne,
- fermentácia biomasy a použitie získaného kvapalného paliva na výrobu elektrickej energie v plynovej turbíne.

V dôsledku podobnosti výroby energie z biomasy a z fosílnych zdrojov ich spaľovaním, je na výrobu elektrickej energie z biomasy výhodné použitie rovnakej technológie ako v prípade uhlia či zemného plynu. Problémom je nižšia účinnosť spaľovania biomasy v porovnaní s fosílnymi palivami, ako to vyplýva aj z porovnania jednotkového energetického obsahu (Chaiyo et al. 2025).

Zloženie drevnej biomasy

Drevná biomasa je komplexná zmes celulózy, hemicelulózy, lignínu, minoritných organických látok, vody a rôznych anorganických solí (Husár et al., 2021). Zastúpenie celulózy, hemicelulózy a lignínu v rôznych typoch dreva sa pohybuje v rôznych rozsahoch. **Tabuľka 1.7** sumarizuje zastúpenia celulózy, hemicelulózy a lignínu v niektorých druhoch dreva (Hassan et al., 2016).

Obsah vlhkosti môže výrazne ovplyvniť priebeh spaľovania drevnej biomasy. Zníženie obsahu vlhkosti v biomase môže byť energeticky náročný proces, prípadne môže byť potrebný dlhý čas na jej sušenie. Obsah popola v rôznych typoch drevnej biomasy sa pohybuje v rozsahu od 0,3–8,0 hmot. %. Obsah uhlíka sa pohybuje okolo 50 hmot. %, obsah vodíka je na úrovni 5–6 hmot. %, obsah dusíka v drevnej biomase je

maximálne 1 hmot. % a v prípade kyslíka je obsah okolo 40 hmot. %. Treba si však uvedomiť, že aj u toho istého druhu biomasy sa obsah jednotlivých prvkov môže pohybovať v rámci určitého rozsahu, pretože na elementárne zloženie rastlín vplývajú rôzne faktory, akými sú typ pôdy na ktorej biomasa rastie, klimatické podmienky, zavlažovanie a použité prostriedky na ošetrovanie rastlín.

Tabuľka 1.7 Zastúpenie celulózy, hemicelulózy a lignínu v niektorých typoch dreva (Hassan et al., 2016).

Typ biomasy	Celulóza	Hemicelulóza	Lignín
	Zastúpenie (hmot. %)		
Jedľové drevo	10,5	48,6	25,3
Bukové drevo	51,3	28,0	19,6
Eukalyptové drevo	35,5	12,5	39,2

Zber, úprava a transport drevnej biomasy

Drevná biomasa vzniká najmä ako vedľajší produkt lesného hospodárstva a spracovania dreva. Efektívne využitie tohto zdroja vyžaduje optimalizované procesy jeho zberu, úpravy a transportu. Zber drevnej biomasy zahŕňa zhromažďovanie zvyškov po ťažbe dreva (vetvy, korene, odrezky) alebo ciele pestovanie energetických porastov (napr. rýchlorastúce dreviny). Zber sa môže vykonávať ručne, poloautomaticky alebo pomocou špecializovanej mechanizácie (harvestory, drviče priamo v teréne) (Titus et al., 2021).

Úprava drevnej biomasy je kľúčovým krokom pri jej používaní ako obnoviteľného zdroja energie. Medzi najrozšírenejšie metódy mechanickej úpravy drevnej hmoty patrí štiepkovanie a pelletizovanie, ktoré zvyšujú využiteľnosť biomasy z hľadiska transportu, skladovania aj samotného spaľovania. Štiepkovanie je proces mechanickeho drvenia dreveného materiálu (kmene, konáre, odrezky) na menšie kúsky, štiepky. Tento proces sa vykonáva pomocou bubnových, kotúčových alebo šnekových drvičov, pričom vyrobená frakcia drevnej hmoty má spravidla veľkosť 10–100 mm (Anderson & Mitchell, 2016). Štiepky sú vhodné na priame spaľovanie v kotloch alebo ako surovina na ďalšie spracovanie. Výhodou štiepok je jednoduchšia manipulácia a vyššia plošná hustota v porovnaní s nespracovaným drevom. Dôležitými parametrami pri hodnotení kvality štiepky sú obsah vlhkosti, veľkosť frakcie a podiel nečistôt.

Pelletizovanie predstavuje technológiu lisovania jemne rozdrvenej a vysušenej biomasy do valcovitých útvarov, peliet s priemerom najčastejšie 6–10 mm a dĺžkou do 30 mm. Proces zahŕňa sušenie drevnej biomasy na obsah vlhkosti pod 10 hmot. %, mletie na jemnú frakciu, a následné lisovanie pod vysokým tlakom. Pelietizácia zvyšuje energetickú hustotu materiálu (na hodnotu 17–20 MJ kg⁻¹, 4,7–5,6 kWh kg⁻¹) a zlepšuje logistické charakteristiky paliva, znižuje prašnosť, zlepšuje homogénnosť a umožňuje jednoduché dávkovanie. Pelety sa používajú predovšetkým v domácich a v priemyselných spaľovacích zariadeniach s automatickým podávaním (Pradhan et al., 2018).

Najčastejšie používaným spôsobom prepravy drevnej biomasy je cestná doprava nákladnými vozidlami. Pri preprave sypkých materiálov, ako je štiepka, sa využívajú vozidlá s veľkoobjemovými kontajnermi alebo návesmi so samovýšpným mechanizmom. V prípade lisovaných foriem biomasy, akými sú brikety alebo pelety, sa preferuje paletová manipulácia, ktorá umožňuje efektívnejšie využitie úložného priestoru vozidla a jednoduchšie skladovanie. Vo väčších objemoch, najmä pri priemyselnom spracovaní, sa biomasa prepravuje aj železničnou dopravou, ktorá je výhodná z hľadiska nižšej uhlíkovej stopy na jednotku prepravenej hmotnosti, ale vyžaduje väčšiu centralizáciu zberu a blízkosť železničnej

infraštruktúry (Kanzian et al., 2009). V niektorých regiónoch sa používa aj vodná doprava, najmä pri preprave dreva po riekach alebo jazerách, avšak tento spôsob je geograficky obmedzený.

Konečná cena drevnej biomasy ale aj jej uhlíková stopa závisí nielen od nákladov spojených s pestovaním biomasy, ale tiež od spôsobu jej ťažby, úpravy a dopravy k spotrebiteľovi. Vyhodnoteniu nákladov a ekologickým dopadom ťažby, úpravy a dopravy biomasy je venovaná 5. kapitola tejto správy.

Použitie drevnej biomasy

Biomasa sa používa vo forme palivového dreva, drevnej štiepky, brikiet a peliet, pričom jej aplikácia siaha od domácností až po veľkokapacitné tepelné elektrárne a kogeneračné jednotky. Z energetického hľadiska je hlavnou výhodou drevnej biomasy jej uhlíková neutralita. Pri jej spaľovaní sa uvoľňuje len toľko CO₂, koľko bolo počas rastu biomasy absorbované z atmosféry, za predpokladu udržateľného hospodárenia. Biomasa sa využíva najmä na výrobu tepla, pričom efektívnosť spaľovania závisí od formy paliva a jeho vlhkosti. Moderné zariadenia na spaľovanie peliet dosahujú účinnosť až 90 % (Kaltschmitt et al., 2016).

Okrem výroby tepla je drevná biomasa dôležitá aj pre kogeneráciu tepla a elektriny (CHP). Vyššie využitie energetického obsahu biomasy sa dosahuje v priemyselných alebo komunálnych kogeneračných jednotkách. Využitie sa rozširuje aj na biochemickú konverziu, pri ktorej sa z lignocelulózovej biomasy získavajú biopalivá druhej generácie (Ashokkumar, et al., 2022).

Pri rovnakej cene zariadení je produkcia energie z biomasy ekonomicky menej výhodná než pri jej výrobe z uhlia. Táto nevýhoda môže byť čiastočne kompenzovaná lokálne nižšou cenou biomasy (Breeze, 2019).

V súvislosti s prechodom na uhlíkovo neutrálne technológie sa predpokladá postupné zvyšovanie podielu energie vyrobenej z biomasy. Podľa predpokladov Medzinárodnej agentúry pre energiu (International Energy Agency) sa má výroba energie z biomasy do roku 2035 zvýšiť dvojnásobne v porovnaní s jej produkciou v roku 2020. Odhadované množstvo elektrickej energie získavanej z biomasy môže dosiahnuť hodnotu 500 EJ ročne. Na porovnanie, predpokladaný globálny ročný prírastok biomasy zodpovedá troj- až šesťnásobku jeho odhadnutej spotreby, t. j. 1500–3000 EJ (Twidell & Weir, 2015).

2 Vlastnosti zemného plynu ako paliva v porovnaní s uhlím a biomasou, možnosti a rozsah ich použitia pri výrobe tepla a elektrickej energie

Úvod

Použitie zemného plynu, uhlia a biomasy na výrobu tepla a elektrickej energie súvisí so zložením týchto energetických zdrojov (pozri 1. kapitolu štúdie). Nemenej dôležité sú však aj technológie používané na konverziu chemickej energie týchto zdrojov či už v priemysle alebo tiež v domácnosti. Táto kapitola poskytuje prehľad technológií používaných pri výrobe tepla a energie s dôrazom na čo najvyššiu účinnosť konverzného procesu a minimalizáciu negatívnych vplyvov takejto výroby na životné prostredie. Vplyv spaľovania vybraných druhov palív na životné prostredie sme zhodnotili vo 4. kapitole tejto správy.

Vlastnosti zemného plynu ako zdroja energie

Čistý zemný plyn je bezfarebný, bez chuti a zápachu, ľahší ako vzduch. Charakterizuje ho vysoký obsah energie, ktorá sa uvoľní pri jeho spaľovaní (**tabuľka 2.1**). Predaj zemného plynu sa obvykle realizuje na základe jeho výhrevnosti, ktorá je hlavným ukazovateľom pri využití zemného plynu ako energetického zdroja. Vybrané vlastnosti zemného plynu sú uvedené v **tabuľke 2.1** (pozri tiež **tabuľku 1.3**).

Tabuľka 2.1 Vybrané fyzikálno-chemické vlastnosti zemného plynu (Mokhatab et al., 2019; Speight, 2018; NIST, 2025; DOE, 2025a).

Vlastnosť	Hodnota	Vlastnosť	Hodnota
Relatívna mólová hmotnosť	17–20	Metánové číslo	69–99
Obsah uhlíka (hmot. %)	65–75	Oktánové číslo	120–130
Obsah vodíka (hmot. %)	15–25	Limity výbušnosti pár (obj. %)	5–15
Obsah kyslíka (hmot. %) (CO ₂)	0–30	Limity horľavosti	0,7–2,1
Mólový pomer vodík/uhlík	3,0–4,0	Výhrevnosť ^a (dolná (MJ m ⁻³) výhrevnosť) (kWh m ⁻³)	33–35 9,1–9,7
Obsah metánu (obj. %)	86–96	Spaľovacie teplo ^a (horná (MJ m ⁻³) výhrevnosť) (kWh m ⁻³)	37–39 10,3–10,8
Obsah etánu (obj. %)	2,7–4,6	Hustota pri 0 °C (kg m ⁻³)	0,72–0,85
Obsah dusíka (obj. %)	0,1–15	Relatívna hustota voči vzduchu	0,55–0,70
Obsah oxidu uhličitého (obj. %)	1–5	Emisie CO ₂ pri spaľovaní (kg m ⁻³)	2,75
Obsah síry (ppmw)	< 5	Teplota samovznietenia (°C)	540–560
Skupenstvo pri distribúcii	plyn	Tepelná kapacita (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	2,2
Farba	bez farby	Rýchlosť šírenia plameňa (m s ⁻¹)	0,38
Vôňa	bez vône		
Teplota varu (°C)	–162		

^aV plynárenstve sa dolná výhrevnosť označuje ako výhrevnosť a horná výhrevnosť ZP termínom spaľovacie teplo.

Hlavnou zložkou zemného plynu je metán (CH₄), ktorý je ľahký, bezfarebný a takmer bez zápachu. Preto sa do plynu pri distribúcii pridáva odorant (zvyčajne merkaptán), aby bolo možné únik plynu ľahšie identifikovať. Zemný plyn je ľahší ako vzduch, takže v prípade úniku stúpa smerom nahor a rýchlo sa rozptyľuje. Kritická teplota metánu je –82,6 °C a jeho kritický tlak je 46 bar (NIST, 2025). Na transformáciu zemného plynu do kvapalného skupenstva nestačí iba zvyšovanie tlaku, ale je potrebné aj znižovanie jeho

teploty. Jeho skladovanie a doprava sú technicky dobre zvládnuté, či už plynovodom alebo vo forme stlačeného (CNG) prípadne skvapalneného zemného plynu (LNG).

Zemný plyn má vysokú výhrevnosť. Pri jeho spaľovaní sa uvoľňuje veľké množstvo tepla a zároveň sa pri jeho spaľovaní produkuje najmenej CO₂ v porovnaní s inými fosílnymi palivami. Aj emisie tuhých častíc a prchavých organických látok sú pri spaľovaní ZP na minimálnej úrovni.

Použitie zemného plynu na výrobu tepla a elektrickej energie

Zemný plyn sa stal dôležitým zdrojom pri výrobe elektrickej energie a tepla vďaka svojim fyzikálnym a chemickým vlastnostiam, dostupnosti, menšiemu negatívnemu vplyvu na životné prostredie v porovnaní s uhlím alebo ropnými produktami a tiež vďaka rýchlemu rozvoju a zdokonaleniam technológie plynových turbín (Liang et al., 2012; Speight, 2018). V roku 2011 International Energy Agency oznámila, že svet vstupuje do zlatej éry zemného plynu.

Spaľovanie zemného plynu ako aj iných typov plyných palív s cieľom výroby elektrickej energie sa realizuje v plynových turbínach. Tento typ zariadenia v prvom kroku konvertuje kinetickú a/alebo potenciálnu energiu plynu na rotačný pohyb a následne na elektrickú energiu. Prvá zmienka o použití veterného mlyna, t. j. zariadenia využívajúceho rovnaký fyzikálny princíp na akom funguje plynová turbína, sa nachádza v spisoch Heróna z Alexandrie z 1. storočia nášho letopočtu (Hero, 1851).

Aktuálnu podobu, axiálny kompresor a turbína umiestnené na jednom hriadelci, ako prvý navrhol nemecký inžinier Franz Stolze v roku 1872. Kompresor vytvára prúd stlačeného vzduchu, ktorý sa zmieša s palivom a zapáli. Takto získame prúd horúcich spalín slúžiacich na pohon turbíny. Kvôli nízkej účinnosti vtedajších kompresorov a turbín však ním navrhnutý prototyp nebol schopný fungovať kontinuálne. To sa podarilo až v 20. rokoch 20. storočia. Veľký význam malo použitie plynových turbín na reaktívny pohon lietadiel v prvej polovici minulého storočia. Uplatnenie pri výrobe elektrickej energie našli v druhej polovici 20. storočia. V dôsledku ďalšieho rozvoja a vylepšení sa v súčasnosti celkový inštalovaný výkon plynových turbín postupne približuje k celkovému výkonu uhoľných elektrární (Breeze, 2019).

Turbína predstavuje tepelný motor, ktorého účinnosť závisí od množstva energie, ktorú dokáže získať z pretekajúceho plyného prúdu. V súlade so zákonmi termodynamiky, množstvo získanej energie zodpovedá rozdielu medzi stavom plynnej fázy na vstupe a na výstupe z plynovej turbíny. Energia prúdu spalín na vstupe do turbíny závisí od ich tlaku a teploty. Na zvýšenie tlaku v súčasných plynových turbínach slúži axiálny kompresor. Môžeme si ho predstaviť ako systém viacerých veterných mlynov zapojených v sérii, ktoré pohybom svojich lopatiek najskôr nasávajú a potom postupne komprimujú nasatý vzduch. Po kompresii sa tlak vzduchu zvýši na 15- až 30-násobok atmosférického tlaku. Kompresor moderných plynových turbín pozostáva z 10 až 12 sád lopatiek, pričom jeho účinnosť obvykle dosahuje 87 %.

Komprimovaný vzduch sa v spaľovacej komore zmieša s palivom a zapáli. Pri horení plyného paliva sa uvoľní spalné teplo, v dôsledku čoho sa zvýši teplota vznikajúcich spalín až na 1600 °C. Za týchto podmienok, t. j. pri zvýšenom tlaku (kompresor) a teplote (spaľovacia komora), sa spaliny privedú do turbíny.

Moderné plynové turbíny sú tvorené tromi až piatimi stupňami lopatiek. Účinnosť takéhoto usporiadania dosahuje až 89 %. Prechodom cez turbínu sa zníži nielen tlak spalín, ale tiež ich teplota.

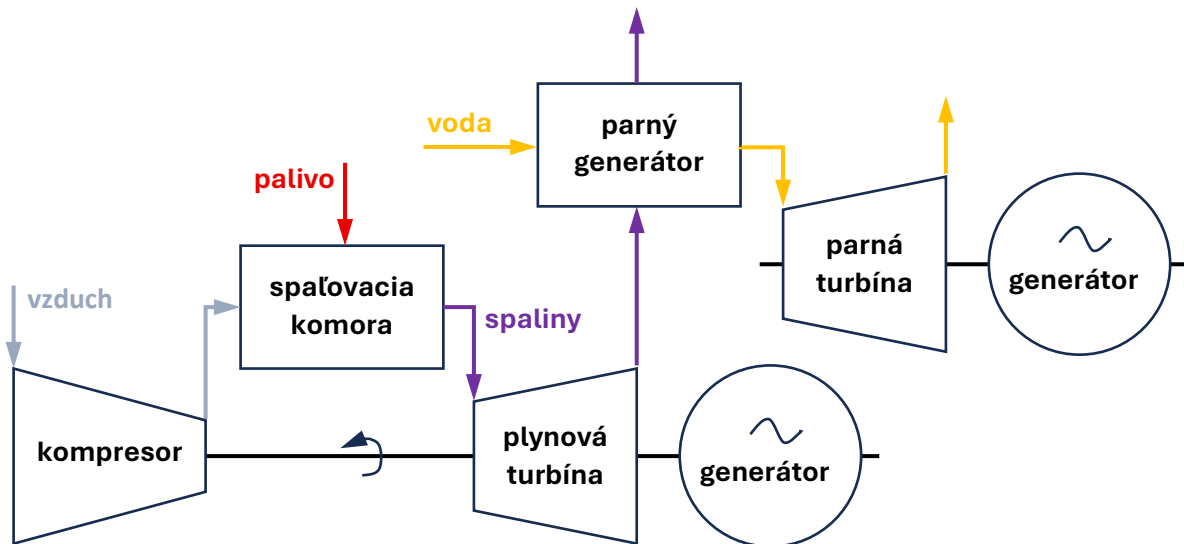
V prípade jednoduchých plynových turbín je výhodné, ak spaliny vystupujúce z turbíny majú čo najnižšiu teplotu. Nie je to však pravda v prípade plynových turbín pracujúcich v kombinovanom cykle, kde sa tepelná energia spalín ďalej používa na ohrev pary a ďalšiu výrobu elektrickej energie v parnej turbíne. Najväčšie priemyselné plynové turbíny preto zvyčajne pracujú v kombinovanom cykle, pričom samotná plynová turbína dosahuje účinnosť v rozsahu 38–42 % (Smith & Gülen, 2017).

Vývoj plynových turbín na výrobu elektrickej energie spaľovaním zemného plynu sa spočiatku orientoval na vylepšenie konštrukcie kompresora a samotnej turbíny. V súčasnosti sa výrobcovia pri zvyšovaní účinnosti plynových turbín zameriavajú na zvýšenie teploty spalín vstupujúcich do turbíny, pričom najnovšou metódou je teplota 1700 °C. Pri uvedenej teplote je okrem použitia špeciálnych materiálov turbíny, napr. monokryštálov zliatin niklu, potrebné použiť aj špeciálnu izoláciu a interné chladenie súčastí turbíny (IEA, 2011; Breeze, 2019). Veľkou výzvou v tomto prípade je tiež zamedzenie tvorby oxidov dusíka v spaľovacej komore.

Ďalším spôsobom zvýšenia účinnosti plynových turbín je optimalizácia nastavenia režimu kompresie, spaľovania a expanzie plynu v turbíne. K tejto skupine opatrení na zvýšenie účinnosti plynových a paroplynových turbín patrí:

- použitie medzichladiča medzi nízko- a vysokotlakovým stupňom kompresie vzduchu na zníženie objemu komprimovaného vzduchu a kompresnej práce;
- ohriatie spalín medzi vysoko- a nízkotlakovým stupňom turbíny na zvýšenie užitočnej práce konanej turbínou;
- rekuperácia časti tepelného obsahu spalín na predohriatie komprimovaného vzduchu vstupujúceho do spaľovacej komory;
- vstrekovanie vody/vodnej pary do vzduchu pred a počas jeho kompresie alebo do spaľovacej komory na zvýšenie prietoku spalín cez turbínu.

Kombinovaný cyklus plynovej a parnej turbíny (**obrázok 2.1**) umožňuje efektívnejšie využitie tepelnej energie spalín, ktoré slúžia na výrobu vodnej pary a tá na výrobu ďalšieho množstva elektrickej energie v parnej turbíne. Spaliny, odchádzajúce z plynovej turbíny, stále obsahujú veľké množstvo tepelnej energie. Jej využitie na produkciu dodatočného množstva elektrickej energie znamená zvýšenie účinnosti celej jednotky nad 60 %. Skôr spomínané zvýšenie teploty spalín na 1700 °C by umožnilo dosiahnuť účinnosť kombinovaného cyklu až 65 % (Bohn, 2009; Breeze, 2019).



Obrázok 2.1 Schéma kombinovaného cyklu výroby elektrickej energie zo zemného plynu.

Kombinovaný cyklus výroby elektrickej energie zo ZP je pomerne variabilný. Výrobcovia ponúkajú jednotky s výkonom od niekoľko až po stovky MW. Napriek tomu, v dôsledku fluktuácie aktuálnej spotreby v elektrickej sieti, je veľkou výzvou pre paroplynové jednotky ich flexibilita. Úlohou výrobcov je zabezpečiť

vyšokú účinnosť kombinovaného cyklu aj pri menšom než 100 %-nom zaťažení výrobnjej jednotky. V tomto prípade je rozhodujúci spôsob riadenia prevádzky kombinovaného cyklu (Beiron et al., 2020; Bailera et al., 2020).

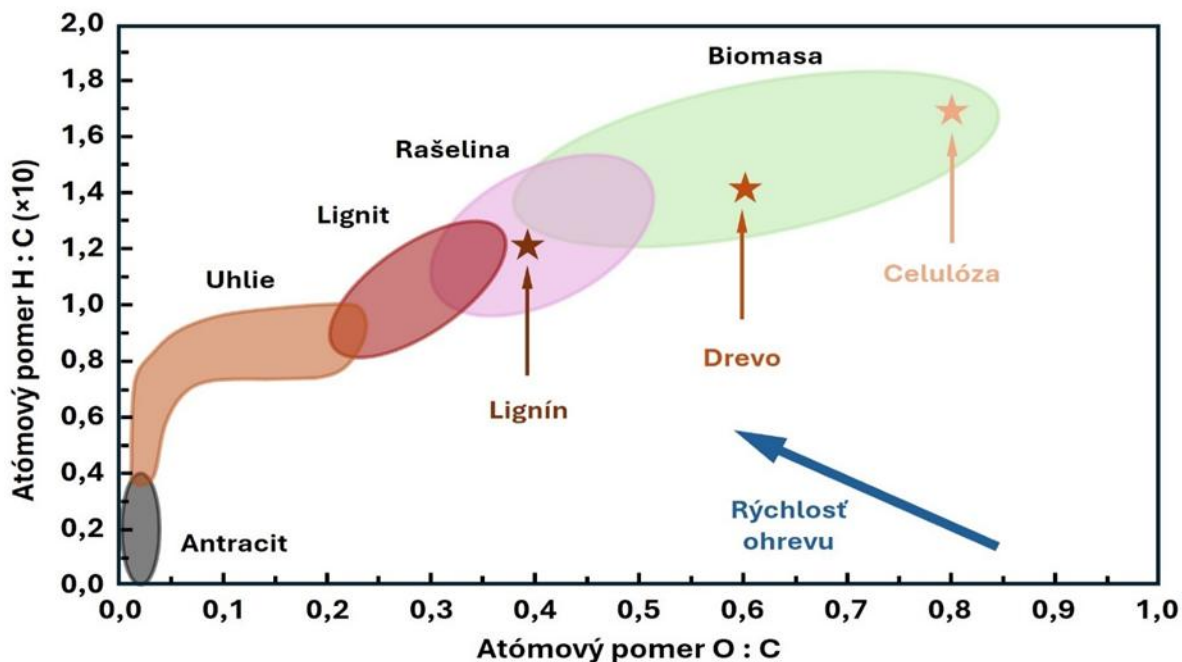
Ďalšie zvýšenie účinnosti využitia energie zo zemného plynu a zároveň zníženie množstva emitovaného CO₂ predstavujú kogeneračné a trigeneračné jednotky (Jin, 2022; Wu & Wang, 2006).

V kogeneračnej jednotke sa teplo spalín odchádzajúcich z plynovej turbíny otvoreného cyklu alebo z generátora pary kombinovaného paroplynového cyklu ďalej použije na výrobu horúcej vody alebo na ohrev obytných priestorov či priemyselných objektov. Po optimalizácii prevádzky kogeneračnej jednotky dokážeme účinnosť využitia energie obsiahnutej v ZP zvýšiť až na 90 %. Táto skutočnosť súvisí s termodynamickými a technickými limitmi procesov a zariadení používanými v kogeneračných jednotkách (Breeze, 2019). Kogenerácia, kombinovaná výroba tepla a elektrickej energie, sa v roku 2016 podieľala 16 % na celosvetovej produkcii elektrickej energie. Množstvo tepelnej energie vyrobené touto technológiou dosiahlo v rovnakom čase hodnotu 11 EJ (Harmsen & Crijs-Graus, 2021).

Trigeneráciou sa rozumie produkcia chladu, tepla a elektrickej energie v jednej prevádzke. V tomto prípade sa v porovnaní s výrobou elektrickej energie alebo kogeneráciou tepla a elektrickej energie, použije produkované odpadné teplo v absorpčnom chladiacom cykle (Sonar, 2021). Trigeneračná jednotka popri produkcii elektrickej energie a tepla vyrába aj chladiace médium, chladiacu vodu. Simulácie činnosti trigeneračnej jednotky ukazujú účinnosť jednotky na úrovni 74–83 % (Altun, 2022; Alcântara et al., 2019).

Pri porovnávaní prevádzky otvoreného cyklu plynovej turbíny, kombinovaného paroplynového cyklu, kogeneračnej a trigeneračnej jednotky si treba uvedomiť, že kombinácia výroby tepla či tepla a chladu s elektrickou energiou znamená zníženie produkcie elektrickej energie oproti plynovému a paroplynovému cyklu (Harmsen & Crijs-Graus, 2021).

Vlastnosti uhlia ako zdroja energie



Obrázok 2.2 Adaptácia van Krevelenovho diagramu z publikácie Picheau et al. (2022).

V závislosti od podmienok zuhoľňovania, najmä trvania tohto procesu, rozlišujeme uhlie či tuhé palivá rôzneho zloženia a charakteru (pozri 1. kapitolu správy). Na **obrázku 2.2** je znázornená modifikácia van Krevelenovho diagramu (Picheau et al., 2022), ktorý klasifikuje rôzne druhy uhlia v závislosti od zastúpenia kyslíka, vodíka a uhlíka v ňom (pozri **tabuľku 1.6**). Ako vidno, zloženie uhlia je veľmi variabilné. Jeho energetický obsah rastie v rovnakom smere aký ukazuje šípka rastúcej teploty počas jeho spracovania/zuhoľňovania. Popri hlavných zložkách, uhlík, vodík a kyslík, obsahuje uhlie tiež síru, dusík a mnohé ďalšie prvky vrátane arzénu, ortuti a iných potenciálne nebezpečných látok.

Náleziská uhlia sú rozdelené po celom povrchu Zeme, jeho zásoby sú veľké a pomerne ľahko dostupné. Aj preto môžeme uhlie považovať za stabilný a relatívne lacný zdroj elektrickej energie. Nízka cena a jednoduchá dostupnosť uhlia kompenzuje viaceré nedostatky spojené s jeho použitím. V porovnaní s inými fosílnymi zdrojmi energie má uhlie nižšiu výhrevnosť (pozri **tabuľku 2.2**), na jeho transport nevieme použiť potrubné siete, obsahuje veľké množstvo nečistôt a nespáliteľného podielu. Vzhľadom na vysoký obsah síry vyžaduje jeho spaľovanie špeciálne narábanie so spalínami, podobne je to aj s produkciou oxidov dusíka. Spálenie jednotkového množstva uhlia vyprodukuje najväčšie množstvo CO₂ zo všetkých fosílnych palív. Nižšiu výhrevnosť ako uhlie má však biomasa. Nakoľko zloženie fosílnych aj obnoviteľných zdrojov energie je veľmi premenlivé v závislosti od lokality a podmienok ich vzniku či rastu, informácie v **tabuľke 2.2** predstavujú priemerné hodnoty, ktoré vychádzajú z údajov UNEP (2013).

Tabuľka 2.2 Výhrevnosť rôznych zdrojov energie (UNEP, 2013).

Palivo	Výhrevnosť		Palivo	Výhrevnosť	
	(MJ kg ⁻¹)	(kWh kg ⁻¹)		(MJ kg ⁻¹)	(kWh kg ⁻¹)
Lignit	9–14	2,5–3,9	Suché drevo	14–18	3,9–5,0
Hnedé uhlie	14–18	3,9–5,0	Drevné pelety	17–20	4,7–5,6
Čierne uhlie	24–30	6,7–8,3	Ropa	42–47	11,7–13,1
Antracit	30–35	8,3–9,7	Zemný plyn	38–49	10,5–13,6

V porovnaní so zemným plynom je uhlie oveľa komplexnejšia zmes, ktorej zloženie sa obvykle stanovuje ako zastúpenie jednotlivých prvkov. Z hľadiska energetického využitia je uhlie významným energetickým zdrojom, a to predovšetkým pre svoju relatívne vysokú výhrevnosť, dostupnosť a možnosti skladovania. Vlastnosti uhlia ako paliva závisia od viacerých fyzikálnych a chemických faktorov, ktoré určujú efektívnosť a ekologické dopady jeho spaľovania.

Výhrevnosť je kľúčovým parametrom pri hodnotení uhlia ako paliva. Obsah uhlíka a vlhkosti sú priamo úmerné jeho výhrevnosti. Obsah vlhkosti výrazne ovplyvňuje efektívnosť spaľovania, keďže časť energie sa spotrebuje na odparenie vody. Prchavé látky (uhlíkovodíky, CO, H₂) sa uvoľňujú pri zahrievaní uhlia a ovplyvňujú rýchlosť a charakter horenia. Čierne uhlie má nižší podiel prchavých látok ako hnedé uhlie, čo vedie k stabilnejšiemu a pomalšiemu horeniu. Popol je nežiaducou zložkou tohto tuhého fosílného paliva, ktorá zostáva po spaľovaní v zariadení. Jeho množstvo a chemické zloženie spolu so zložením spalín (korozívnosť) ovplyvňujú životnosť spaľovacích zariadení.

Uhlie je významným zdrojom emisií oxidu uhličitého (CO₂), ktorý je hlavným prispievateľom ku globálnemu otepľovaniu. Navyše, emisie tuhých častíc, oxidov síry a dusíka predstavujú environmentálne a zdravotné riziká. Preto sa výskum zameriava na „čistejšie technológie“ spaľovania uhlia, ktoré zahŕňajú fluidné spaľovanie, odsírenie spalín a zachytávanie CO₂.

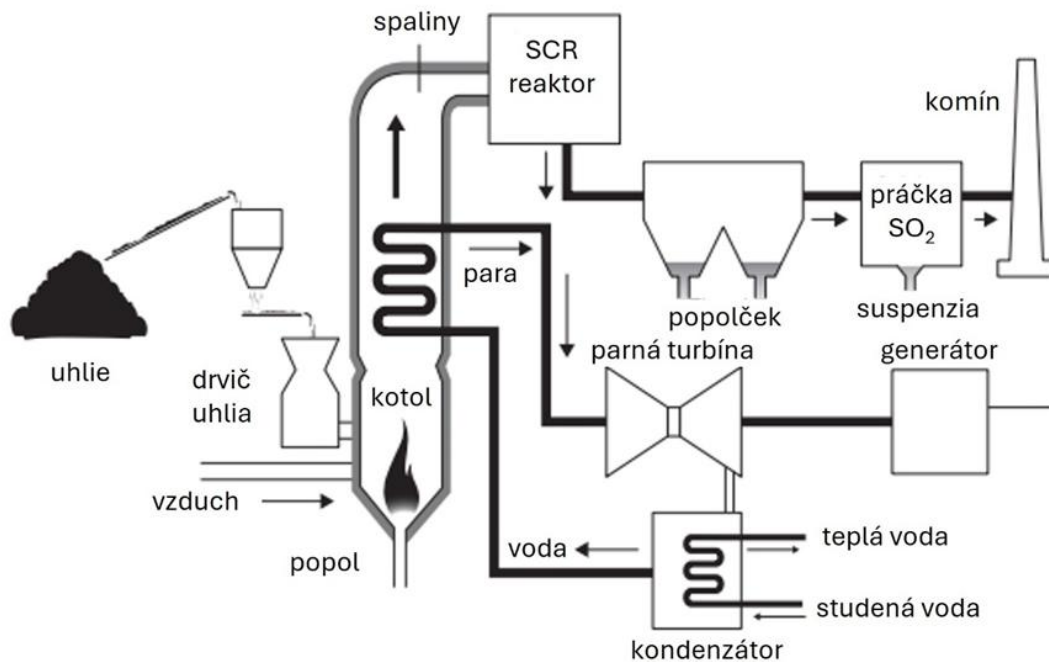
Použitie uhlia na výrobu tepla a elektrickej energie

Tradičný spôsob výroby elektrickej energie spaľovaním uhlia sa realizuje tak, že teplo, uvoľnené horením uhlia, sa používa na výrobu vodnej pary. Prechodom pary cez parnú turbínu sa vyrába elektrická energia. Táto technológia sa postupne vyvíjala a zlepšovala až po konštrukciu prvej modernej parnej turbíny Charlesom Parsonsom v roku 1884. Tepelná elektráreň zameraná na výrobu elektrickej energie spaľovaním uhlia zahŕňa niektoré kľúčové časti (IEA, 2011; Brum, 2012):

- príprava paliva (drvenie a mletie uhlia na prášok),
- spaľovacie zariadenie, ktorého súčasťou je kotol na výrobu pary a separácia popola,
- parná turbína obvykle pozostávajúca z niekoľkých stupňov,
- generátor elektrickej energie,
- systém na čistenie spalín, ktorý slúži na zachytenie popolčeka, oxidov dusíka a SO_2 .

Najnovšie tepelné elektrárne počítajú aj so zachytávaním CO_2 . Napriek značnému pokroku aj v tejto oblasti sa nedá čakať, že by činnosť uhoľnej elektrárne bola bezodpadová a bez emisií.

Z hľadiska účinnosti konverzie chemickej energie uhlia na elektrickú energiu platia niektoré limity a obmedzenia. V kotle dokážeme využiť maximálne 85 % z množstva uvoľnenej tepelnej energie na výrobu pary a konverzia tejto energie na elektrinu v parnej turbíne a pripojenom generátore je limitovaná termodynamickým Carnotovym cyklom. Účinnosť konverzie tepelného obsahu pary na elektrickú energiu preto závisí od teplotného a tlakového spádu v parnej turbíne. Čím vyššia je teplota a tlak vyrobenej pary, tým účinnejšia je konverzia tepelnej energie na elektrickú (Zhu, 2015). Z tohto hľadiska sú najdôležitejšími súčasťami tepelnej elektrárne kotol a parná turbína (IEA, 2011; Brum, 2012; Speight, 2021).



Obrázok 2.3 Schéma tepelnej elektrárne spaľujúcej uhlie, SCR reaktor (reaktor na selektívnu katalytickú redukciu NO_x). Adaptované z publikácie Breeze (2019).

Pri spaľovaní práškoveho uhlia vzduchom sa v kotle v najhorúcejšom mieste plameňa dosahujú teploty na úrovni 1500–1700 °C. Pri týchto teplotách dochádza ku oxidácii vzdušného dusíka kyslíkom. Preto je množstvo privádzaného vzduchu limitované, aby sa kyslík využil len na oxidáciu paliva. Keď, po odovzdaní

časti tepelnej energie vyrábanej vodnej pare, teplota spalín poklesne, pridáva sa do kotla ďalší podiel vzduch na úplné spálenie uhlia, pričom teplota už nie je dostatočne vysoká na výraznejšiu konverziu dusíka na jeho oxidy. Uvoľnené teplo slúži na ohriatie napájacej vody, jej odparenie a prehriatie vodnej pary. V prípade, ak je tlak vyrobenej vodnej pary nižší ako jej kritický tlak ($P_k = 221 \text{ bar}$, $t_k = 374,1 \text{ °C}$), odparenie vody sa realizuje vo výparníku integrovanom v kotle. Následne sa získaná para môže ďalej prehriať, aby sme dosiahli čo najvyššiu teplotu na vstupe do parnej turbíny (**obrázok 2.3**).

Novšie typy kotlov pracujú pri superkritických podmienkach, pri ktorých nie je potrebný výparník, čo zjednodušuje konštrukciu superkritického kotla. Účinnosť konverzie chemickej na elektrickú energiu v tzv. subkritických kotloch, ktoré vyrábajú vodnú paru pri subkritických podmienkach, obvykle 175 bar a 540 °C, dosahuje 38 %. V prípade tzv. superkritických kotlov, tlak 230–300 bar a teplota 540–600 °C, sa účinnosť tejto premeny môže zvýšiť na 41 %. Ak použijeme „ultra-kritické“ podmienky, t. j. ak je teplota superkritickej vody privádzanej do parnej turbíny vyššia než 593 °C, maximálna dosiahnutá účinnosť v takomto zariadení je až 45 % (IEA, 2011) s výhľadom nad 50 % (Basu & Debnath, 2019; Kindra et al. 2021). V prípade kogenerácie sa tepelná účinnosť procesu zvýši na 74 % (Cenuşa & Opriş, 2024).

Parná turbína je mechanické zariadenie v ktorom sa spájajú vlastnosti vodnej turbíny a veterného mlyna (Stodola, 1924). Úlohou parnej turbíny je transformovať energiu prúdiacej tekutiny (impulzná turbína) pričom súčasne dochádza ku zmene tlaku (reaktívna turbína) a teploty média. Moderná parná turbína býva rozdelená do niekoľkých stupňov, vysoko-, stredno- a nízkotlakového, pretože v jednom stupni by sa dosahovali príliš vysoké frekvencie otáčania hriadeľa vedúce až ku poškodeniu zariadenia. Pretože účinnosť parnej turbíny súvisí s poklesom teploty pary v turbíne, na zvýšenie účinnosti celého zariadenia sa para odchádzajúca z vysokotlakovej turbíny zvykne prehriať a až potom sa vedie do strednotlakovej turbíny (Kindra et al. 2021).

Ako v prípade elektrárne spaľujúcej zemný plyn, aj pri uhoľných elektrárňach sa okrem účinnosti dostáva do popredia pozornosti aj ich flexibilita, prevádzka elektrárne pri plnom ako aj pri čiastočnom zaťažení. Vzhľadom na zvýšený podiel obnoviteľných zdrojov elektrickej energie, ktoré však do siete nedodávajú konštantné množstvo energie (veterné, slnečné elektrárne), musia byť moderné tepelné elektrárne flexibilné a schopné zastúpiť výpadok resp. znížiť svoj výkon po nabehnutí alternatívnych zdrojov energie. Obvykle sa zmena výkonu tepelnej elektrárne dosahuje zmenou tlaku pri expanzii vodnej pary v turbíne pričom sa zachovávajú teplotné pomery. Za týchto podmienok sa darí udržiavať pomerne vysokú účinnosť elektrárne napriek zníženiu tlaku pary (Henderson, 2014; Breeze, 2019; Liu et al., 2024). Flexibilitu výkonu tepelnej elektrárne môžeme upraviť tiež predradením horáka pred zariadenie na splynovanie uhlia (Zhang et al., 2025), prípadne integrovaním zásobníka tepelnej energie (Richter et al., 2019).

Vlastnosti biomasy ako zdroja energie

V **tabuľke 2.3** sú uvedené vybrané vlastnosti základných typov drevnej biomasy. Z hľadiska použitia biomasy ako paliva je jej najvýznamnejšou vlastnosťou výhrevnosť. Dolná výhrevnosť suchej drevnej biomasy sa pohybuje v rozsahu od 3,9–5,6 kWh kg⁻¹ (14–20 MJ kg⁻¹). Hustota rôznych typov dreva sa pohybuje v intervale 400–750 kg m⁻³. Pri preprave a skladovaní biomasy je dôležitým parametrom sypná hmotnosť, ktorá sa v závislosti od obsahu vlhkosti a typu dreva pohybuje v rozmedzí 200–400 kg m⁻³. Drevné pelety majú vo všeobecnosti vyššiu sypnú hmotnosť, ktorá závisí okrem iného aj od veľkosti peliet. Sypná hmotnosť štandardných peliet sa pohybuje v rozsahu 550–750 kg m⁻³ (ISO, 2025).

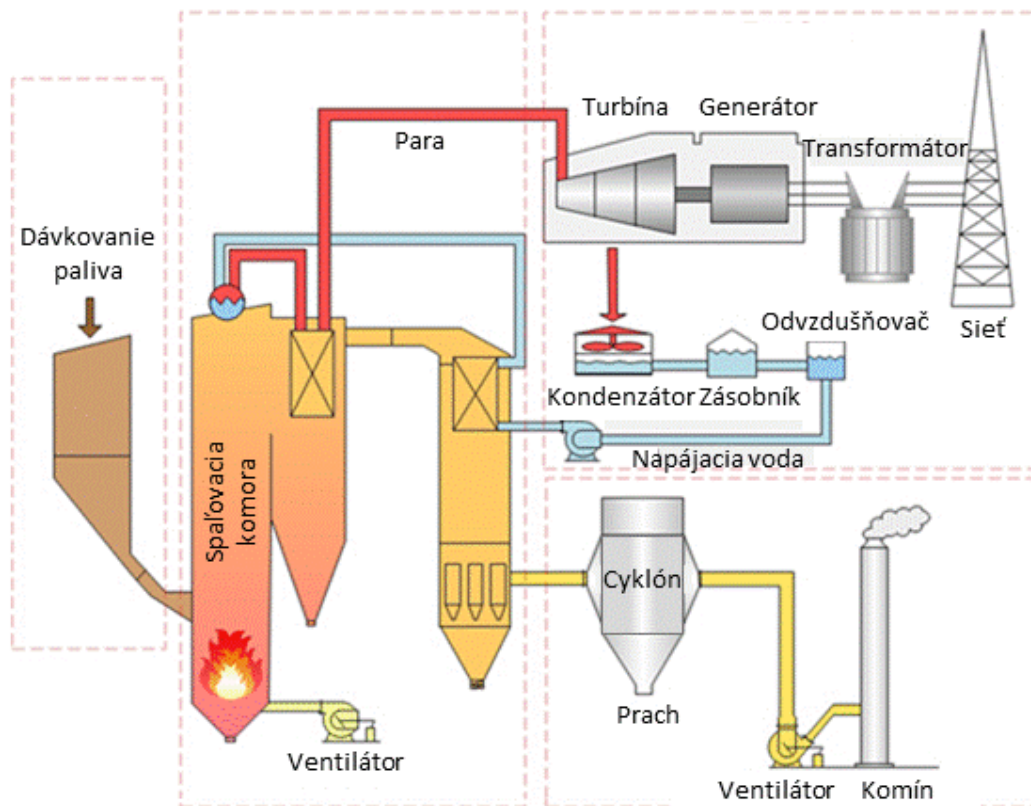
Z porovnaní v **tabuľke 2.3** vidno, že kvôli vyššiemu podielu prchavých zložiek biomasa začína horieť pri nižšej teplote a pri jej horení sa dosahuje nižšia teplota, čo súvisí aj s vyšším obsahom vlhkosti v porovnaní s uhlím. Oproti uhliu obsahuje biomasa nižší podiel popolovín, čo znižuje množstvo tuhého odpadu zostávajúceho po jej spálení.

Použitie biomasy na výrobu tepla a elektrickej energie

Technológia priameho spaľovania uhlia a následne aj biomasy s cieľom výroby energie sa rozvíja od 19. storočia. Najstarší používaný spôsob bol vsádzkový, keď sa do kotla naložilo palivo, pod ktorým sa rozložil oheň a privádzal vzduch na jeho spaľovanie. Na zvýšenie účinnosti spaľovania sa vzduch privádzal aj nad vrstvu paliva, aby sa zabezpečilo jeho úplné spálenie. Tento spôsob spaľovania biomasy trpí typickými nedostatkami vsádzkových procesov, meniacim sa výkonom. Napriek nedostatkom, tento spôsob umožňuje spaľovanie suchého aj vlhkého paliva. Celková účinnosť procesu nepresahuje 20 %, čo súvisí nielen s nižším energetickým obsahom paliva, ale najmä s nižšou teplotou dosahovanou v spaľovacej komore, keď teplota spalín nepresahuje 800–1000 °C (McKendry, 2002b).

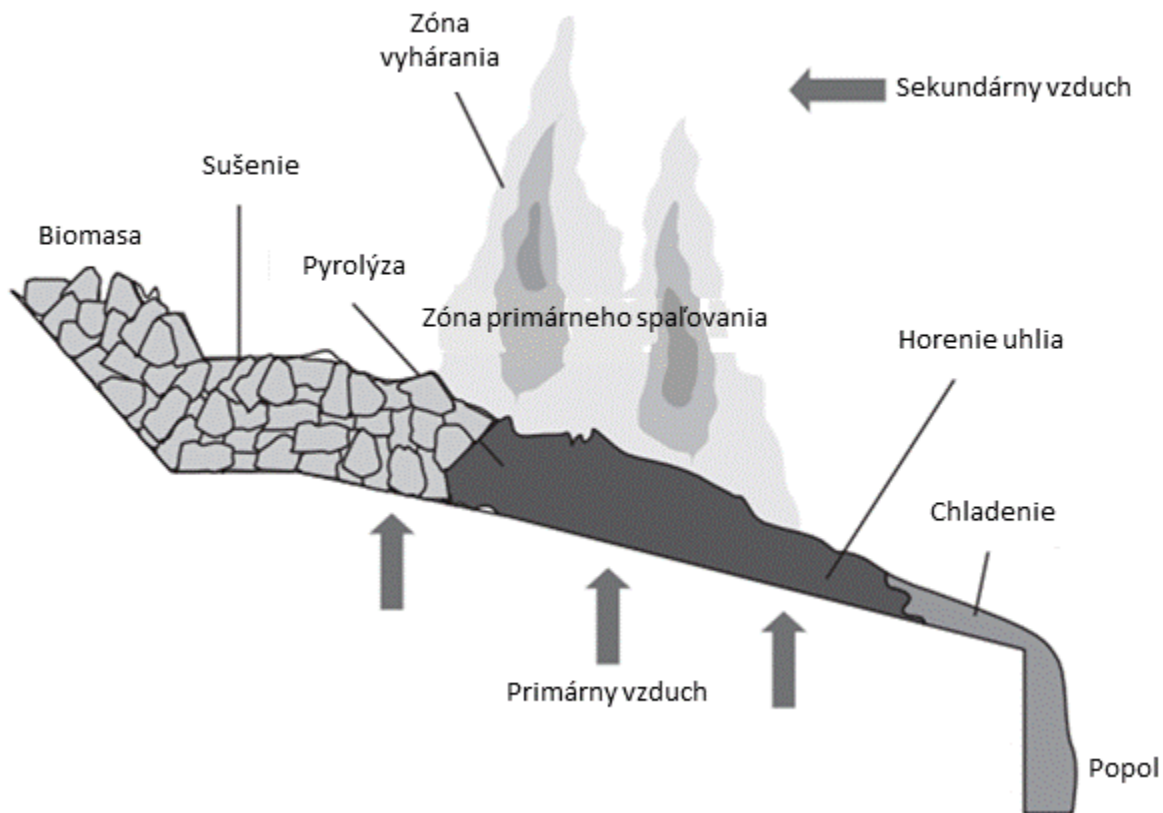
Tabuľka 2.3 Vybrané vlastnosti drevnej biomasy (Demirbaş, 2001; McKendry, 2002a; Vassilev et al., 2010).

Parameter	Jednotka	Listnaté drevo	Ihličnaté drevo	Kôra
Hustota pri 20 °C (suchá biomasa)	kg m ⁻³	600–750	400–550	300–500
Výhrevnosť (suchá biomasa)	MJ kg ⁻¹	18–19	19–20	17–18
	kWh kg ⁻¹	5,0–5,3	5,3–5,6	4,7–5,0
Prirodzený obsah vlhkosti	hmot. %	30–50	35–60	45–65
Obsah popola (suchá biomasa)	hmot. %	0.3–1.0	0.1–0.5	2.0–8.0
Obsah uhlíka	hmot. %	45–50	48–52	45–50
Obsah vodíka	hmot. %	5–6	5–6	5–6
Obsah kyslíka	hmot. %	42–45	40–43	40–45



Obrázok 2.4 Schéma elektrárne na biomasu s jej priamym spaľovaním. Adaptované zo stránky Yokogawa Electric Corporation (2025).

Vylepšením diskontinuálneho spaľovania biomasy je spaľovacia komora s podávačom paliva a kontinuálnym odstraňovaním popola (**obrázok 2.4**). Vďaka postupnému pridávaniu paliva cez podávač sa proces spaľovania stáva kontinuálnym, vhodným nielen na použitie v domácnosti, ale aj pre priemyselné aplikácie. V spaľovacej komore sa pridávaná biomasa najskôr dosuší, následne podlieha tepelnému rozkladu a nakoniec sa spaľuje (**obrázok 2.5**). Aby spaľovanie prebiehalo bez problémov, použité palivo musí spĺňať niektoré požiadavky, ktoré sa týkajú najmä veľkosti spaľovaných častíc biomasy a maximálneho obsahu vlhkosti v nich (do 15 %). Obvykle sa tento postup používa pri spaľovaní uhlia s prídavkom biomasy, ktorej zastúpenie v palive je 5–15 % (Baskar et al., 2012).



Obrázok 2.5 Rez spaľovacou komorou s podávačom paliva. Adaptované z publikácie Breeze (2019).

V priemyselnom rozsahu sa elektrická energia vyrába priamym spaľovaním biomasy v spaľovacej komore vo fluidizovanej vrstve. Fluidizovanú vrstvu vytvára inertný materiál, obvykle piesok, cez ktorý primeranou rýchlosťou prechádza vzduch a častice inertného materiálu dostáva do vznosu. Po vyhriatí fluidného reaktora na prevádzkovú teplotu sa k inertnému materiálu primieša biomasa. Jej zastúpenie vo fluidizovanej vrstve nepresahuje 5 % z množstva tuhého materiálu. Po vyhorení častíc biomasy ich hmotnosť klesne a prúdom spalín je popol unášaný do cyklónu, separátora na oddelenie tuhých častíc od plynnej fázy. Maximálna účinnosť konverzie energie dosahovaná v takomto zariadení je na úrovni 25 %. Optimalizáciou podmienok priameho spaľovania biomasy, najmä znížením jej vlhkosti, a vývojom technológií sa očakáva, že účinnosť procesu sa môže zvýšiť nad 30 % (van den Broek, 1996; IEA, 2021). V prípade použitia kogenerácie pri spaľovaní biomasy sa dosahuje účinnosť využitia energie až 85 % (Abbas et al., 2020).

Ako bolo spomenuté skôr, primárnym faktorom rozhodujúcim o účinnosti procesu výroby elektrickej energie je teplota dosahovaná v spaľovacom zariadení. Jej zvýšenie môžeme dosiahnuť použitím zmesi uhlia a biomasy. Technológia spoločného spaľovania uhlia a biomasy v zásade zodpovedá technológii tepelnej elektrárne na uhlie. Použitie biomasy v tepelnej elektrárni však prináša aj niektoré technické problémy, ako napríklad blokovanie dávkovacieho systému, problémy v spaľovacej komore v dôsledku vyššieho obsahu oxidov alkalických kovov, zvýšenie spotreby vzduchu na úplné spálenie prchavých podielov biomasy a pod. Dosahovaná účinnosť premeny energie paliva pri spoločnom spaľovaní uhlia a biomasy je v optimálnom prípade na úrovni 40 % (Breeze, 2019; Bhoi et al., 2025).

Ďalšou možnosťou zvýšenia teploty v spaľovacej komore je „zušľachtenie“ paliva, ktoré sa dosahuje karbonizáciou, pyrolýzou alebo splynovaním biomasy. V tomto prípade sa snažíme o tepelný rozklad biomasy, ktorého produktom je drevné uhlie, dechty a procesný plyn. Podmienkami v zariadení na tepelný rozklad biomasy: teplota, použité splynovacie médium, jeho množstvo, zdržný čas biomasy v reaktore atď., vieme ovplyvniť zastúpenie a zloženie jeho produktov. Pri hodnotení účinnosti využitia biomasy týmto spôsobom si treba uvedomiť, že tepelný rozklad biomasy je energeticky náročný. Na dosiahnutie teploty rozkladu biomasy sa jej časť musí spáliť, čo znižuje účinnosť konverzie. Navyše, využitie procesného plynu a dechtov na energetické účely vyžaduje ich úpravu.

Použitie zemného plynu, uhlia a biomasy ako zdroja tepla a na varenie v domácnosti

V domácnosti sa obnoviteľné aj neobnoviteľné zdroje energie používajú predovšetkým na varenie, kúrenie a produkciu teplej úžitkovej vody. Z hľadiska využitia zdrojov energie v domácnosti je zemný plyn, v porovnaní s uhlím a biomasou, najuniverzálnejší a preto je v Európskej únii najviac rozšírený. Univerzalitu a nižšie náklady pri použití zemného plynu na varenie a ohrev v domácnosti ilustruje jeho väčšie zastúpenie aj v porovnaní s použitím elektrickej energie na tieto účely (Sarabia-Escriba et al., 2023). V neposlednom rade, rozšírenie použitia zemného plynu v domácnostiach súvisí s plynifikáciou krajiny. Napr. na Slovensku je dodávkami zemného plynu pokrytých viac ako 77 % obcí, v ktorých žije približne 94 % obyvateľov (SITA, 2020).

Pri varení a pečení v domácnosti sa zemný plyn používa v plynových sporákoch a rúrach. Jedná sa pri tom o priame spaľovanie zemného plynu so vzduchom, pri ktorom sa uvoľnená energia využije na ohrev potravín. V prípade modernejších plynových sporákov, tepelná účinnosť horáka dosahuje 30–44 %, v závislosti od jeho konštrukcie a smeru prúdenia horľavej plynnej zmesi. V prípade tradičných typov sporákov je účinnosť nižšia, len na úrovni 15–25 %. Veľká časť tepla vznikajúca horením plynu pritom uniká nevyužitá v prúde spalín. Tepelnú účinnosť až 60 % možno dosiahnuť použitím porézneho sálavého recirkulačného horáka kombinovaného s plameň víriacim centrálnym kruhovým horákom (Jugjai & Rungsimuntuchart, 2002).

Významným negatívom použitia zemného plynu na varenie v domácnosti sú spaliny, ktoré sa pri priamom spaľovaní plynu dostávajú do obývaných priestorov. Na základe veľkého množstva štúdií bolo potvrdené podozrenie, že v prípade nevetraných priestorov sa pri priamom spaľovaní zemného plynu do vzduchu uvoľňuje okrem CO₂ aj nadlimitné množstvo oxidu dusičitého, NO₂, a tuhých častíc s hydraulickým priemerom menším ako 2,5 μm, PM_{2.5}. Okrem toho, pri nedokonalom spaľovaní zemného plynu uniká do prostredia aj menšie množstvo oxidu uhoľnatého, CO, polycyklické aromatické zlúčeniny, formaldehyd, a tiež nespálený metán (Barros & Fontes, 2024; Jaffe & Creekmore, 2024; Lebel et al., 2022).

V súčasnosti je na ročnej báze stanovená priemerná koncentrácia NO₂ vo vzduchu v Európskej únii na úrovni 40 μg m⁻³, pričom táto hodnota môže byť krátkodobo prekročená do úrovne 200 μg m⁻³ 18-krát za rok (The European Parliament, 2008). Pri varení v nevetranej kuchyni sa dosahujú hodnoty koncentrácie NO₂ niekedy až sedemkrát vyššie, než sú povolené hodinové limity. Na druhej strane si však treba

uvedomiť, že podstatnú časť z tohto množstva predstavuje NO₂ prítomný vo vzduchu v okolí domácnosti (Barros & Fontes, 2024). Napríklad v oblastiach Slovenska, kde sa primárne kúri drevom, sú priemerné ročné hodnoty NO₂ v ovzduší pravidelne prekročené. Vážnym problémom pri varení v domácnosti je tiež produkcia častíc s priemerom menším ako 2,5 µm. Ich tvorba však nie je špecifikom pri spaľovaní zemného plynu, pretože takéto častice vznikajú najmä pri vyprášaní a tepelnej úprave mastných potravín pri vysokej teplote bez ohľadu na použitý typ sporáka (Balmes et al., 2023).

Zdravotné riziká emisií NO_x pri varení boli predmetom štúdie Gruenwald et al. (2023). Autori nenašli príčinnú súvislosť medzi spaľovaním zemného plynu a detskou astmou. Výsledky ich štúdie však ukázali koreláciu medzi množstvom častíc PM_{2.5} vznikajúcich pri varení a týmto ochorením. Preto sa autori domnievajú, že príčinou zvýšeného výskytu detskej astmy vyvolanej varením v domácnosti nie sú emisie NO₂ vznikajúce pri spaľovaní zemného plynu, ale malé častice emitované pri vyprášaní potravín pri vysokej teplote, prípadné iné dosiaľ neodhalené vplyvy (Gruenwald et al., 2023; Tormey & Huntley, 2023).

Koncentrácia znečisťujúcich látok vznikajúcich pri priamom spaľovaní zemného plynu a tiež pri varení závisí od viacerých faktorov, najmä od dĺžky varenia, teploty pri varení a ďalej od priestorovej konfigurácie a spôsobu ventilácie kuchyne (Tormey & Huntley, 2023). Predovšetkým použitím vhodnej ventilácie dokážeme výrazným spôsobom znížiť množstvo znečisťujúcich látok v priestoroch kuchyne. Obvykle sa na tento účel používajú výkonné digestory alebo intenzívne vetranie. V takom prípade, a ak je obsah znečisťujúcich látok v ovzduší v norme, vieme dosiahnuť aj požadovanú čistotu vzduchu v kuchyni (Balmes et al., 2023; Barros & Fontes, 2024; Jaffe & Creekmore, 2024; Lebel et al., 2022; Tormey & Huntley, 2023).

Ďalšou dôležitou znečisťujúcou látkou, ktorá uniká pri varení použitím sporákov na zemný plyn je samotný metán. Do prostredia sa dostáva predovšetkým počas zapínania a vypínania horáka. Lebel et al. (2022) kvantifikovali, že pri varení na plynových sporákoch uniká 0,8–1,3 % z množstva použitého zemného plynu. V prípade USA to predstavuje únik až 28,1 kt metánu za rok (Lebel et al., 2022). Vzhľadom na ekvivalent CO₂ pre metán (pozri kapitolu 4), je to významný faktor znečistenia ovzdušia skleníkovými plynmi.

Na kúrenie a ohrev úžitkovej vody sa v domácnostiach používajú rôzne bojler, kotle a krbové kachle. Podľa údajov z projektu Stratego: Enhanced Heating & Cooling Plans (Persson & Werner, 2015) bola priemerná účinnosť kotlov na zemný plyn používaných v domácnostiach v roku 2015 na úrovni 85 % (**tabuľka 2.4**, bez kondenzácie). Najvyššiu účinnosť, 90–98 %, dosahujú kondenzačné kotle. Oproti bežnému kotlu na zemný plyn, je konštrukcia kondenzačného kotla prispôbená tak, aby vodná para vznikajúca pri spaľovaní zemného plynu vo výmenníku tepla skondenzovala. Tak dokážeme využiť jej tepelný obsah a zvýšiť tepelnú účinnosť spaľovania zemného plynu.

Tabuľka 2.4 Účinnosť kotlov využívajúcich rôzne typy paliva (Persson & Werner, 2015).

Palivo	Priemerná účinnosť (%)	Maximálna účinnosť (%)
Zemný plyn	85	90–98
Uhlie	65	70–87
Biomasa	65	70–87

V prípade použitia uhlia alebo drevnej biomasy na varenie a kúrenie sa používajú rovnaké typy zariadení. Na varenie slúžia rôzne sporáky na pevné palivo a na ohrev rozličné druhy kotlov a krbových kachiel.

Účinnosť využitia tepla vznikajúceho pri horení uhlia alebo biomasy v moderných sporákoch dosahuje podľa rôznych výrobcov hodnotu 75–83 % (hodnoty z rozsahu uvedeného v **tabuľke 2.4**). V laboratórnych podmienkach dosiahnutá tepelná účinnosť spaľovania uhoľných brikiet v sporáku bola až na úrovni 87 % (Ahmad et al., 2022).

Výhodou použitia sporákov na tuhé palivo je najmä energetická nezávislosť (od zdroja elektriny a rozvodu plynu), použitie lacného paliva, možnosť využiť sporák aj na kúrenie a ohrev vody a, v prípade použitia dreva ako zdroja energie, aj udržateľnosť. K nevýhodám použitia týchto sporákov patrí menej pohodlná manipulácia s palivom, ktorá je navyše sprevádzaná zvýšenou prašnosťou. V dôsledku spaľovania tuhého paliva v nie úplne tesnom zariadení sú problémom tiež emisie CO, prachových častíc, polycyklických aromatických zlúčenín a formaldehydu (Ricardo Energy & Environment, 2024). Tieto látky môžu spôsobiť ohrozenie života (CO) alebo mať negatívny vplyv na zdravie osôb žijúcich v takejto domácnosti (Martins & Carrilho da Graça, 2023). V neposlednom rade, sporáky na tuhé palivo (najmä uhlie) majú negatívny vplyv na životné prostredie.

V prípade kúrenia a ohrevu úžitkovej vody je účinnosť používaných kotlov závislá najmä od ich konštrukcie. Staršie typy kotlov dosahujú účinnosť 56–70 % v dôsledku tepelných strát do okolia a nepostačujúceho využitia tepelného obsahu spalín. Akonáhle sa prirodzené prúdenie vzduchu cez kotel nahradí riadeným prietokom, účinnosť využitia paliva sa môže zvýšiť na 80–83 %. Ďalšími vylepšeniami v dizajne kotlov na pevné palivo sú využitie kondenzačného tepla vodnej pary prítomnej v spalínach (kondenzačný kotol) a tzv. „uzatvorené“ spaľovanie. „Uzatvorené“ spaľovanie sa realizuje v definovanom priestore kotla pri presnej regulácii pomeru množstva paliva a vzduchu použitého na jeho spaľovanie. Účinnosť takýchto kotlov dosahuje hodnotu 85–98 % (DOE, 2025b; Vakkilainen, 2017).

V prípade vykurovania obytných priestorov sálavým teplom sa v súčasnosti ako štandard používajú krbové kachle. Podľa údajov asociácie výrobcov krbov (SIA, 2025), účinnosť využitia energie pevného paliva v tomto type zariadení dosahuje hodnotu 70–80 %. Účinnosť využitia energie je do značnej miery ovplyvnená typom použitého paliva, biomasy. Najlepšie výsledky, účinnosť až 85 %, sa dosahujú v prípade spaľovania drevných brikiet.

Porovnanie účinnosti výroby energie a tepla z vybraných zdrojov energie

Tabuľka 2.5 sumarizuje technológie používané pri výrobe elektrickej energie a tepla zo zemného plynu, uhlia a biomasy. V prípade pevných palív, uhlia a biomasy, sa okrem priameho spaľovania používa tiež ich tepelný rozklad, ktorého produktom je „zušľachtené“ palivo, koks alebo drevné uhlie, decht a procesný plyn. Získané kvapalné a plynné produkty môžu slúžiť na podobné účely ako zemný plyn, t. j. ako palivo v kotle, ku ktorému je pripojená plynová turbína. Na zvýšenie účinnosti využitia energie paliva sa používa kogenerácia tepla a elektrickej energie. V domácnosti sa vyššie spomínané druhy palív obvykle spaľujú a uvoľnené teplo nachádza použitie pri varení, kúrení a výrobe teplej úžitkovej vody.

Tabuľka 2.5 Prehľad technológií používaných na výrobu elektrickej energie a tepla zo zemného plynu, uhlia a biomasy (Breeze, 2019; Persson & Werner, 2015).

Spôsob použitia	Zemný plyn	Uhlie	Biomasa (drevná)
Priemyselná výroba elektrickej energie a tepla (a chladu)		Priame spaľovanie	
	–	Tepelný rozklad (splynovanie, pyrolýza) a spaľovanie získaných produktov (koks alebo drevné uhlie, decht a procesný plyn)	
		Kogenerácia tepla a elektrickej energie	
		Trigenerácia chladu, tepla a elektrickej energie	
Varenie kúrenie a ohrev teplej úžitkovej vody v domácnosti		Priame spaľovanie	

Prehľad zariadení a ich účinnosti pri využití energetického potenciálu zemného plynu, uhlia a biomasy je uvedený v **tabuľke 2.6**. V tabuľke sú zhrnuté informácie pre optimalizované technológie výroby tepla a elektrickej energie, ktoré nachádzajú uplatnenie v priemyselnej praxi, a pre zariadenia bežne používané v modernej domácnosti.

Tabuľka 2.6 Prehľad zariadení používaných pri výrobe elektrickej energie a tepla zo zemného plynu, uhlia a biomasy a celková účinnosť premeny ich energetického potenciálu (Breeze, 2019; Persson & Werner, 2015; DOE, 2025b; Vakkilainen, 2017; SIA, 2025).

Technológia	Zemný plyn	Uhlie	Biomasa (drevná)
	Typ zariadenia a jeho účinnosť		
Priame spaľovanie	Kotol + plynová turbína + generátor pary + parná turbína účinnosť ~ 60 %	Kotol + generátor pary + parná turbína účinnosť 38–41 %	Kotol + generátor pary + parná turbína účinnosť 25–34 %
Kogenerácia tepla a elektrickej energie	Kotol + plynová turbína + generátor pary + parná turbína + ekonomizér účinnosť ~ 90 %	Kotol + generátor pary + parná turbína + ekonomizér účinnosť ~ 74 %	Kotol + generátor pary + plynová turbína + ekonomizér účinnosť ~ 85 %
Trigenerácia chladu, tepla a elektrickej energie	Kotol + plynová turbína + parná turbína + výmenník tepla + absorpčný chladič účinnosť 74–83 %	Kotol + parná turbína + výmenník tepla + absorpčný chladič účinnosť 60–70 %	Kotol + parná turbína + výmenník tepla + absorpčný chladič účinnosť 70–85 %
Varenie v domácnosti	Plynový sporák účinnosť 15–25 %	Sporák (moderný) účinnosť 55–70 %	Sporák (moderný) účinnosť 55–70 %
Kúrenie a ohrev teplej úžitkovej vody v domácnosti	Kotol účinnosť ~ 85 %	Kotol účinnosť ~ 65 %	Kotol účinnosť ~ 65 %
	Kondenzačný kotol účinnosť 94–95 %	Kondenzačný kotol účinnosť 88–92 %	Kondenzačný kotol účinnosť 85–91 %
	–	–	Krbové kachle účinnosť 70–80 %

Na účinnosť premeny energetického potenciálu použitých palív vplýva viacero faktorov. Predovšetkým to je:

- energetický obsah paliva;
- obsah nečistôt (napr. nespáliteľné látky, popoloviny, vlhkosť, ťažké kovy, ...) v palive;
- dosiahnutý stupeň rozvoja technológie a zariadení používaných na výrobu tepla a elektrickej energie z použitého paliva.

3 Výhody a nevýhody použitia zemného plynu ako paliva v porovnaní s uhlím a biomasou

Úvod

Kapitola úzko nadväzuje na predchádzajúcu, v ktorej boli hodnotené vlastnosti vybraných fosílnych a obnoviteľných zdrojov energie z hľadiska ich využitia ako zdroja tepla a energie. Vzhľadom na rozsah štúdie sa táto kapitola zameriava na porovnanie niektorých kritérií výroby tepla a energie zo ZP, uhlia a biomasy, predovšetkým sa jedná o ich použiteľnosť a ekonomické náklady výroby energie. Vplyvu technológie výroby energie z vybraných zdrojov energie na životné prostredie sa venujú nasledujúce kapitoly. Na záver kapitoly je uvedená prípadová štúdia použitia zemného plynu, uhlia a biomasy na vykurovanie obytného domu s vykurovanou plochou 150 m² a porovnanie jednotlivých zdrojov tepla.

Údaje uvedené v tejto kapitole sú v prevažnej miere prebrané z literatúry citovanej v 2. kapitole štúdie. Dáta, ktoré doteraz neboli spomenuté v 2. kapitole, pochádzajú z nasledujúcich zdrojov: Allen (2014), Hafner & Luciani (2022), Shen et al. (2023), Cansino-Loeza & Ponce-Ortega (2024).

Výhody a nevýhody použitia zemného plynu na výrobu tepla a energie

Výhody zemného plynu ako nosiča energie súvisia s jeho chemickým zložením a fyzikálnymi vlastnosťami. Do veľkej miery sú však podmienené aj aktuálnym stavom technológií používaných pri výrobe tepla a energie či v doprave. Medzi najdôležitejšie výhody zemného plynu patria:

- zemný plyn predstavuje takmer čisté chemické individuum, metán, t. j. obsahuje iba uhlík a vodík v hmotnostnom pomere 3 : 1;
- po úprave ZP neobsahuje takmer žiadne kontaminanty, ktoré by spôsobovali dodatočné znečistenie ovzdušia po jeho spálení, obsah síry je obvykle nižší ako 0,01 hmot. %;
- má vyšší energetický obsah (vyššiu výhrevnosť) v porovnaní s inými fosílnymi zdrojmi energie alebo biomasou (pozri údaje v **tabuľke 2.2**);
- nachádza sa v plynnom skupenstve, čo uľahčuje jeho prepravu v prípade existencie prepravnej infraštruktúry;
- pri spaľovaní zemného plynu nevznikajú takmer žiadne tuhé častice a emisie CO₂ sú nižšie v porovnaní s inými fosílnymi zdrojmi energie, pri výrobe 1 GJ (278 kWh) tepelnej energie vznikne spaľovaním ZP priemerne 50–56 kg CO₂;
- pomerne univerzálny energetický zdroj s možnosťou použitia pri výrobe tepla, elektrickej energie a tiež v doprave;
- dosiahnutý stupeň rozvoja technológií využívajúcich zemný plyn ako zdroj energie umožňuje vysokú účinnosť konverzie energetického obsahu paliva na teplo (až 98 %) a elektrickú energiu (~ 60 %) a pomerne vysokú účinnosť pri použití v doprave v spaľovacích motoroch (35–45 %);
- vďaka rýchlemu nábehu výrobnej jednotky a jednoduchšej regulácii (flexibilita) môžeme zariadenia poháňané zemným plynom používať ako záložný zdroj energie a tepla.

Nevýhody používania zemného plynu sú primárne spôsobené jeho pôvodom (fosílna palivo) a spôsobom získavania (negatívny vplyv ťažby ZP na životné prostredie). Ďalšie nevýhody používania ZP súvisia s jeho dopravou a v neposlednom rade aj dostupnosťou a cenou, kvôli nerovnomernému rozmiestneniu jeho ložísk vo svete. Významnou položkou pri zvyšovaní množstva energie vyrobenej zo zemného plynu sú investičné náklady na vybudovanie novej elektrárne, kogeneračnej alebo trigeneračnej jednotky.

- zemný plyn patrí medzi fosílné, neobnovujúce sa, palivá, ktorých spaľovaním vzniká CO₂, skleníkový plyn spoluzodpovedný za klimatické zmeny na Zemi;
- samotný metán je 82,5-krát účinnejším skleníkovým plynom ako oxid uhličitý; úniky metánu v priebehu ťažby, spracovania a dopravy sú preto extrémne nebezpečné pre životné prostredie (reportované údaje o úniku pri ťažbe sa rôznia, uvádzané straty zemného plynu sú v rozmedzí 1–10 % z produkovaného množstva, odhadované množstvo sú rádovo desiatky Mt metánu ročne);
- pri preprave na väčšie vzdialenosti a v prípade, ak nie je k dispozícii infraštruktúra, sú potrebné dodatočné náklady na komprimovanie alebo skvapalnenie zemného plynu (CNG, LNG);
- finančne náročná výstavba a údržba prepravnej infraštruktúry a skladovacích priestorov;
- limitovaná dostupnosť zemného plynu, ktorá súvisí s nerovnomerným rozložením jeho zásob vo svete ako aj so spôsobom jeho dopravy;
- veľká volatilita ceny a nepredvídateľnosť jej vývoja;
- relatívne veľké investičné náklady na novú výrobnú jednotku.

Výhody a nevýhody použitia uhlia na výrobu tepla a energie

Pravdepodobne najväčšou výhodou použitia uhlia ako zdroja energie je jeho široká dostupnosť a relatívne nízka cena. Pozitívne treba vnímať tiež účinnosť premeny energie obsiahnutej v uhlí na teplo a elektrickú energiu, čo súvisí s vyspelosťou technológií používaných v tepelných elektrárňach.

- v krajinách, ktoré majú zásoby uhlia, je tento zdroj energie relatívne ľahko dostupný a lacný;
- technológie používané pri spaľovaní uhlia prešli dlhším vývojom a umožňujú stabilnú a predvídateľnú produkciu väčších množstiev elektrickej energie a tepla;
- kvalitné druhy uhlia majú pomerne vysokú výhrevnosť (pozri údaje v tabuľke 2.2);
- účinnosť konverzie tepelného obsahu uhlia na energiu je v prípade použitia najmodernejších zariadení pomerne vysoká.

Nevýhody použitia uhlia ako primárneho zdroja na výrobu tepla a energie sú zjavné a súvisia s jeho pôvodom a zložením. Pomerne závažným problémom je tiež ťažba uhlia a preprava tejto suroviny z miesta získavania do miesta jej spotreby (ekologické aspekty spaľovania rôznych typov palív sú podrobnejšie analyzované vo 4. kapitole štúdie). Problémom vyplývajúcim zo zloženia uhlia je predovšetkým vyšší obsah znečisťujúcich a nespáliteľných prímiesí. Vzhľadom na komplexnosť technológie tepelnej elektrárne, sú v prípade budovania nového zariadenia nevýhodou vysoké investičné náklady.

- rovnako ako zemný plyn, aj uhlie patrí k neobnoviteľným zdrojom energie, ktorých použitím sa do atmosféry uvoľňujú skleníkové plyny spôsobujúce klimatickú zmenu;
- popri CO₂ sa, napriek čisteniu spalín po spaľovaní uhlia, do ovzdušia dostávajú aj oxid siričitý, SO₂, oxidy dusíka, NO_x, a častice prachu čo prináša negatívne vplyvy na životné prostredie a zdravie ľudí;
- pri ťažbe uhlia z podzemných nálezísk sa do atmosféry uvoľňuje zemný plyn a spôsobuje tak dodatočnú ekologickú záťaž (odhadované množstvo je rádovo desiatky až stovky Mt metánu ročne);
- pri ťažbe uhlia z povrchových zdrojov dochádza ku devastácii krajiny a jej ekosystémov;
- kvôli nižšej účinnosti využitia energetického potenciálu sa uhlie v doprave v súčasnosti nepoužíva;
- relatívne veľké investičné náklady na novú výrobnú jednotku.

Výhody a nevýhody použitia biomasy na výrobu tepla a energie

Najväčšou výhodou použitia biomasy je jej obnoviteľný charakter. Pre potreby tejto štúdie sa pri výbere biomasy obmedzujeme na drevnú hmotu.

- relatívne lacný zdroj energie, biomasa vzniká konverziou CO₂ prítomného vo vzduchu a preto ju považujeme za obnoviteľný zdroj energie;

- pri minimalizácii nákladov na výrobu, spracovanie a dopravu biomasy na miesto výroby tepla a energie má biomasa potenciál uhlíkovej neutrality;
- biomasa je spoľahlivý zdroj energie umožňujúci stabilnú a predvídateľnú výrobu tepla a elektriny;
- využitie odpadnej biomasy z poľnohospodárskej výroby a spracovania dreva na energetické účely znižuje náklady na manipuláciu a spracovanie týchto odpadov ako aj na množstvo emitovaného metánu, ktorý je súčasťou plynov uvoľňujúcich sa zo skládok a kompostární;
- použitie biomasy na výrobu tepla a elektrickej energie znižuje našu závislosť na fosílnych zdrojoch energie;
- aktuálne používané technológie a ich zariadenia umožňujú účinnú premenu energie biomasy na teplo a elektrickú energiu.

Nevýhody použitia biomasy v porovnaní s inými zdrojmi energie súvisia najmä s jej zložením. Jej ďalšou nevýhodou je zaberanie priestorov, ktoré mohli byť využité na pestovanie kultúrnych plodín, alebo mohli mať iné využitie. Pri rozširovaní podielu tepelnej a elektrickej energie vyrobenej z obnoviteľných zdrojov energie zohrávajú dôležitú úlohu tiež investičné náklady spojené so stavbou novej výrobnéj jednotky.

- pomerne nízky energetický obsah súvisiaci s elementárnym zložením sušiny a s vyšším obsahom vlhkosti v surovej biomase;
- okrem emisii oxidu uhličitého sa v spalinách dostávajú do ovzdušia aj tuhé častice;
- neproporčná orientácia a podpora pestovania energetických plodín môže znamenať znižovanie potravinovej sebestačnosti krajiny, jej odlesňovanie a stratu biodiverzity;
- zvýšená spotreba vody, ktorá môže obmedziť jej regionálnu dostupnosť;
- relatívne veľké investičné náklady na novú výrobnú jednotku.

Porovnanie vybraných zdrojov energie

V **tabuľke 3.1** je uvedené porovnanie zemného plynu, uhlia a (drevnej) biomasy ako zdrojov tepelnej a elektrickej energie. Porovnanie sa týka viacerých kvalitatívnych a kvantitatívnych ukazovateľov so zameraním na zloženie, energetický obsah a použiteľnosť týchto palív na vyššie uvedené ciele. Z uvedených údajov môžeme dedukovať, že jedine v prípade použitia biomasy je energetický zdroj obnoviteľný. Navyše, obsah znečisťujúcich látok vznikajúcich jej spaľovaním je nízky a dopad použitia tohto obnoviteľného zdroja energie na životné prostredie je limitovaný až stredne veľký. Emisie CO₂ spojené s použitím drevnej hmoty sú nízke a v prevažnej miere súvisia s jej výrobou a dopravou na miesto použitia. Na druhej strane je výhrevnosť biomasy pomerne nízka a preto sú výsledné náklady na výrobu energie z nej najvyššie z porovnávaných zdrojov.

Ako najčistejší zdroj na výrobu energie sa javí zemný plyn, čo súvisí s jeho zložením, čistotou a vysokým obsahom uhlíka. Spaľovaním zemného plynu vzniká relatívne prijateľné množstvo CO₂ a aj ostatné ukazovatele ekologického dopadu tohto spôsobu výroby energie sú nízke. Navyše, vďaka vysokému energetickému obsahu, sú náklady na výrobu elektrickej energie zo zemného plynu priemerné. Veľkou neznámou však zostáva dostupnosť a cena tejto suroviny. Nie v dôsledku obmedzených zásob zemného plynu, ale kvôli ich nerovnomernému rozloženiu vo svete, ktoré ovplyvňuje náklady a udržateľnosť dodávok ZP. Negatívom použitia zemného plynu je tiež fakt, že tento energetický zdroj nie je obnoviteľný.

S výnimkou dostupnosti suroviny a ceny vyrobenej energie (ekonomické hľadisko) je uhlie najmenej vhodným z porovnávaných energetických zdrojov. Jeho ťažba, preprava a použitie je spojené s veľkými až extrémnymi rizikami pre životné prostredie (morálne hľadisko). Prijatie opatrení na zvýšenie ochrany životného prostredia pri týchto procesoch by jeho cenu výrazným spôsobom zvýšilo a tak ovplyvnilo aj náklady na výrobu jednotkového množstva energie. Ďalšie používanie uhlia ako zdroja energie

s limitovaným negatívnym vplyvom na životné prostredie by vyžadovalo významné inovácie a investície. Dôležité je tiež poznamenať, že hodnoty parametrov prezentovaných v **tabuľke 3.1** závisia od typu uhlia. Na porovnanie uvádzame údaje pre hnedé a pre čierne uhlie.

Tabuľka 3.1 Vybrané parametre zemného plynu, uhlia a biomasy na porovnanie výhodnosti ich použitia na výrobu tepla a elektrickej energie. Informácie sme čerpali zo zdrojov citovaných v 1. a 2. kapitole.

Ukazovateľ	Zemný plyn	Hnedé uhlie	Čierne uhlie	Biomasa (drewná)
Zloženie	prevažne metán	uhlík, síra, voda, popol	uhlík, síra, voda, popol	celulóza, lignín, voda
Obnoviteľnosť	nie	nie	nie	áno
Skupenstvo	plynné	tuhé	tuhé	tuhé
Obsah uhlíka (hmot.%)	75	60–70	75–85	40–50
Obsah síry (hmot.%)	zanedbateľný < 0,01	vysoký 0,6–1,5	vysoký 0,5–3	nízky < 0,1
Výhrevnosť (kWh kg ⁻¹)	vysoká 10,5–13,6	nízka–stredná 3,9–5,0	vysoká 6,7–8,3	nízka–stredná 3,9–5,6
Dostupnosť	variabilná	vysoká	vysoká	závisí od regiónu
Cena	stredná	nízka	nízka	nízka
Ekologický dopad	nízky–stredný ^a	vysoký	vysoký	nízky–stredný
Znečistenie ovzdušia	nízke	vysoké	vysoké	stredné
Emisie CO ₂ (kg MWh ⁻¹)	nízke 180–200	vysoké ~ 360	vysoké 320–340	neutrálne–nízke 0–70
Emisie tuhých častíc	zanedbateľné	veľmi vysoké	veľmi vysoké	vysoké

^aPotenciálne zníženie ekologických dopadov použitia ZP je jeho čiastočná náhrada bioplynom.

Prípadová štúdia: vykurovanie domu s obytňou plochou 150 m² plynom, uhlím a biomasou

Údaje uvedené v tejto prípadovej štúdii sme získali rešeršou na internete z verejne dostupných portálov arecenzie.sk, boilerguide.co.uk, daibau.sk, ekonomika.pravda.sk, energia.sk, energie-portal.sk, hlina.sk, letsheat.co.uk, palivovepelety.sk, reddit.com, siea.sk, techclick.sk, theheatinghub.co.uk, urobsisam.zoznam.sk, whatprice.co.uk. Údaje prezentované v týchto zdrojoch sa obvykle v čase menia, v horšom prípade môžu byť zmazané. Preto je ich spoľahlivosť, overiteľnosť a dôveryhodnosť nižšia v porovnaní s informáciami získanými v recenzovaných časopisoch alebo knihách.

Medzi najdôležitejšie parametre, ktoré zohľadňujeme pri výbere kotla pre domácnosť, patria jeho cena, životnosť, spotreba a cena zdroja tepla, ako aj náklady na údržbu a bežné opravy. Popri tom môže vlastníka nehnuteľnosti zaujímať aj komfort spojený s používaním daného typu kotla, ekologické kritériá ako napríklad emisie a množstvo vznikajúcich odpadov, či návratnosť investície do takéhoto zariadenia. Porovnanie vybraných typov zariadení je uvedené v **tabuľke 3.2**.

Na trhu sú k dispozícii moderné plynové kotle s vysokou účinnosťou využitia energetického obsahu paliva v cenových reláciách 1600–3000 €. Záruka na kotol je minimálne 2 roky, no výrobcovia bežne ponúkajú záruku na 3 roky s možnosťou jej predĺženia až na 7–12 rokov. Údržba takýchto zariadení vyžaduje revízie komína a výmenu filtrov zvyčajne raz ročne v cene cca 50–200 €. Ceny dôležitých súčastí zariadenia, napr. výmenník tepla alebo čerpadlo, sú na úrovni 50–200 €. Tieto súčastky však vlastník necháva meniť raz počas životnosti zariadenia, ktorá je typicky 15–20 rokov. Manipulácia s palivom je v prípade plynových kotlov prakticky limitovaná na zapnutie a vypnutie prívodu plynu. Dodávka plynu

v čase použitia kotla je riadená automaticky. Ročné náklady na palivo v roku 2024 boli vyčíslené na cca 1800 €, ako priemerná hodnota za plyn použitý na vykurovanie domu s obytnou plochou 150 m² bez prípravy teplej úžitkovej vody.

Cena kotlov na tuhé palivo závisí od spôsobu spaľovania a dopĺňania paliva do zariadenia. Najnižšia cena začína od cca 900 €, v prípade kombinovaných kotlov dosahuje 1200–2400 €. Záruka kotlov na tuhé palivo je podobná, ako v prípade plynových kotlov, a ich životnosť dosahuje 20–25 rokov. Tieto zariadenia vyžadujú pravidelné a pomerne časté čistenie a tiež kontrolu komína. Ročné náklady na údržbu dosahujú nižšie stovky €. Z hľadiska manipulácie s palivom je potrebné mať dostatočne veľké priestory na skladovanie uhlia. Manipulácia s uhlím s frekvenciou jeden až dvakrát denne je fyzicky pomerne náročná a vyžaduje ochranu pri práci v prašnom prostredí. Návratnosť investícií do tohto typu zariadení je nižšia než 2 roky. Negatívom použitia uhlia ako zdroja tepla pri vykurovaní domácnosti je vyššia produkcia popolčeka, CO₂ a spalín s obsahom síry. Vzhľadom na platnú legislatívu (NR SR, 2024) sa v tomto type kotlov smie spaľovať iba kvalitné tuhé palivo, napríklad čierne uhlie. Ročné náklady na uhlie spotrebované na vykurovanie domu s obytnou plochou 150 m² sú 1500–1600 €.

V prípade použitia biomasy, dreva alebo drevnej štiepky, na ohrev nehnuteľnosti, sú ceny kotlov podobné ako pri použití kotlov na uhlie. V základnej výbave cena kotlov na biomasu začína na úrovni 1200 €. Kvôli zvýšeniu komfortu sú na trhu k dispozícii aj kotle s automatickým dávkovaním peliet s cenou v rozsahu 2900–6000 €. Náklady na servis týchto kotlov sú podobné ako pri kotloch na uhlie, ale cena súčiastok a elektroniky je v prípade automatického podávania paliva, na úrovni 200–500 €. Životnosť kotlov na biomasu je 15–20 rokov. Aj v tomto prípade sú potrebné dodatočné priestory na skladovanie paliva. Ak vlastnime kotol s automatickým dávkovaním peliet, manipulácia je limitovaná na dopĺňanie paliva do zásobníka dva- až trikrát týždenne. Dávkovanie paliva do kotla je zabezpečené automaticky. Podobne ako pri uhlí, aj pri spaľovaní biomasy vzniká pomerne veľa tuhého odpadu, no emisie CO₂ sú o niečo nižšie. Náklady na palivo sú na úrovni 1000 € ročne v prípade spaľovania dreva v modernom splynovacom kotle. Náklady na použitie peliet sú takmer dvojnásobkom nákladov na drevo.

Tabuľka 3.2 Vybrané parametre kotlov na zemný plyn, uhlie a biomasu používaných na výrobu tepla v rodinnom dome s obytnou plochou 150 m² v klimatických podmienkach Strednej Európy (SIEA, 2024).

Parameter	Zemný plyn	Uhlie/brikety	Biomasa (drevná)
Obstarávacia cena (€)	1600–3000	900–2400	1200–6000
Frekvencia revízií	1× ročne	1× 2–10 rokov	1× 2–10 rokov
Náklady na bežné opravy (€)	50–200 ročne	stovky ročne	200–500 za jednu opravu
Náročnosť údržby	nízka	vysoká	stredná
Životnosť kotla (rok)	15–20	20–25	15–20
Záruka (rok)	obvykle 3	3	3
Účinnosť kotla (%)	~ 95	~ 75	~ 85
Návratnosť investície (rok)	~ 2	< 2	~ 9
Ročné náklady na palivo(€)	1800	1500–1600	1000–1750
Komfort použitia	plná automatizácia	ručné prikladanie	dopĺňanie do zásobníka
Ekologický dopad	nízky–stredný	vysoký	stredný
Emisie CO ₂	nízke	vyššie	nízke
Emisie tuhých častíc	zanedbateľné	priemerné	nízke

Predchádzajúcu, najmä kvalitatívnu, štúdiu SIEA (2024) sme použili ako základ pre analýzu investičných a prevádzkových nákladov na vykurovanie rodinného domu s rozlohou 150 m² v klimatických podmienkach Strednej Európy. Predpokladáme, že v domácnosti žijú štyri osoby a dom je dobre izolovaný proti únikom tepla do okolia. Výsledky porovnávame pre prípady, ak sa na vykurovanie RD použije zemný plyn, čierne uhlie, drevné peletky alebo kusové drevo (polená).

Podľa portálu vykurovanie24.sk (vykurovanie24.sk, 2024) je spotreba tepla v RD vybudovanom z tradičných materiálov v rozmedzí 100–250 kWh na m² obývanej plochy za rok. Pre zvolený RD s dobrou izoláciou proti únikom tepla sme množstvo tepelnej energie na vykurovanie domácnosti odhadli na spodnej hranici vyššie uvedeného intervalu, z čoho vyplynula celková ročná spotreba tepla na úrovni 16750 kWh.

Spotreba jednotlivých druhov paliva v RD sa pri uvedenej spotrebe odvíja od ich výhrevnosti. V štúdiu sme prevzali údaj o výhrevnosti zemného plynu 9,4 kWh m⁻³ (13,5 kWh kg⁻¹), ktorý je uvedený v **tabuľke 4.1**. Aj v prípade tuhých palív boli hodnoty výhrevnosti prevzaté z intervalu typických hodnôt, ktoré sú uvedené v **tabuľke 4.1**: čierne uhlie (7,5 kWh kg⁻¹), peletky (4,8 kWh kg⁻¹) a kusové drevo (4,5 kWh kg⁻¹).

Ďalším parametrom, ktorý vstupuje do ekonomickej bilancie vykurovania je jednotková cena palív. Vo výpočtoch pre ZP sme použili hodnoty z faktúry za jeho dodávku od slovenského dodávateľa. Regulovaná cena zemného plynu na Slovensku v tarifnej triede D2 je 0,029 € za kWh a paušálny poplatok 1,50 € mesačne (bez DPH). Do cenovej kalkulácie zemného plynu vstupuje tiež poplatok za služby v hodnote 0,00286 € za kWh (bez DPH), a poplatok za dopravu a distribúciu 0,0109 € za kWh vrátane paušálnej sumy 5,47 € mesačne (bez DPH). V prípade ostatných druhov paliva sme vychádzali z ponuky na internete od slovenských obchodníkov pre maloobderateľov (cena s DPH): čierne uhlie (300–460 € za tonu), peletky (280–360 € za tonu) a kusové drevo (50–70 € za m³). Pri výpočtoch nákladov na vykurovanie predmetnej domácnosti sme uvažovali s jednotkovou cenou za tonu paliva z vyššie uvedeného intervalu: čierne uhlie (350 €), peletky (320 €) a kusové drevo (150 €), všetky ceny sú uvedené s DPH. Náklady na dopravu sme považovali za rovnaké pre všetky druhy tuhého paliva na úrovni 1 € za prepravu 1 t paliva do vzdialenosti 1 km (pozri 5. kapitolu správy). Pre všetky druhy tuhého paliva sme predpokladali jednotnú vzdialenosť dodávateľa od miesta spotreby, 25 km. Na ročné prevádzkové náklady vykurovania zvolenej domácnosti vplýva tiež účinnosť spaľovacieho zariadenia, kotla. Vo výpočte sme použili zodpovedajúce údaje z **tabuľky 3.2**. V prípade drevných peletiek sme použili účinnosť kotla na hornej hranici intervalu, 91 % (Wang et al., 2017; Dziubarczyk, 2025).

Do prevádzkových nákladov na výrobu tepla pre domácnosť sme započítali tiež náklady na revízie, údržbu a bežné opravy kotlov. V prípade kondenzačného kotla na plyn sme tieto náklady odhadli na 150 €, pri uhlí a dreve na 200 € a pri kotloch na peletky na 300 € ročne, čo zodpovedá cenovému rozpätiu uvedenému v **tabuľke 3.2**. Do tejto sumy sme započítali aj alikvotnú časť nadobúdacej ceny nového čerpadla či výmenníka tepla. Pri predpokladanej životnosti kotla 20 rokov a vyššie spomenutej cene 50–200 €, ročné náklady na výmenu týchto súčastí vykurovacieho systému predstavujú cca 2,5–10 €. Orientačné ceny za revízie kotla sme prevzali zo stránky vykurene.sk (2025).

Pri spaľovaní tuhých palív vzniká tuhý odpad, popol, ktorého množstvo je úmerné obsahu nespáliteľných zložiek v palive, ako je uvedené v **tabuľkách 1.6** a **2.3**. Náklady na likvidáciu popola sme vypočítali na základe informácií zo zdrojov Lieskovský et al. (2017) a EEA (2025), pričom sme počítali so sumou 20 € za odvoz a likvidáciu tony popola. Táto hodnota je orientačná nakoľko chýbajú relevantné informácie. Pri komunálnom odpade sa jedná o desiatky až stovky € za odvoz a likvidáciu 1 t odpadu.

Ďalším parametrom, ktorý môže ovplyvniť náklady na prevádzku kotla, bude v blízkej budúcnosti množstvo vyprodukovaného CO₂. Vo výpočtoch nákladov na emisie CO₂ sme použili emisné faktory

uvedené v **tabuľke 4.4** (pozri tiež Our World in Data (2025)). Aktuálna cena európskych emisných povoleniek (EU ETS) je na úrovni 78 € za tonu CO₂ (Trading Economics, 2025). Nakoľko v súčasnosti malooodberatelia neplatia poplatky za emisie CO₂, v **tabuľke 3.3** vždy najskôr uvádzame celkové náklady (OPEX, TCO) bez započítania tejto položky a následne aj s jej započítaním. Všetky ceny v **tabuľke 3.3** sú uvedené vrátane DPH.

Tabuľka 3.3 Náklady na vykurovanie RD s obytnou plochou 150 m² v klimatických podmienkach Slovenska s primeranou tepelnou izoláciou. Porovnanie pre rôzne typy paliva: zemný plyn, čierne uhlie, drevnú štiepku alebo drevo. Všetky ceny sú uvedené vrátane DPH.

Druh paliva	Zemný plyn	Čierne uhlie	Biomasa	
			peletky	drevo
Výhrevnosť (kWh kg ⁻¹)	13,5 ^a	7,5	4,8	4,5
Účinnosť kotla (%)	95	75	91	75
Spotreba paliva za rok (kg)	1306 ^b	2978	3835	4963
Ročné náklady na palivo (€)	724	1042	1227	744
Ročné náklady za prepravu a distribúciu paliva (€)	317	74	115	149
Ročné náklady za opravy a údržbu kotla (€)	150	200	300	200
Vytvorený (nebiogénny) CO ₂ za rok (kg)	3641	9268	221	268
Náklady za emisie CO ₂ , EU ETS (€)	282	723	17	21
Množstvo popola za rok (kg)	0	298	38	50
Náklady na likvidáciu popola (€)	0	6	1	1
Celkové ročné prevádzkové náklady, OPEX^c (€)	1191	1323	1643	1094
Celkové ročné prevádzkové náklady, OPEX^d (€)	1473	2046	1660	1115
Náklady na kotol a jeho inštaláciu (€)	4000	3000	8000	3000
Náklady na radiaci systém kotla (€)	800	800	1000	800
Náklady na rozvody tepla (€)	1500	3000	3000	3000
Náklady na priestory a uskladnenie paliva (€)	0	800	2000	1000
Celkové investičné náklady, CAPEX (€)	6300	7600	14000	7600
Celkové náklady vlastníctva, TCO^c (€)	24172	27439	38644	24215
Celkové náklady vlastníctva, TCO^d (€)	28401	38283	38902	24528

^a9,42 kWh m⁻³; ^b1872 m³; ^ckalkulácia za 15 rokov prevádzky bez započítania nákladov na emisie CO₂ (EU ETS); ^dkalkulácia za 15 rokov prevádzky so započítaním nákladov na emisie CO₂ (EU ETS).

Medzi investičné náklady sme zaradili cenu za inštaláciu kotlov a rozvodov tepla v dome. Tieto informácie sme prevzali zo stránky vykurene.sk (2025), daibau.sk (2025) a SITA (2019). Konkrétne ceny vychádzajú z údajov o cene kotla (**tabuľka 3.2**), ktorá je navýšená o náklady na inštaláciu a spustenie kotla. Pri rodinných domoch s obytnou plochou okolo 150 m² sú investičné náklady na vnútornú distribúciu tepla pri vykurovaní plynom približne o 50 % nižšie ako pri systémoch na tuhé palivo (SIEA, 2021; Štefánika et al., 2020). Rozdiely v investičných nákladoch na distribúciu tepla a vykurovacie telesá (radiátory) pri rôznych palivách nesúvisia len s cenou materiálu, z ktorého sú rozvody vyrobené. Výška nákladov na rozvody je primárne ovplyvnená teplotným režimom pri vykurovaní, charakterom spaľovania paliva, automatizáciou procesu a požiadavkami na riadenie vykurovacej sústavy. V prípade kúrenia plynom rozvody nevyžadujú špeciálne hydraulické ani regulačné riešenia, veľké radiátory ani zásobník. Navyše,

regulácia výkonu plynového kotla má okamžitú odozvu. Naproti tomu, pri kúrení tuhým palivom je odozva pri regulácii pomalšia, kvôli čomu je potrebná komplikovanejšia potrubná sieť s armatúrami, jej regulácia a najmä zásobník. Náklady na riadenie a reguláciu činnosti kotla a rozvodov tepla v domácnosti je možné odhadnúť na základe informácií z internetových portálov MiRad (2025) a pohodadomova (2025). Cena za stavbu nových priestorov (prístrešku) na skladovanie tuhého paliva na internete nie je uvedená. Odhadli sme ju na základe ceny prístreška pre automobil zo stránky GARDEON (2025). V kalkulácii uvedenej v **tabuľke 3.3** nie sú zahrnuté investičné náklady na postavenie prípojky na plyn ani komína. V prípade použitia zemného plynu ako zdroja energie sme predpokladali, že sa jedná o domácnosť so zavedeným plynom. Tento predpoklad podporujú informácie o rozsahu plynifikácie Slovenska (SITA, 2020) uvedené v 2. kapitole tejto správy. Náklady na zmenu dispozície budovy pri zmene vykurovacieho kotla môžu byť veľmi variabilné a ich odhad by preto bol iba orientačný.

Výsledky výpočtov pre modelový rodinný dom s obytnou plochou 150 m², primerane kvalitnou izoláciou v podmienkach Strednej Európy za 15 rokov prevádzky vykurovacieho zariadenia a porovnanie výsledkov pre vybrané typy palív sú zhrnuté v **tabuľke 3.3**. Pri hodnotení dosiahnutých výsledkov je nutné zdôrazniť, že pri výpočtoch nákladov v prípade použitia zemného plynu ako zdroja tepla sme použili jeho regulovanú cenu so sadzbou platnou pre rok 2025. Ceny energetických médií sú premenlivé a ovplyvňuje ich množstvo faktorov. Výsledky uvedené v **tabuľke 3.3** platia výlučne za vyššie uvedených predpokladov a môžu sa meniť v závislosti od zmeny cien palív alebo technológií. Treba si tiež uvedomiť, že náklady na vykurovanie predstavujú len jeden z viacerých faktorov, ktoré je potrebné zohľadniť pri výbere vhodného paliva na vykurovanie domu. Ďalšími významnými faktormi sú komfort používania daného typu paliva a environmentálne dopady jeho použitia, vrátane znečistenia životného prostredia a vplyvu na globálne otepľovanie (**tabuľka 3.2**). Tieto faktory sú podrobne analyzované v iných častiach tejto štúdie.

4 Ekologické aspekty spaľovania zemného plynu v porovnaní s uhlím a biomasou (emisie, potenciál globálneho otepľovania, odpady)

Úvod

Pri rozhodovaní o použití určitého druhu paliva na výrobu energie je v súčasnosti jedným z kľúčových faktorov jeho dopad na životné prostredie. Táto kapitola je venovaná ekologickým aspektom procesu spaľovania zemného plynu, uhlia a drevnej biomasy. Navzájom sa porovnávajú emisie, vznik odpadov a vedľajších produktov a potenciál globálneho otepľovania súvisiace so spaľovaním vybraných druhov palív. Táto kapitola sa zameriava na environmentálne aspekty samotného procesu spaľovania. Vplyvu ťažby, úpravy a logistiky jednotlivých druhov palív na životné prostredie sa venuje 5. kapitola. Účinnosť spaľovania ZP, uhlia a biomasy, ako aj analýza výhod a nevýhod ich použitia boli predmetom predchádzajúcich kapitol.

Emisie zo spaľovania vybraných zdrojov energie

Spaľovanie zemného plynu predstavuje ekologicky priaznivejšiu alternatívu v porovnaní so spaľovaním uhlia a v niektorých aspektoch aj v porovnaní so spaľovaním biomasy. ZP má najnižší obsah uhlíka spomedzi fosílnych palív, čo sa prejavuje nižšími emisiami oxidu uhličitého (CO_2) na jednotku vyprodukovanej energie. Pri jeho spaľovaní vzniká minimálne množstvo tuhých znečisťujúcich látok, oxidu siričitého (SO_2) a prachových častíc. Naopak, spaľovanie uhlia vedie k vysokým emisiám CO_2 , SO_2 a ťažkých kovov, ako aj k tvorbe tuhých zvyškov, čo má negatívny dopad na kvalitu ovzdušia a zdravie obyvateľstva. Biomasa, považovaná za obnoviteľný zdroj energie, pri nedokonalom spaľovaní produkuje značné množstvo jemných prachových častíc. Navyše, jej uhlíková neutralita závisí od spôsobu jej pestovania, úpravy a dopravy. V **tabuľke 4.1** sú uvedené hodnoty dôležitých parametrov súvisiacich so spaľovaním zemného plynu, uhlia a drevnej biomasy, ktoré ovplyvňujú dopady tohto procesu na životné prostredie.

Pri odsírení spalín na prijateľné hodnoty vzniká tuhý odpad. Výpočet jeho množstva sme realizovali pre čiastočne suchý proces odstraňovania síry (spray dryer adsorption) pomocou suspenzie hydroxidu vápenatého, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (de Andrade Cruz et al., 2019). Pri výpočtoch sme uvažovali s odstránením 90 % z emitovaného množstva SO_2 (pozri **tabuľku 4.1**). Tuhým odpadom z procesu odstraňovania SO_2 zo spalín je dihydrát síranu vápenatého, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Ťažké kovy

Obsah ťažkých kovov v tuhom zvyšku pri spaľovaní uhlia a drevnej hmoty je v porovnaní so spaľovaním ZP výrazne vyšší. Navyše, množstvo tuhého odpadu vznikajúce pri spaľovaní zemného plynu je minimálne a preto sú emisie ťažkých kovov v tomto prípade zanedbateľne malé. Ak porovnávame tuhé zdroje energie, uhlie a biomasu medzi sebou, tak v popole vznikajúcom pri spaľovaní uhlia je obsah ťažkých kovov výrazne vyšší. Porovnanie obsahu vybraných ťažkých kovov v popole získanom spaľovaním rôznych druhov paliva je uvedené v **tabuľke 4.2**.

Ekvivalent CO_2

Ekvivalent CO_2 (CO_2e) slúži na vyjadrenie celkového potenciálu globálneho otepľovania spôsobeného rôznymi skleníkovými plynmi, prepočítaného na zodpovedajúce množstvo CO_2 . Rozlišujeme priamy ekvivalent CO_2 skleníkových plynov a nepriamy ekvivalent CO_2 látok, ktoré nie sú priamymi skleníkovými plynmi, ale môžu podporiť vznik týchto plynov. Celkový ekvivalent CO_2 sa vypočíta ako súčet všetkých

emisií rôznych plynov (napr. CO₂, CH₄, N₂O), vynásobených ich faktorom globálneho otepľovania (GWP). **Tabuľka 4.3** sumarizuje hodnoty GWP pre plyny tvoriace spaliny zo spaľovania vybraných zdrojov energie.

Tabuľka 4.1 Porovnanie parametrov ovplyvňujúcich ekologické aspekty spaľovania sledovaných palív.

Parameter	Zemný plyn	Hnedé uhlie	Čierne uhlie	Antracit	Biomasa (drevo)
Výhrevnosť (kWh kg ⁻¹)	10,5–13,6 13,5 ^b	3,9–5,0 4,5 ^c	6,7–8,3 5,9 ^c	8,3–9,7 ^a 8,4 ^c	3,9–5,6 ^a 5,3 ^d
Emisie CO ₂ ^e (g kWh ⁻¹)	181–202 ^a	364–407 ^f	345–362 ^g	354–401 ^h	384–403 ⁱ
Emisie tuhých častíc ^e (mg kWh ⁻¹)	0,3–10,1 ^j	2588–21042 ^j	686–5054 ^j	421–875 ^k	180–7200 ^l
Emisie SO ₂ ^e (mg kWh ⁻¹)	0,98–1,05 ^j	1217–3046 ^m	1663–8586 ⁿ	157–1631 ^k	39–95 ^j
Emisie NO _x ^e (mg kWh ⁻¹)	28–900 ^j	367–1523 ^j	551–2527 ^j	162–976 ^j	341–758 ^j
Emisie CO ^e (mg kWh ⁻¹)	25–100 ^j	15–25 ^j	36–21171 ^j	33 ^j	929–21791 ^o
Popol ^e (g kWh ⁻¹)	minimum ^p	9–43 ^p	4–27 ^p	5–23 ^p	2–31 ^q
Odpad z odsírenia spalín ^e (g kWh ⁻¹)	0,03–0,13	4327–10818	5713–24073	3467–4453	1008–8150
Ťažké kovy v tuhom zvyšku	minimum	Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Hg, Pb ^r	Mn, Ni, Pb, Rb, Se, Sr, V, Zn, Zr, As, Cr, Cu, Fe, Pb ^s	As, Ba, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb ^s	Zn, Pb, Cd, Hg, Mn, Cr, Ni, Co, Cu, Sn, Sb, Se, V, Mo, As ^t

^aBreeze (2019) resp IEA (2025b); ^bÚRSO (2025); ^cThe Engineering Toolbox (2024); ^dEsteves et al. (2023); ^ekvôli jednoduchšiemu porovnaniu, sú údaje v tabuľke prepočítané na jednotku výhrevnosti; ^fJuhrich (2016) a IPCC (2006); ^gDamayanti & Khaerunissa (2018); ^hIPCC (2006) a Lee et al. (2012); ⁱIPCC (2006), emisie CO₂ z procesu spaľovania biomasy sa nerátajú do výpočtu uhlíkovej stopy, nakoľko biomasa je obnoviteľný zdroj energie; ^jEPA (2025); ^kEPA (2025) a The Engineering Toolbox (2024); ^lAIRUSE (2016); ^mEPA (2025), The Engineering Toolbox (2024) a Kagiliery et al. (2019); ⁿEPA (2025), The Engineering Toolbox (2024) a Nath et al. (2022); ^oEPA (2025) a AIRUSE (2016); ^pEPA (1999); ^qSmołka-Danielowska & Jabłońska (2022); ^rAltikulaç et al. (2022); ^sCzech et al. (2020); ^tDemirbaş (2005).

Tabuľka 4.2 Množstvo ťažkých kovov v tuhom zvyšku po spaľovaní vybraných palív (Altikulaç et al., 2022; Czech et al., 2020; Demirbaş, 2005).

Ťažký kov	Zemný plyn	Hnedé uhlie	Čierne uhlie	Antracit	Biomasa (drevo)
	Obsah prepočítaný na množstvo uvoľneného tepla (mg kWh ⁻¹)				
As		21–27	3,5–9,8	2,5–5,3	0,36–0,79
Cd			0,04–0,19		0,16–0,20
Cr	zanedbateľný	35–42	3,8–14,6	5,4–8,7	0,47–0,83
Cu		10–12	5–19	3,6–9,8	5,54–8,10
Pb		9–28	0,7–12,7	1,7–5,6	5,36–6,62
Hg			0,50–0,83		< 0,04

Tabuľka 4.3 Faktory ekvivalentu CO₂ niektorých plynov v časovom horizonte 20 rokov (Lammel & Graßl, 1995; Fuglestvedt et al., 1996).

Zlúčenina	Ekvivalent CO ₂	Zlúčenina	Ekvivalent CO ₂
CO ₂	1	SO ₂	0
CO	10	CH ₄	83
NO _x	126	N ₂ O	273

V **tabuľke 4.3** sú započítané aj nepriame ekvivalenty CO₂ pre látky obsiahnuté v spalinách. Niektoré z uvedených plynov nie sú skleníkovými plynmi, napriek tomu prispievajú ku globálnemu otepľovaniu nepriamo. NO_x podporujú tvorbu ozónu a N₂O v atmosfére, pričom všetky tieto plyny sú skleníkové. CO taktiež nepriamo zvyšuje koncentráciu CH₄ v atmosfére tým, že prednostne reaguje s hydroxylovými aniónmi, ktoré by inak znižovali koncentráciu metánu. CO podporuje aj vznik prízemného ozónu, čo prispieva ku globálnemu otepľovaniu.

V **tabuľke 4.4** sú uvedené hodnoty ekvivalentu CO₂ pre celú zmes spalín vznikajúcu pri spaľovaní paliva, vypočítané pomocou CO₂ ekvivalentov pre jednotlivé zložky uvedené v **tabuľke 1.3** podľa rovnice (1), kde $ekv_{CO_2,i}$ je ekvivalent CO₂ uvedený v **tabuľke 4.3** a c_i je koncentrácia zložky v spalinách vzťahnutá na výhrevnosť paliva. Vidíme, že kontaminanty ako CO a najmä NO_x, výrazne zvyšujú vypočítaný ekvivalent CO₂ spalín, hoci ich koncentrácia v spalinách je veľmi malá v porovnaní s ostatnými zložkami.

$$ekv_{CO_2} = \sum ekv_{CO_2,i} c_i \quad (1)$$

Tabuľka 4.4 Ekvivalent CO₂ pre spaliny, ktorého hodnoty sme vzťahli na jednotkové množstvo tepla uvoľneného pri spaľovaní vybraných palív.

Palivo	Ekvivalent CO ₂ spalín (g kWh ⁻¹)	
	minimum	maximum
Zemný plyn	205	316
Hnedé uhlie	410	599
Čierne uhlie	415	891
Antracit	375	524
Biomasa ^a	12	27

^aVypočítané na základe stredných hodnôt obsahu CH₄ a NO_x v spalinách.

Tuhé častice

Tuhé častice (PM) majú negatívny vplyv na kvalitu ovzdušia a zdravie ľudí. Pri spaľovaní zemného plynu vzniká podstatne menej tuhých častíc v porovnaní so spaľovaním uhlia či biomasy, pretože zemný plyn má nízky obsah síry a neobsahuje tuhé zložky. Emisie tuhých častíc pri spaľovaní zemného plynu sú rádovo nižšie a pozostávajú najmä z ultrajemných častíc (< 100 nm), ktoré vznikajú nedokonalým spaľovaním alebo sekundárnymi procesmi (Bond et al., 2013). Naopak, spaľovanie uhlia produkuje veľké množstvo tuhých častíc, vrátane popolčeka a sadzí, ktoré obsahujú ťažké kovy a sulfáty. Biomasa, hoci je vnímaná ako obnoviteľný zdroj energie, generuje významné množstvo primárnych organických aerosólov a častíc uhlíka, pričom ich množstvo a zloženie závisí od vlhkosti, typu paliva a účinnosti spaľovacieho zariadenia (Johansson et al., 2004; Lamberg et al., 2011). Porovnania ukazujú, že z hľadiska emisií tuhých častíc je zemný plyn najčistejším palivom, zatiaľ čo uhlie a biomasa predstavujú hlavné zdroje tuhých častíc s významným negatívnym dopadom na zdravie obyvateľstva a na klímu.

5

Potenciál vplyvu ťažby a logistiky na ekológiu a ekonomiku procesu výroby tepla a energie zo zemného plynu, uhlia a biomasy

Úvod

Táto kapitola je venovaná analýze možných vplyvov procesu ťažby a logistiky na celkovú ekonomiku a ekologické dopady použitia vybraných druhov palív na energetické účely. Do komplexnej analýzy životného cyklu jednotlivých druhov palív od ťažby, úpravy, logistiky až po samotné ich spaľovanie je potrebné zahrnúť mnoho iných faktorov, ktoré prekračujú rozsah tejto štúdie. Cieľom tejto kapitoly je porovnanie kľúčových operácií výroby a použitia jednotlivých druhov palív z hľadiska ekonomiky a vplyvov na životné prostredie. Na toto porovnanie na všeobecnej úrovni sme použili informácie z dostupnej literatúry. Informácie o zložení palív a ich vlastnostiach sme čerpali z predchádzajúcich kapitol.

Výrobná cena zemného plynu, uhlia a biomasy

Cena vyťaženého zemného plynu (produkcie) závisí od viacerých faktorov, ako napríklad typ plynu, lokalita miesta ťažby, spôsobu ťažby atď. V roku 2024 bola priemerná cena zemného plynu v USA 2,19 \$ za MMBtu, čo predstavuje 6,9 € za MWh (AGA, 2024). Zemný plyn je aj vedľajším produktom pri ťažbe ropy a nie vždy je ekonomicky výhodné prepravovať ho na veľké vzdialenosti (napríklad z ropnej plošiny na mori na pevninu). Preto sa niekedy tento plyn spaľuje na horákoch alebo sa len odťukuje do atmosféry. Odťukovanie ZP má však veľké ekologické dôsledky, ktorým sa budeme venovať v ďalšej časti tejto kapitoly. Podľa portálu Energy Voice (Energy Voice, 2025) náklady na ťažbu zemného plynu v Európe predstavujú 5,2–7,8 \$ za MMBtu (15,3–22,9 € za MWh) pre plyn vyťažený v Spojenom kráľovstve. Ťažba plynu v Nórsku je lacnejšia, náklady na jeho ťažbu sú 3,0–5,5 \$ za MMBtu (8,8–16,1 € za MWh).

Náklady na ťažbu uhlia sa pohybovali v roku 2024 v USA od 94 \$ do 169 \$ za krátku tonu (Argus, 2025). V tomto prípade sa jedná o uhlie používané v metalurgii, obvykle čierne uhlie s výhrevnosťou v intervale 6,7–8,3 kWh kg⁻¹ (Grammelis et al., 2016). Po prepočte na jednotku výhrevnosti sú výsledné náklady v rozsahu 14,0–17,5 € MWh⁻¹. Cena uhlia používaného v metalurgii bola vyššia v porovnaní s hnedým uhlím, ktoré má nižšiu kvalitu a používa sa napríklad za účelom výroby energie. Priemerné náklady na ťažbu hnedého uhlia boli v roku 2022 v USA 21,79 \$ za krátku tonu (EIA, 2024). Po zohľadnení inflácie v USA, kvôli porovnateľnosti výsledkov, by odhadované náklady na ťažbu hnedého uhlia v roku 2024 boli na úrovni 4,6–8,2 € MWh⁻¹. V Európe ťažba uhlia dlhodobo klesá. Hlavným producentom čierneho uhlia zostáva Poľsko s podielom ťažby až 97 % (Eurostat, 2025). Podľa portálu Energy Instrat.pl (Energy Instrat, 2025), náklady na ťažbu uhlia v Poľsku sa v ostatnom období pohybovalo v rozmedzí 330–740 PLN za tonu (75–170 € za tonu), čo predstavuje 10,0–22,6 € MWh⁻¹. Pre určenie nákladov na ťažbu hnedého uhlia v EU neboli nájdené dôveryhodné dáta. Nepredpokladáme však výrazne rozdiely oproti údajom z USA.

V prípade výpočtu ceny biomasy je situácia komplikovanejšia. Drevná štiepka sa najčastejšie používa na energetické účely. Preto cena produkcie biomasy bude v tomto prípade zodpovedať nákladom na ťažbu dreva. Tieto náklady závisia od mnohých faktorov, ako napríklad: druh dreva, prístupnosť v teréne, technika použitá v procese ťažby a druh ťažby, či sa jedná o vyťaženie všetkých stromov na danej ploche alebo len o preriedenie lesa. Náklady na ťažbu dreva sa pohybovali v USA v roku 2022 okolo 28–88 \$ za krátku tonu suchého dreva (English, 2024). Po prepočte a zahrnutí inflácie pre rok 2024 je konečná suma v rozmedzí 6,1–19,2 € MWh⁻¹ pre suché drevo. Náklady na ťažbu drevnej biomasy v Európe, konkrétne vo Švédsku predstavujú 139–278 SEK za m³, čomu zodpovedá hodnota 3,4–13,7 € MWh⁻¹. Tieto náklady

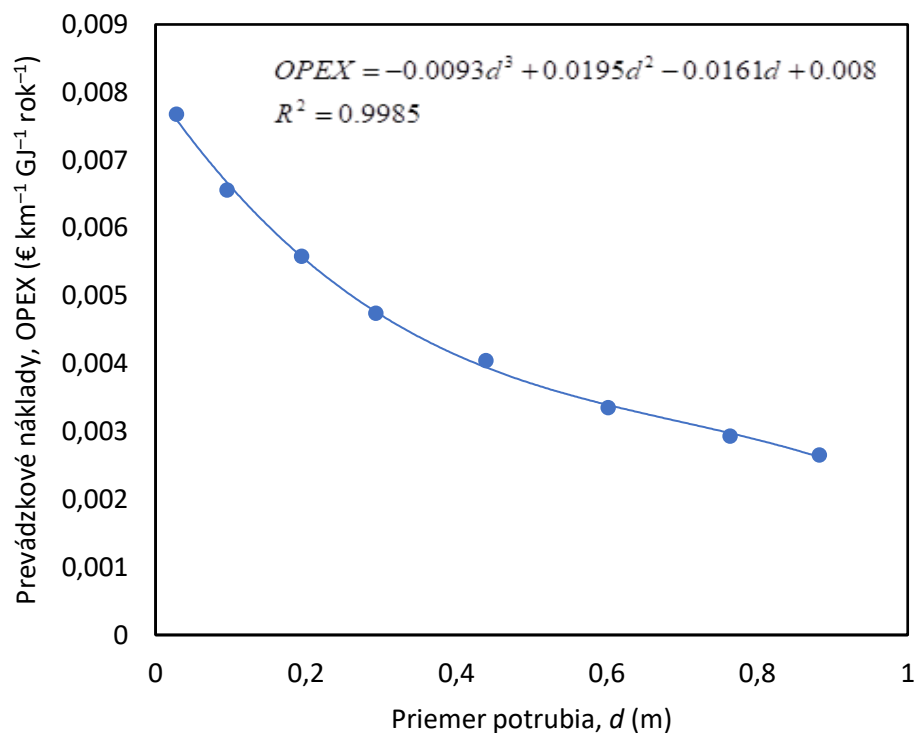
zahŕňajú samotnú ťažbu dreva a jeho prepravu na kraj lesa (Skogsstyrelsen, 2025). Informácie o nákladoch na ťažbu energetických surovín sú zhrnuté v **tabuľke 5.1**.

Tabuľka 5.1 Porovnanie nákladov na ťažbu energetických surovín v roku 2024.

Oblasť	USA	EU
Druh paliva	Náklady na ťažbu (€ MWh ⁻¹)	
Zemný plyn	6,9	8,8–22,9
Hnedé uhlie	4,6–8,2	–
Čierne uhlie	14,0–17,5	10,0–22,6
Biomasa (suché drevo)	6,1–19,2	3,4–13,7

Náklady na spracovanie a transport zemného plynu, uhlia a biomasy

Preprava zemného plynu na dlhé vzdialenosti sa realizuje v potrubí, za predpokladu, že infraštruktúra je už vybudovaná. Náklady na prevádzkovanie potrubia na prepravu zemného plynu závisia hlavne od priemeru potrubia v súlade so závislosťou znázornenou na **obrázku 5.1** (Hafner & Luciani, 2022). S rastúcim priemerom potrubia rastie jeho plocha exponenciálne, preto prevádzkové náklady s rastúcim priemerom potrubia exponenciálne klesajú.



Obrázok 5.1 Prevádzkové náklady za dopravu zemného plynu plynovodom v závislosti od priemeru potrubia (Hafner & Luciani, 2022).

Na prepravu uhlia môžeme použiť cestnú, koľajovú a lodnú dopravu, pričom cestná doprava má najlepší prístup ku všetkým lokalitám a prístup lodnej dopravy je najmenší. Čím má uhlie vyššiu výhrevnosť, tým menšie množstvo tohto paliva je potrebné prepraviť. Preto je preprava uhlia s vyššou výhrevnosťou vo všeobecnosti lacnejšia. Náklady na prepravu uhlia (v € t⁻¹ km⁻¹) pre jednotlivé spôsoby dopravy v EU sme

prebrali zo správy (van der Meulen et al., 2023). Pomocou výhrevnosti rôznych druhov uhlia sme tieto údaje prepočítali na jednotku € GWh⁻¹ km⁻¹ (pozri **tabuľku 5.2**).

Tabuľka 5.2 Priemerné náklady na prepravu uhlia v EU (van der Meulen et al., 2023).

Typ dopravy	Náklady na prepravu (€ GWh ⁻¹ km ⁻¹)	
	Hnedé uhlie	Čierne uhlie
Lodná	3,6–9,5	2,2–5,6
Cestná	49,2–101,6	29,5–59,3
Vlaková	2,8–3,6	1,7–2,1

Preprava biomasy (dreva) sa môže realizovať rôznymi spôsobmi v závislosti od prepravovanej formy tejto suroviny. Preprava dreva vyžaduje iné prostriedky v porovnaní s prepravou drevnej štiepky, peliet alebo briki. Na energetické účely sa najčastejšie používa biomasa vo forme drevnej štiepky, preprave ktorej sa budeme ďalej venovať. Pred jej prepravou je nutné najprv štiepku vyrobiť, s čím súvisia ďalšie náklady. Náklady na štiepkovanie dreva prepočítané na jednotku tepla uvoľnenú pri jeho spaľovaní za rok 2024 sú uvedené v **tabuľke 5.3**.

Tabuľka 5.3 Náklady na štiepkovanie dreva (English, 2024).

Typ dreva	Náklady na štiepkovanie (€ MWh ⁻¹)
Suché	1,6–1,7
Čerstvé	2,3–5,1

Transport biomasy používanej na energetické účely sa realizuje podobne ako transport uhlia, pomocou cestnej, vlakovej a lodnej dopravy. Príslušné náklady na individuálne spôsoby prepravy drevnej štiepky sú zhrnuté v **tabuľke 5.4**. Ceny boli prepočítané na aktuálnu hodnotu pomocou cenových indexov.

Tabuľka 5.4 Náklady na prepravu drevnej štiepky (Searcy et al., 2007) prepočítané na ceny v roku 2024.

Typ dopravy	Náklady na prepravu (€ GWh ⁻¹ km ⁻¹)	
	Suchá štiepka	Čerstvá štiepka
Cestná	22–30	32–66
Vlaková	5,3–7,2	7,7–16
Lodná	3,1–4,3	4,5–9,4

Pred spaľovaním biomasy (drevnej štiepky) je nutné upraviť jej vlhkosť na požadované hodnoty, ktoré sa pohybujú v rozmedzí 10–15 hmot. %. Na tento účel sa takmer vždy využíva odpadné teplo zo spaľovania. Sušenie biomasy sa dosiahne buď nepriamym ohriatím pomocou vodnej pary, alebo priamym kontaktom biomasy s horúcimi spalinami, horúcim vzduchom prípadne ich kombináciou (Gebreegziabher et al., 2013). Preto prevádzkové náklady na sušenie biomasy na požadovanú vlhkosť budú zanedbateľné, nakoľko tento proces je integrovaný s ich spaľovaním.

V **tabuľke 5.5** je uvedený prehľad a porovnanie cien dopravy jednotlivých typov surovín pre elektrárň s tepelným výkonom 50 MW počas jedného roka, pričom všetky suroviny sa budú prepravovať na vzdialenosť 100 km. Pri rýchlosti prúdenia ZP v potrubí 20 m s⁻¹ a predpokladanej výhrevnosti 9,7 kWh m⁻³ (35 MJ m⁻³) je na prepravu plynu potrebné potrubie s priemerom 0,3 m. Potom sú prevádzkové náklady na použitie tohto potrubia 16,81 € km⁻¹ GWh⁻¹ rok⁻¹ (Hafner & Luciani, 2022).

Tabuľka 5.5 Porovnanie ročných nákladov na dopravu surovín.

Surovina	Náklady na dopravu (tisíce €)			
	Cestná doprava	Vlaková doprava	Lodná doprava	Potrubie
Zemný plyn	–	–	–	737
Hnedé uhlie	730	140	207	–
Čierne uhlie	333–481	64–92	94–136	–
Suchá štiepka	961	233	137	–
Čerstvá štiepka	1394–2883	338–700	199–412	–

Ekologické aspekty výroby zemného plynu, uhlia a biomasy

Na stanovenie celkového ekologického dopadu použitia daného typu paliva na výrobu tepla a energie je potrebné analyzovať nielen proces spaľovania a priame emisie vznikajúce v tomto procese, ale kompletný životný cyklus paliva od jeho ťažby cez procesy úpravy až po dopravu na miesto použitia. Detailná analýza životného cyklu zemného plynu, uhlia a drevnej biomasy prekračuje rozsah tejto štúdie. V nasledujúcom texte sa sústredíme na vplyvy ťažby, úpravy a prepravy na potenciál globálneho otepľovania spojený s použitím jednotlivých druhov palív porovnávaním ich uhlíkovej stopy.

Pri ťažbe a úprave zemného plynu majú najvýznamnejší ekologický dopad nežiaduce úniky zemného plynu, niekedy nútené vypúšťanie plynu prípadne jeho spaľovanie na poľných horákoch. Asociovaný zemný plyn sa častokrát ťaží spolu s ropou. Nie vždy je ekonomicky výhodné upravovať a prepravovať takto vyťažený zemný plyn, napr. ak ťažba prebieha na mori. Vtedy prichádza do úvahy spaľovanie ZP ako vedľajšieho produktu v horákoch priamo na mieste ťažby alebo jeho vypúšťanie do atmosféry. Druhý spôsob nakladania so zemným plynom z ropného ložiska predstavuje veľký environmentálny problém, nakoľko metán je skleníkový plyn, ktorého ekvivalent CO₂ má podľa údajov v **tabuľke 4.3** v 20-ročnom časovom horizonte hodnotu 83.

Celkové množstvo metánu uvoľneného do atmosféry v energetickom sektore v roku 2021 bolo 135,7 Mt. Pričom pri ťažbe ropy a zemného plynu v roku 2021 bolo do atmosféry uvoľnených 46,6 miliónov ton zemného plynu, 8,2 miliónov ton bolo spálených na horákoch a 10,5 miliónov ton predstavuje nežiaduce úniky zemného plynu (Bloomberg NEF, 2022). Celosvetová produkcia zemného plynu v roku 2021 predstavovala 3,17 miliárd ton zemného plynu (Enerdata, 2023). V **tabuľke 5.6** je uvedený hmotnostný ekvivalent CO₂ pre metán unikajúci do atmosféry v dôsledku ťažby zemného plynu, ktorého hodnotu vzťahujeme na jednotkové množstvo tepla uvoľnené pri spaľovaní vyťaženého zemného plynu.

Tabuľka 5.6 Vypočítané hodnoty ekvivalentu CO₂ súvisiaceho s únikom zemného plynu do ovzdušia pri jeho ťažbe (v 20-ročnom časovom horizonte).

Unikajúci zemný plyn	Ekvivalent CO ₂ (kg MWh ⁻¹)
Nežiaduce úniky	20–22
Spaľovanie na horákoch	0,65–0,72
Uvoľnenie do atmosféry	88–97
Spolu	109–120

K podobným záverom vedú aj výsledky práce autorov Alvarez et al. (2018), ktorí uvádzajú, že pri ťažbe ropy a zemného plynu sú predpokladané úniky plynu na úrovni 2,3 %, z čoho 80 % (1,96 % z množstva vyťaženého plynu) tvoria úniky pri ťažbe. Pri celkovej svetovej produkcii 3,17 miliárd ton ZP ročne, celkové úniky zemného plynu tvoria vyše 62 miliónov ton.

Aj pri ťažbe uhlia vznikajú emisie skleníkových plynov. Pri strojovej ťažbe sa do atmosféry uvoľňujú plyny zachytené v ložisku uhlia. Štúdie uvádzajú, že pri povrchovej ťažbe uhlia vznikajú emisie s celkovým ekvivalentom CO₂ 30,6–57,3 kg CO₂e na MWh vyrobenej energie (Tampubulon et al., 2021). Podľa údajov medzinárodného panela pre klimatickú zmenu (IPCC, 2006), množstvo emisií metánu sa pri hĺbkovej ťažbe uhlia odhaduje na 10–25 m³ na tonu uhlia v závislosti od hĺbky ťažby, čo predstavuje 88–221 kg CO₂e na MWh vyrobenej energie.

Pri ťažbe drevnej biomasy (v lese) sa produkujú emisie skleníkových plynov hlavne pri používaní strojov na ťažbu dreva. Ťažba dreva na energetické účely pozostáva zvyčajne z troch krokov. Novovysadený les sa priedťuje v dvoch krokoch a následne sa vyťažia všetky stromy, ktoré v ňom zostali predtým než sa znovu vysadí nový les. Podľa štúdie vykonanej vo Fínsku, počas ktorej sa vyťažilo 8,9 miliónov m³ dreva, boli vyprodukované emisie s ekvivalentom CO₂ 37,971 kt (Haavikko et al., 2022). Po prepočte na hmotnosť suchého dreva, pričom sme uvažovali s hustotou dreva v intervale 310–1030 kg m⁻³ (The Engineering Toolbox, 2025), sme pre ťažbu drevnej biomasy vypočítali ekvivalent CO₂ vzťahnutý na jednotku uvoľnenej tepelnej energie v rozsahu 1,1–7,8 kg MWh⁻¹. Sumár výsledkov sledovania vplyvu ťažby rôznych palív na životné prostredie je uvedený v **tabuľke 5.7**. Podľa údajov zo štúdie AEA (2009), emisie skleníkových plynov súvisiace s kultiváciou, ťažbou a spracovaním rýchlorastúcej drevnej hmoty sa pohybujú okolo 13 kg CO₂e za MWh energie a v prípade peliet drevnej hmoty je to až 90 kg CO₂ za MWh vyrobenej energie.

Tabuľka 5.7 Porovnanie ekvivalenta CO₂ pre ťažbu energetických surovín.

Palivo	Ekvivalent CO ₂ (kg MWh ⁻¹)
Zemný plyn	108–120
Uhlie (povrchová ťažba)	31–57
Uhlie (hlbinná ťažba)	119–278
Biomasa	14–98

Ekologické aspekty logistiky zemného plynu, uhlia a biomasy

Pri preprave a spracovaní zemného plynu dochádza k úniku zemného plynu z potrubí. Taktiež v priebehu manipulácie s kvapalným zemným plynom sa do atmosféry uvoľní nezanedbateľná časť spracovávaného plynu (Bloomberg NEF, 2022). Ekvivalent CO₂ logistiky zemného plynu bol počítaný rovnakým spôsobom, ako pri odhade ekvivalentu jeho ťažby v predchádzajúcej kapitole. Keďže metán je skleníkový plyn s vysokou hodnotou CO₂ ekvivalentu, jeho úniky do atmosféry výrazne prispievajú ku globálnemu otepľovaniu. Pre logistiku zemného plynu bola určená hodnota ekvivalentu CO₂ 21 kg na MWh tepla získaného z vyťaženého zemného plynu (Bloomberg NEF, 2022).

V priemere, emisie pri preprave uhlia zodpovedajú 29 % emisií vygenerovaných pri podzemnej ťažbe uhlia (Ivanova et al., 2022). Ekvivalent CO₂ prepravy a logistiky uhlia je potom v rozmedzí 34–81 kg CO₂ na MWh tepla uvoľneného z vyťaženého uhlia.

Emisie vznikajúce pri preprave a logistike biomasy (drevnej štiepky) sú spôsobené najmä dopravnými prostriedkami použitými na jej prepravu (**tabuľka 5.8**). Drevná štiepka sa najčastejšie prepravuje pomocou cestnej dopravy, lebo je nutné prepravovať ju z veľkej plochy na miesto uskladnenia alebo spotreby. Taktiež, miesto ťažby dreva sa mení, čo robí cestnú dopravu najvýhodnejšou pre prepravu drevnej štiepky. Takáto preprava je najflexibilnejšia, hoci jej cena a emisie sú vyššie ako pri vlakovej a lodnej doprave. Z toho dôvodu môže byť ekvivalent CO₂ prepravy a logistiky drevnej štiepky vyšší ako pri ZP, a pohybuje sa v rozsahu 7–34 kg CO₂ na MWh tepla uvoľneného z drevnej štiepky (Manzone & Calvo, 2017).

Tabuľka 5.8 Vypočítané hodnoty ekvivalentu CO₂ súvisiacich s prepravou a logistikou energetických surovín vztiahnuté na jednotkové množstvo tepla uvoľnené pri ich spálení (Bloomberg NEF, 2022; Ivanova et al., 2022; Manzone & Calvo, 2017).

Palivo	Ekvivalent CO ₂ (kg MWh ⁻¹)
Zemný plyn	21–23
Uhlie	34–81
Biomasa	7–34

Tabuľka 5.9 porovnáva celkové ekvivalenty CO₂ všetkých emisií, ktoré boli počas nakladania s energetickými surovinami vygenerované, od ich ťažby a spracovania až po samotné spaľovanie (pozri **tabuľky 5.7, 5.8 a 4.4**). Emisie vygenerované pri použití zemného plynu sú najnižšie, avšak rozdiel pri porovnaní s ostatnými surovinami nie je veľký. Hoci spaľovanie zemného plynu produkuje najmenej emisií, ekvivalent CO₂ emisií vygenerovaných počas jeho ťažby a prepravy je veľmi vysoký v porovnaní s ostatnými surovinami. Príčinou týchto emisií sú najmä úniky metánu do atmosféry počas jeho ťažby a prepravy. Celkové emisie uvoľnené pri spaľovaní uhlia a biomasy sú podobné, avšak v prípade biomasy pochádza podstatná časť týchto emisií zo spaľovania obnoviteľného uhlíka. Celkové emisie pri spaľovaní uhlia môžu byť v niektorých prípadoch aj nižšie ako pri biomase, nakoľko uhlie dosahuje vyššiu výhrevnosť na jednotku hmotnosti.

Tabuľka 5.9 Ekvivalent CO₂ pre celkové emisie spôsobené nakladaním s energetickými surovinami (pozri údaje v **tabuľkách 5.7, 5.8 a 4.4**).

Palivo	Ekvivalent CO ₂ (kg MWh ⁻¹)
Zemný plyn	334–459
Hnedé uhlie	475–958
Čierne uhlie	480–1250
Antracit	440–883
Biomasa (celkové emisie)	472–853
Biomasa (iné emisie než z obnoviteľného uhlíka (nebiogénny CO ₂))	33–158

Záver

Zemný plyn je palivo tvorené prevažne metánom. Má vysokú výhrevnosť 12,5–15,3 kWh kg⁻¹ (t. j. 40–55 MJ kg⁻¹) a považujeme ho za ekologicky najčistejšie fosílné palivo. Okrem energetického využitia je zemný plyn základnou surovinou na výrobu vodíka, amoniaku, kyseliny dusičnej, hnojív, metanolu a mnohých iných látok.

Uhlie je horľavá hornina a historicky najstaršie používané fosílné palivo. Jeho výhrevnosť závisí od jeho druhu a pohybuje sa v širokom rozsahu hodnôt 2,5–9,7 kWh kg⁻¹ (t. j. 9–35 MJ kg⁻¹). Najvyššiu výhrevnosť má antracit, nasledovaný čiernym uhlím, hnedým uhlím a lignitom.

Biomasu považujeme za obnoviteľný zdroj energie. O obnoviteľnom zdroji hovoríme preto, lebo CO₂ vznikajúci pri spaľovaní biomasy sa opakovane využije na rast novej biomasy. Výhrevnosť suchej drevnej biomasy sa pohybuje v rozsahu 3,9–5,6 kWh kg⁻¹ (14–20 MJ kg⁻¹).

Z hľadiska zloženia je zemný plyn v porovnaní s uhlím a biomasou takmer čisté chemické individuum. Naopak, uhlie a biomasa sú veľmi komplexné suroviny s premenlivým zložením. Zemný plyn má aj najvyššiu výhrevnosť.

Všetky tri typy palív sa dajú použiť na výrobu elektrickej energie alebo na kogeneráciu tepla a elektriny. Zemný plyn sa však môže využiť aj na trigeneráciu (súčasnú výrobu elektriny, tepla a chladu). Technológie využívajúce zemný plyn dosahujú vyššiu účinnosť premeny energetického obsahu na elektrickú energiu (až 60 %) oproti uhliu a biomase (30–45 %).

Účinnosť konverzie chemickej energie paliva je limitovaná aj podmienkami, pri ktorých sa realizuje spaľovanie. Preto jedným z kľúčových parametrov, ktoré ovplyvňujú účinnosť výroby tepla a elektriny z palív, je dosiahnutý stupeň rozvoja technológie a používaných zariadení. Vplyv vývoja energetickej infraštruktúry na účinnosť využitia energie chemicky viazanej v palivách je dokumentovaný v 2. kapitole tejto štúdie.

Pri porovnaní využitia zemného plynu, uhlia a biomasy v domácnostiach na kúrenie a prípravu teplej vody sa zistilo, že domáce plynové kotly majú v priemere účinnosť 85 %, zatiaľ čo kotly na biomasu a uhlie približne 65 %. Kotly na zemný plyn teda účinnejšie premieňajú energetický obsah paliva na užitočnú energiu a majú menšie straty.

Pri spaľovaní zemného plynu sa uvoľňuje približne o 50 % menej CO₂ na jednotku vyrobenej energie v porovnaní so sledovanými tuhými palivami. Pri spaľovaní drevnej biomasy sa uvoľňuje asi dvojnásobne viac CO₂ než pri spaľovaní zemného plynu, avšak tento uhlík sa považuje za obnoviteľný. Celková uhlíková stopa spaľovania biomasy však nie je nulová, keďže sa pri nej uvoľňujú aj oxidy dusíka a metán, ktoré výrazne ovplyvňujú uhlíkovú bilanciu.

Emisie tuhých častíc pri spaľovaní zemného plynu sú zanedbateľné, kým pri spaľovaní uhlia a biomasy sú mnohonásobne väčšie a predstavujú závažný problém. Emisie oxidu siričitého pri spaľovaní uhlia sú 1000- až 9000-násobne vyššie než pri spaľovaní zemného plynu. Pri biomase sú asi 40-krát vyššie ako pri zemnom plyne. Emisie NO_x sú pri uhlí výrazne vyššie než pri zemnom plyne, zatiaľ čo pri biomase sú porovnateľné so spaľovaním zemného plynu.

Pri spaľovaní zemného plynu nevzniká takmer žiaden tuhý odpad ani nedochádza ku znečisteniu ťažkými kovmi. Spaľovanie čierneho uhlia však môže vyprodukovať 4–27 kg tuhého odpadu na 1 MWh energie, pričom tento odpad obsahuje ťažké kovy. Tuhý odpad vzniká aj pri spaľovaní biomasy a obsah ťažkých kovov v takomto odpade závisí od kontaminácie biomasy a pôdy, na ktorej bola biomasa vypestovaná. Odpad z odsírenia spalín pri spaľovaní zemného plynu je zanedbateľný oproti odpadu vznikajúcemu spaľovaním uhlia alebo biomasy.

Na celkovú uhlíkovú stopu vybraných druhov paliva nevlplyva iba samotné spaľovanie, ale aj ďalšie procesy ich životného cyklu: ťažba, úprava, logistika a manažment odpadu. Výrazným negatívnym faktorom v prípade zemného plynu sú úniky metánu do atmosféry. V ich dôsledku má výroba zemného plynu porovnateľnú uhlíkovú stopu ako výroba uhlia a vyššiu než výroba biomasy. Metán je skleníkový plyn, ktorého negatívny účinok na životné prostredie je 83-krát väčší než účinok CO₂ (v 20-ročnom horizonte), preto aj transport zemného plynu potrubím môže mať vyššiu uhlíkovú stopu než doprava uhlia a biomasy železnicou, loďou alebo cestnou dopravou.

Celková uhlíková stopa čierneho uhlia (od ťažby po spaľovanie) je asi dvojnásobne vyššia než pri zemnom plyne vrátane únikov plynu. Keďže priame emisie CO₂ zo spaľovania biomasy sa nezapočítavajú do hodnoty jej ekvivalentu CO₂, uhlíková stopa biomasy je v priemere nižšia než pri zemnom plyne a uhlí.

Náklady na ťažbu, úpravu a dopravu zemného plynu, uhlia a biomasy závisia od mnohých faktorov, akými sú dostupnosť, lokalita, charakter ložiska či typ paliva. Vo všeobecnosti sú náklady na ťažbu a úpravu zemného plynu na jednotku energetického obsahu v priemere o polovicu nižšie než pri čiernom uhlí. Náklady na kultiváciu, ťažbu a úpravu drevnej biomasy sú však v priemere dvojnásobne vyššie než pri zemnom plyne.

Najlacnejším spôsobom dopravy zemného plynu je doprava plynovodom, pričom náklady na prepravu ZP týmto spôsobom závisia aj od priemeru potrubia plynovodu. V porovnaní s dopravou čierneho uhlia sú náklady na prepravu zemného plynu potrubím vyššie, najmä na krátke vzdialenosti. Doprava čerstvej štiepky však môže byť ešte drahšia než doprava zemného plynu.

Prípadová štúdia vykurovania modelového domu s obytnou plochou 150 m² a primeranou kvalitou tepelnej izolácie, ktorý stojí na území Slovenska, ukázala, že náklady na obstaranie kotla na plyn a uhlie sú porovnateľné, zatiaľ čo pri biomase sú v priemere o 50 % vyššie. Náklady na údržbu sú najnižšie pri plynovom kotle a najvyššie pri kotle na biomasu. Najvyššiu účinnosť má kotol na zemný plyn, najnižšiu kotol na uhlie. Ročné náklady na palivo sú porovnateľné vo všetkých troch prípadoch. Najlepší komfort používania poskytuje plynový kotol, zatiaľ čo kotol na uhlie vyžaduje ručné nakladanie paliva a kotol na biomasu pravidelné dopĺňanie zásobníka. V časovom horizonte 15 rokov, pri cenách predpokladaných v tejto štúdii, sú celkové náklady vlastníctva (TCO) zahŕňajúce investičné náklady na kúpu a inštaláciu kotla spolu s rozvodmi, reguláciou a vybudovaním miesta na skladovanie paliva (CAPEX) a prevádzkové náklady na vykurovanie modelového domu vrátane revízie a údržby zariadení a zneškodnenia vznikajúcich odpadov (**tabuľka 3.3**, OPEX bez započítania nákladov na emisie CO₂, EU ETS) najvýhodnejšie v prípade použitia zemného plynu. Na takmer rovnakej úrovni je hodnota TCO v prípade vykurovania RD drevom. Celkové náklady vlastníctva v prípade použitia uhlia ako zdroja tepla sú o 13,5 % vyššie než v prípade zemného plynu. Najvyššie náklady na vykurovanie modelového domu súvisia s použitím drevných peliet ako zdroja energie, čo primárne súvisí s vysokými investičnými nákladmi (**tabuľka 3.3**, TCO bez započítania nákladov na emisie CO₂, EU ETS). Po započítaní nákladov na likvidáciu emisií vznikajúcich pri spaľovaní jednotlivých druhov palív (**tabuľka 3.3**, TCO so započítaním nákladov na emisie CO₂, EU ETS) by sa situácia zmenila. Ekonomicky najvýhodnejšou alternatívou by sa stalo vykurovanie RD drevom, nasledované použitím zemného plynu a s veľkým odstupom vykurovanie uhlím alebo drevnými peletkami. Z uvedeného vyplýva, že ekonomika vykurovania domácnosti je výrazným spôsobom ovplyvnená platnou legislatívou. Z hľadiska komfortu vykurovania RD je spomedzi porovnávaných palív najvýhodnejšou alternatívou zemný plyn (**tabuľka 3.2**). Rovnaký výsledok vidíme tiež pri zohľadnení emisií tuhých častíc a ťažkých kovov (**tabuľka 4.1**). Ak sa zameriame na uhlíkovú stopu vybraných druhov palív, obnoviteľné zdroje energie, drevo a paletky, majú najnižšiu uhlíkovú stopu, nasleduje zemný plyn a najhoršou alternatívou je uhlie (**tabuľka 4.4**).

Používanie zemného plynu, uhlia a biomasy na varenie v uzavretých a nedostatočne vetraných priestoroch môže viesť k zvýšeným emisiám oxidu dusíka a tuhých častíc, ktoré prekračujú povolené limity. Preto je pri ich použití extrémne dôležité zabezpečiť dostatočné vetranie priestoru kuchyne.

Medzi najväčšie výhody použitia zemného plynu na výrobu energie a tepla patrí jeho čistota a minimálny obsah kontaminantov. Ide o univerzálne palivo, ktoré sa dá využiť na výrobu elektriny a tepla, ale tiež rôznych chemikálií. Vyznačuje sa vyšším energetickým obsahom, plynným skupenstvom, takmer nulovými emisiami tuhých častíc, rozvinutou technológiou, vysokou účinnosťou premeny energie a jednoduchou, komfortnou reguláciou. Nevýhodou zemného plynu je jeho fosílny pôvod. Metán, ktorý je jeho hlavnou zložkou, je skleníkový plyn s účinkom 83-krát väčším ako CO₂, a preto sú úniky metánu do ovzdušia veľmi nežiaduce. Ďalšou nevýhodou použitia ZP sú zvýšené náklady na transport v prípadoch, keď nie je k dispozícii plynovod, čo vyžaduje jeho dopravu vo forme CNG alebo LNG.

Výhodou uhlia je predovšetkým stabilná produkcia veľkého množstva elektrickej energie a tepla, rozvinuté a dobre známe technológie, jeho relatívna dostupnosť v krajinách so zásobami a pomerne vysoký energetický obsah. Nevýhody však výrazne prevažujú, jedná sa o fosílny zdroj energie s vysokou uhlíkovou stopou, ktorý obsahuje množstvo znečisťujúcich látok. S jeho používaním sú spojené aj environmentálne dopady súvisiace s jeho ťažbou, prepravou a samotným spaľovaním, ako aj potreba čistenia spalín od oxidu siričitého, oxidu uhľovitého, oxidov dusíka, tuhých častíc, VOC a oxidu uhličitého.

Najväčšou výhodou biomasy je jej obnoviteľný charakter. Pri minimalizácii nákladov a environmentálnych dopadov na výrobu, spracovanie a dopravu môže mať používanie biomasy relatívne nízku uhlíkovú stopu. Medzi nevýhody však patrí jej nízky energetický obsah v porovnaní so zemným plynom a uhlím, potreba rozsiahlych plôch na jej pestovanie, potenciálne znižovanie potravinovej sebestačnosti, vyššie emisie tuhých častíc a potreba manažovania tuhého zvyšku. Okrem toho je s jej používaním spojená aj zvýšená spotreba vody.

Spomedzi študovaných zdrojov energie sa v aktuálnej ekonomickej a legislatívnej situácii a pri ich aktuálnej dostupnosti javí ako najvýhodnejšou alternatívou zemný plyn, čo súvisí s jeho zložením, čistotou a vysokým obsahom uhlíka. Spaľovaním zemného plynu vzniká relatívne prijateľné množstvo CO₂ a aj ostatné ukazovatele ekologického dopadu tohto spôsobu výroby energie sú nízke. Negatívom použitia zemného plynu je fakt, že tento energetický zdroj nie je obnoviteľný. Naproti tomu biomasa ako zdroj energie má najnižšiu uhlíkovú stopu.

Obnoviteľnou alternatívou zemného plynu sa môže v budúcnosti stať biometán, výhody použitia ktorého sú nesporné. Biometán sa vyrába úpravou bioplynu, ktorý sa vyrába z rozložiteľného odpadu jeho biologickým rozkladom za pomoci metanogénnych mikroorganizmov. Po odstránení znečisťujúcich prímiesí (CO₂, NH₃, H₂S) z bioplynu sa jeho zloženie nelíši od zloženia zemného plynu, ktorý môže v plnej miere zastúpiť. Pri tom nie je potrebná žiadna modifikácia zariadení ani infraštruktúry súvisiacej s jeho použitím na energetické alebo iné účely. Každý prídavok biometánu k zemnému plynu tak znamená nielen znižovanie závislosti na jeho dovoze, ale tiež zodpovednejšie narábanie s odpadmi a minimalizáciu emisií skleníkových plynov zo skládok či kompostární, ako aj znižovanie uhlíkovej stopy súvisiacej s energetickým využitím zemného plynu.

Použitá literatura

- AAR, The Association of American Railroads (2019). Railroads and Coal, <https://www.aar.org/wp-content/uploads/2018/05/AAR-Railroads-Coal.pdf>
- Abbas T., Issa M., Ilinca A. (2020). Biomass cogeneration technologies: A review, *Journal of Sustainable Bioenergy Systems* 10, 1–15. doi: 10.4236/jsbs.2020.101001
- AEA (2009). Defra report ED01858010: Carbon Factor for Wood Fuels for the Supplier Obligation, AEA, Didcot, OX, UK.
- AGA, American Gas Association (2024). Natural Gas Market Indicators – December 19, 2024, <https://www.aga.org/research-policy/resource-library/natural-gas-market-indicators-december-19-2024/>
- Ahmad R., Zhou Y.G., Liang C., Li G., Zhao N., Abbas A., Yu F., Li L.L., Gong J., Wang D.Y., Yang Y.M., Tang Z.X., Sultan M., Suni C., Dong R.J. (2022). Comparative evaluation of thermal and emission performances for improved commercial coal-fired stoves in China, *RSC Advances* 12, 20886. doi: 10.1039/d2ra03364j
- AIRUSE (2016). Report 9: Emission Factors for Biomass Burning, https://airuse.eu/wp-content/uploads/2013/11/R09_AIRUSE-Emission-factors-for-biomass-burning.pdf
- Alcântara S.C.S., Ochoa A.A.V., da Costa J.A.P., Michima P.S.A., Silva H.C.N. (2019). Natural gas based trigeneration system proposal to an ice cream factory: An energetic and economic assessment, *Energy Conversion and Management* 197, 111860. doi: 10.1016/j.enconman.2019.111860
- Allen D.T. (2014). Methane emissions from natural gas production and use: reconciling bottom-up and top-down measurements, *Current Opinion in Chemical Engineering* 5, 78–83. doi: 10.1016/j.coche.2014.05.004
- Altikulaç A., Turhan Ş., Kurnaz A., Gören E., Duran C., Hançerlioğulları A., Uğur F.A. (2022). Assessment of the enrichment of heavy metals in coal and its combustion residues, *ACS Omega* 7, 21239–21245. doi: 10.1021/acsomega.2c02308
- Altun A.F. (2022). A conceptual design and analysis of a novel trigeneration system consisting of a gas turbine power cycle with Intercooling, ammonia–water absorption refrigeration, and hot water production, *Sustainability* 14(19), 11820. doi: 10.3390/su141911820
- Alvarez R.A., Zavala-Araiza D., Lyon D.R., Allen D.T., Barkley Z.R., Brandt A.R., Davis K.J., Herndon S.C., Jacob D.J., Karion A., Kort E.A., Lamb B.K., Lauvaux T., Maasackers J.D., Marchese A.J., Omara M., Pacala S.W., Peischl J., Robinson A.L., Shepson P.B., Sweeney C., Townsend-Small A., Wofsy S.C., Hamburg, S.P. (2018). Assessment of methane emissions from the US oil and gas supply chain, *Science* 361(6398), 186–188. doi: 10.1126/science.aar7204
- Anderson N., Mitchell D. (2016). Forest operations and woody biomass logistics to improve efficiency, value, and sustainability, *BioEnergy Research* 9(2), 518–533. doi: 10.1007/s12155-016-9735-1
- de Andrade Cruz M., de Paula Vieira de Castro R., de Queiroz Fernandes Araújo O., de Medeiros J.L. (2019). Environmental performance of a solid waste monetization process applied to a coal-fired power plant with semi-dry flue gas desulfurization, *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 7, 506–520. doi: 10.13044/j.sdewes.d6.0251
- Argus (2025). Viewpoint: More US met coal consolidation ahead, <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2639679-viewpoint-more-us-met-coal-consolidation-ahead>
- Ashokkumar V., Venkatkarthick R., Jayashree S., Chuetor S., Dharmaraj S., Kumar G., Chen W.H., Ngamcharussrivichai C. (2022). Recent advances in lignocellulosic biomass for biofuels and value-added bioproducts-A critical review, *Bioresource technology* 344, 126195. doi: 10.1016/j.biortech.2021.126195

- Bailera M., Peña B., Lisbona P., Romeo L.M. (2020). Improved flexibility and economics of combined cycles by power to gas, *Frontiers in Energy Research* 8, 151. doi: 10.3389/fenrg.2020.00151
- Balmes J.R., Holm S.M., McCormack M.C., Hansel N.N., Gerald L.B., Krishnan J.A. (2023). Cooking with natural gas: Just the facts, please, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 207(8), 996–997. doi: 10.1164/rccm.202302-0278VP
- Barros N., Fontes T. (2024). Impact of kitchen natural gas use on indoor NO₂ levels and human health: A case study in two European cities, *Applied Sciences* 14, 8461. doi: 10.3390/app14188461
- Baskar C., Baskar S., Dhillon R.S. (Eds.) (2012). *Biomass Conversion: The Interface of Biotechnology, Chemistry and Materials Science*, Springer, Berlin, Germany. doi: 10.1007/978-3-642-28418-2
- Basu S, Debnath A.K. (2019). *Power Plant Instrumentation and Control Handbook* (2nd ed.), Academic Press, London, UK.
- Beiron J., Montañés R.M., Normann F., Johnsson F. (2020). Flexible operation of a combined cycle cogeneration plant – A techno-economic assessment, *Applied Energy* 278, 115630. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115630
- Bell F.G., Donnelly L.J. (2006). *Mining and its Impact on the Environment*, Taylor & Francis, New York, USA.
- Bhoi P.R., Sarkar S. (2025). The co-firing of pine biomass and waste coal in 100 and 600 MW power plants: A sustainable approach to reduce GHG emissions, *Sustainability* 17, 4473. doi: 10.3390/su17104473
- Bian Z.F., Inyang H.I., Daniels J.L., Otto F., Struthers S. (2010). Environmental issues from coal mining and their solutions, *Mining Science and Technology (China)* 20(2), 215–223. doi: 10.1016/S1674-5264(09)60187-3
- Bloomberg NEF (2022). *The Oil and Gas Industry's Methane Problem in Four Charts*, <https://about.bnef.com/insights/commodities/the-oil-and-gas-industrys-methane-problem-in-four-charts/>
- Bohn D. (2009). Designing a power plant with highest efficiency: Results from SFB 561, *Journal of Aerospace Power* 24(4), 717–728.
- Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G., Zender C.S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118(11), 5380–5552. doi: 10.1002/jgrd.50171
- Breeze P. (2019). *Power Generation Technologies* (3rd ed.), Newnes, Cambridge, MA, US. doi: 10.1016/B978-0-08-102631-1.00004-3
- Brum N.C.L. (2012). *Analysis of Thermal Plants Configuration*, in G.F. Marta de Souza (Ed.) *Thermal Power Plant Performance Analysis*, Springer, London, UK.
- Cansino-Loeza B., Ponce-Ortega J.M. (2024). The water–energy–food nexus, *Developments in Environmental Modelling* (Vol. 32), Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands. doi: 10.1016/B978-0-443-13571-2.00001-1
- Caputo F., Cascetta F., Lamanna G., Rotondo G., Soprano A. (2015). Estimation of the damage in a natural gas flow line caused by the motion of methane hydrates, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 26, 1222–1231. doi: 10.1016/j.jngse.2015.07.050
- Cenușă V.E., Opreș I. (2024). Design optimization of cogeneration steam power plants with supercritical parameters, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 64, 103727. doi: 10.1016/j.seta.2024.103727

- Chaiyo R., Wongwiwat J., Sukjai Y. (2025). Numerical and experimental investigation on combustion characteristics and pollutant emissions of pulverized coal and biomass co-firing in a 500 kW burner. *Fuels* 6(1), 9. doi: 10.3390/fuels6010009
- Cranmore R.G., Stanton E. (2000). Natural Gas, in R.A. Dawe (Ed.) *Modern Petroleum Technology* (6th ed., Vol. 1), Wiley, Hoboken, NJ, USA.
- Czech T., Marchewicz A., Sobczyk A.T., Krupa A., Jaworek A., Śliwiński Ł, Rosiak D. (2020). Heavy metals partitioning in fly ashes between various stages of electrostatic precipitator after combustion of different types of coal, *Process Safety and Environmental Protection* 133, 18–31. doi: 10.1016/j.psep.2019.10.033
- daibau.sk (2025). Plynoinštalácia cena, <https://www.daibau.sk/ceny/plynoinstalacie>
- Damayanti R., Khaerunissa H. (2018) Carbon dioxide emission factor estimation from Indonesian coal, *Indonesian Mining Journal* 21(1), 45–58. doi: 10.30556/imj.Vol21.No1.2018.687
- Demirbaş A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals, *Energy Conversion and Management* 42(11), 1357–1378. doi: 10.1016/S0196-8904(00)00137-0
- Demirbaş A. (2005). Heavy metal contents of fly ashes from selected biomass samples, *Energy Sources* 27, 1269–1276. doi: 10.1080/009083190519384
- DOE, US Department of Energy (2025a). Alternative Fuels Data Center, <https://afdc.energy.gov/#:~:text=The%20Alternative%20Fuels%20Data%20Center%20%28AFDC%29%20provides%20information%2C,renewable%20fuels%2C%20advanced%20vehicles%2C%20and%20other%20fuel-saving%20strategies>
- DOE, US Department of Energy (2025b). Furnaces and Boilers, <https://www.energy.gov/energysaver/furnaces-and-boilers#:~:text=Although%20older%20fossil%20fuel%20furnace,useful%20heat%20for%20your%20home>
- Dziubarczyk, Producer of the ecological heating boilers (2025). DRAGON, pellet - fired central heating boiler, <https://www.dziubarczyk.com.pl/en/DRAGON?utm>
- EEA, European Environment Agency (2025). <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/waste-and-recycling/municipal-and-packaging-waste-management-country-profiles-2025/sk-municipal-waste-factsheet.pdf/%40%40download/file?utm>
- EIA, US Energy Information Administration (2024). Coal Explained: Coal Prices and Outlook, <https://www.eia.gov/energyexplained/coal/prices-and-outlook.php>
- EIA, US Energy Information Administration (2025). The cost of transporting coal to the U.S. electric power sector fell slightly in 2023, <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=64564#>
- Enerdata (2023). Natural Gas Production, *World Energy & Climate Statistics – Yearbook 2024*. <https://yearbook.enerdata.net/natural-gas/world-natural-gas-production-statistics.html>
- Energy (2017). Residential and Non-residential Building Stock Renovation Strategy, Slovak Republic, https://energy.ec.europa.eu/system/files/2017-08/update_of_the_residential_and_non-residential_building_stock_renovation_strategy_slovak_republic_0.pdf
- Energy Instrat (2025). Coal Prices and Production Cost, <https://energy.instrat.pl/en/mining/coal-prices-production-cost/>
- Energy Voice (2025). <https://www.energyvoice.com/markets/566576/the-lng-curse-a-political-blessing-in-disguise/>

- English B. (Ed.) (2024). 2021 Biomass Production Costs for the 2024 Billion Ton Analysis, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA.
- EPA, US Environmental Protection Agency (1999). Report to Congress Wastes from the Combustion of Fossil Fuels, Volume 1 - Executive Summary, EPA, Washington, DC, USA.
- EPA, US Environmental Protection Agency (2025). AP-42: Compilation of Air Emissions Factors from Stationary Sources, <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors-stationary-sources>
- Esteves B., Sen U., Pereira H. (2023). Influence of chemical composition on heating value of biomass: A review and bibliometric analysis, *Energies (Basel)* 16, 4226. doi: 10.3390/en16104226
- The European Parliament (2008). DIRECTIVE 2008/50/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, Official Journal of the European Union L 152/1–44.
- Eurostat (2025). Coal production and consumption statistics. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Coal_production_and_consumption_statistics
- Faramawy S., Zaki T., Sakr A.A.E. (2016). Natural gas origin, composition, and processing: A review, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 34, 34–54. doi: 10.1016/j.jngse.2016.06.030
- Fuglestvedt J.S., Isaksen I.S.A., Wang W.C. (1996). Estimates of indirect global warming potentials for CH₄, CO and NO_x, *Climatic Change* 34, 405–437. doi: 10.1007/BF00139300
- GARDEON (2025). Cenník prístreškov GARDEON, <https://gardeon.sk/pristresky/gardeon/cennik/>
- Gebreegziabher T., Oyedun A.O., Hui C.W. (2013). Optimum biomass drying for combustion – A modeling approach, *Energy* 53, 67–73. doi: 10.1016/j.energy.2013.03.004
- Gold T., Soter S. (1982). Abiogenic methane and the origin of petroleum, *Energy Exploration & Exploitation* 1(2), 89–104. doi: 10.1177/014459878200100202
- Grammelis P., Margaritis N., Karampinis E. (2016). Solid Fuel Types for Energy Generation: Coal and Fossil Carbon-Derivative Solid Fuels, in: *Fuel Flexible Energy Generation: Solid, Liquid and Gaseous Fuels* (J. Oakey, Ed.), Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Gruenwald T., Seals B.A., Knibbs L.D., Hosgood H.D. III (2023). Population attributable fraction of gas stoves and childhood asthma in the United States, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20, 75. doi: 10.3390/ijerph20010075
- Haavikko H., Kärhä K., Poikela A., Korvenranta M., Palander T. (2022). Fuel consumption, greenhouse gas emissions, and energy efficiency of wood-harvesting operations: A case study of stora enso in Finland, *Croatian Journal of Forest Engineering* 43, 79–97. doi: 10.5552/crojfe.2022.1101
- Hafner M., Luciani G. (2022). *Power Generation from Coal, Oil, Gas, and Biofuels*, Palgrave Macmillan, Cham, Switzerland. doi: 10.1007/978-3-030-86884-0
- Harmsen R., Crijns-Graus W. (2021). Unhiding the role of CHP in power & heat sector decomposition analyses, *Energy Policy* 152, 112208. doi: 10.1016/j.enpol.2021.112208
- Hartman H.L., Mutmanský J.M. (2002). *Introductory Mining Engineering* (2nd ed.), Wiley, Hoboken, NJ, USA.
- Hassan H., Lim J.K., Hameed B.H. (2016). Recent progress on biomass co-pyrolysis conversion into high-quality bio-oil, *Bioresource Technology* 221, 645–655. doi: 10.1016/j.biortech.2016.09.026
- Henderson C. (2014). *Increasing the Flexibility of Coal-Fired Power Plants*, CCC/242, IEA Clean Coal Centre, London, UK.
- Hero (1851). *Pneumatics* (translated by Bennet Woodcroft from the original Greek), Taylor, Walton and Maberly, London, UK.

- Husár J., Šuhaj P., Haydary J. (2021). Experimental validation of complex mathematical model of screw reactor coupled with particle model describing pyrolysis of lignocellulosic biomass, *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9(4), 105543. doi: 10.1016/j.jece.2021.105543
- IEA, International Energy Agency (2011). *Technology Roadmap: High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation*, IEA, Paris.
- IEA, International Energy Agency (2021). *Delivering Sustainable Bioenergy*, IEA, Paris.
- IEA, International Energy Agency (2025a). *Global Natural Gas Demand per Sector, 2007-2025*, IEA, Paris. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-natural-gas-demand-per-sector-2007-2025?utm_source
- IEA, International Energy Agency (2025b). *Global Energy Review 2025: Electricity*, IEA, Paris. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/electricity?utm_source
- IPCC (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy* (H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, Eds.), IGES, Hayama, Japan.
- ISO (2025). *EN ISO 17225-2:2021 – Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: Graded wood pellets*.
- Ivanova S., Vesnina A., Fotina N., Prosekov A. (2022). An overview of carbon footprint of coal mining to curtail greenhouse gas emissions, *Sustainability* 14, 15135. doi: 10.3390/su142215135
- Jaffe D.A., Creekmore A. (2024). Emissions and exposure to NO_x, CO, CO₂ and PM_{2.5} from a gas stove using reference and low-cost sensors, *Atmospheric Environment* 331, 120564. doi: 10.1016/j.atmosenv.2024.120564
- Jin T.Y. (2022). The effectiveness of combined heat and power (CHP) plant for carbon mitigation: Evidence from 47 countries using CHP plants, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 50, 101809. doi: 10.1016/j.seta.2021.101809
- Johansson L.S., Leckner B., Gustavsson L., Cooper D., Tullin C., Potter A. (2004). Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets, *Atmospheric Environment* 38(25), 4183–4195. doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.04.020
- Jugjai S., Rungsimuntuchart N. (2002). High efficiency heat-recirculating domestic gas burners, *Experimental Thermal and Fluid Science* 26(5), 581–592. doi: 10.1016/S0894-1777(02)00164-4
- Juhrich K. (2016). *CO₂ Emission Factors for Fossil Fuels*, German Environment Agency (UBA), Dessau-Roßlau, Germany.
- Kagiliery J., Chakraborty S., Acree A., Weindorf D.C., Brevik E.C., Jelinski N.A., Li B., Jordan C. (2019). Rapid quantification of lignite sulfur content: Combining optical and X-ray approaches, *International Journal of Coal Geology* 216, 103336. doi: 10.1016/j.coal.2019.103336
- Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H. (2016). *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer, Berlin, Germany.
- Kanzian C., Holzleitner F., Stampfer K., Ashton S. (2009). Regional energy wood logistics - Optimizing local fuel supply, *Silva Fennica* 43(1), 113–128. doi: 10.14214/sf.464
- Katz D.L., Cornell D., Kobayashi R., Poettmann F.H., Vary J.A., Elenbaas J.R., Weinaug C.F. (1959). *Handbook of Natural Gas Engineering*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Kindra V.O., Osipov S.K., Zlyvko O.V., Shcherbatov I.A., Sokolov V.P. (2021). Thermodynamic analysis of an innovative steam turbine power plant with oxy-methane combustors, *Archives of Thermodynamics* 42(4), 123–140. doi: 10.24425/ather.2021.139654
- King G.E. (2012). *Hydraulic Fracturing 101: What Every Representative, Environmentalist, Regulator, Reporter, Investor, University Researcher, Neighbor and Engineer Should Know About Estimating Frac*

- Risk and Improving Frac Performance in Unconventional Gas and Oil Wells. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, February 6–8, 2012, 152596, pp. 1–80, The Woodlands, TX, USA.
- Lamberg H., Nuutinen K., Tissari J., Ruusunen J., Yli-Pirilä P., Sippula O., Tapanainen M., Jalava P., Makkonen U., Saarnio K., Hillamo R., Hirvonen M.R., Jokiniemi J. (2011). Physicochemical characterization of fine particles from small-scale wood combustion, *Atmospheric Environment* 45(40), 7635–7643. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.02.072
- Lammel G., Graßl H. (1995). Greenhouse effect of NO_x, *Environmental Science and Pollution Research* 2(1), 40–45. doi: 10.1007/BF02987512
- Lebel E.D., Finnegan C.J., Ouyang Z., Jackson R.B. (2022). Methane and NO_x emissions from natural gas stoves, cooktops, and ovens in residential homes, *Environmental Science & Technology* 56, 2529–2539. doi: 10.1021/acs.est.1c04707
- Lee J., Kim J., Kim S., Im G., Lee S., Jeon E.C. (2012). Development of a country-specific CO₂ emission factor for domestic anthracite in Korea, 2007–2009, *Environmental Science and Pollution Research* 19, 2722–2727. doi: 10.1007/s11356-012-0770-y
- Liang FY, Ryvak M, Sayeed S, Zhao N. (2012). The role of natural gas as a primary fuel in the near future, including comparisons of acquisition, transmission and waste handling costs of as with competitive alternatives, *Chemistry Central Journal* 6(Suppl 1), 1–24. doi: 10.1186/1752-153X-6-S1-S4
- Lieskovský M., Jankovský M, Trenčiansky M., Merganič J., Dvořák J. (2017). Ash content vs. the economics of using wood chips for energy: Model based on data from Central Europe, *BioResources* 12(1), 1579–1592. doi: 10.15376/biores.12.1.1579-1592
- Liu Z.F., Wang C.Y., Fan J.L., Liu M., Xing Y., Yan J.J. (2024). Enhancing the flexibility and stability of coal-fired power plants by optimizing control schemes of throttling high-pressure extraction steam, *Energy*, 288, 129756. doi: 10.1016/j.energy.2023.129756
- Manzone M., Calvo A. (2017). Woodchip transportation: Climatic and congestion influence on productivity, energy and CO₂ emission of agricultural and industrial convoys, *Renewable Energy* 108, 250–259. doi: 10.1016/j.renene.2017.02.074
- Martins N.R., Carrilho da Graça G. (2023). Health effects of PM_{2.5} emissions from woodstoves and fireplaces in living spaces, *Journal of Building Engineering* 79, 107848. doi: 10.1016/j.job.2023.107848
- McKendry P. (2002a). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, *Bioresource Technology* 83(1), 37–46. doi: 10.1016/s0960-8524(01)00118-3
- McKendry P. (2002b). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies, *Bioresource Technology* 83(1), 47–54. doi: 10.1016/s0960-8524(01)00119-5
- MiRad (2025). <https://eshop.mirad.sk/tovar/68041/junkers-bosch-ta-300-ekviterm-regulator>
- Mokhatab S., Poe W.A., Mak J.Y. (2019). *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing* (4th ed.), Gulf Professional Publishing, Cambridge, MA, US. ISBN: 978-0-12-815817-3
- Nath H.P., Dutta B.K., Kalita D., Saikia B.K., Saikia N. (2022). Evaluation of the effect of high sulfur subbituminous coal on the devolatilization of biomass residue by using model free, model fitting and combined kinetic methods, *Fuel* 310(B). doi: 10.1016/j.fuel.2021.122235
- NIST, National Institute of Standards and Technology (2025). NIST Chemistry WebBook, SRD 69, <https://webbook.nist.gov/chemistry/>
- NR SR, Národná rada Slovenskej republiky (2023). Zákon č. 146/2023 Z. z. o ochrane ovzdušia a doplnení niektorých zákonov. Zbierka zákonov Slovenskej republiky.
- Our World in Data (2025). Carbon Dioxide Emissions Factors, <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-dioxide-emissions-factor>

- Persson U., Werner S. (2015). Quantifying the Heating and Cooling Demand in Europe, Stratego Projects, Brussels, Belgium, EU.
- Picheau E., Amar S., Derré A., Pénicaud A., Hof F. (2022). An introduction to the combustion of carbon materials, *Chemistry A European Journal* 28(54), e202200117. doi: 10.1002/chem.202200117
- pohodadomova (2025). <https://www.pohodadomova.sk/termostaty/honeywell-zonova-regulacia-evohome-podlahoveho-kurenia-hce80r/>
- Pradhan P., Mahajani S.M., Arora A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review, *Fuel Processing Technology* 181, 215–232. doi: 10.1016/j.fuproc.2018.09.021
- Ricardo Energy & Environment (2024). Review on Wood Burning Stoves and Indoor Air Pollution: Report for Welsh Government, Ricardo Energy & Environment, Didcot, UK.
- Richter M., Oeljeklaus G., Görner K. (2019). Improving the load flexibility of coal-fired power plants by the integration of a thermal energy storage, *Applied Energy*, 236, 607–621. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.11.099
- Sarabia-Escriba E.J., Soto-Francés V.M., Pinazo-Ojer J.M., Acha S. (2023). Economic and environmental analysis of domestic hot water systems for single-family homes, *Energy and Buildings* 286, 112925, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.112925
- Searcy E., Flynn P., Ghafoori E., Kumar A. (2007). The relative cost of biomass energy transport, *Applied Biochemistry and Biotechnology* 137, 639–652. doi: 10.1007/s12010-007-9085-8
- Shen L., Jacob D.J., Gautam R., Omara M., Scarpelli T.R., Lorente A., Zavala-Araiza D., Lu X., Chen Z.C., Lin J.T. (2023). National quantifications of methane emissions from fuel exploitation using high resolution inversions of satellite observations, *Nature Communications* 14, 4948. doi: 10.1038/s41467-023-40671-6
- SIA (2025). Energy Efficiency & Ecodesign Stoves, <https://stoveindustryassociation.org/energy-efficiency-carbon-saving/energy-efficiency-ecodesign-stoves/>
- SIEA, Slovenská inovačná a energetická agentúra (2021). Porovnanie vykurovacích systémov a palív pre rodinné domy, SIEA, Bratislava. <https://www.siea.sk>
- SIEA, Slovenská inovačná a energetická agentúra (2024). Bezplatné poradenstvo, SIEA, Bratislava. <https://www.siea.sk/bezplatne-poradenstvo/>
- SITA (2019). Energetika, <https://sita.sk/venergetike/agentura-rozda-dotacie-na-kotly-na-biomasu/>
- SITA (2020). Energetika, <https://sita.sk/venergetike/viac-ako-94-obyvateľov-ma-prístup-k-plynu-plynofikacia-novych-obci-sa-neocakava/>
- Skogsstyrelsen (2025). Increasing Harvesting Costs, <https://www.skogsstyrelsen.se/en/news/increasing-harvesting-costs/>
- Smith R.W., Gülen S.C. (2017). Natural Gas Power. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Springer, New York, USA. doi: 10.1007/978-1-4939-2493-6_100-3
- Smółka-Danielowska D., Jabłońska M. (2022). Chemical and mineral composition of ashes from wood biomass combustion in domestic wood-fired furnaces, *International Journal of Environmental Science and Technology* 19, 5359–5372. doi: 10.1007/s13762-021-03506-9
- Sonar D. (2021). Renewable energy based trigeneration systems—technologies, challenges and opportunities, *Renewable-Energy-Driven Future*, 125–168. doi: 10.1016/b978-0-12-820539-6.00004-2
- Speight J.G. (2012). *The Chemistry and Technology of Coal* (3rd ed.), CRC Press, Boca Raton, FL, USA. doi: 10.1201/b12497
- Speight J.G. (2018). *Natural Gas: A Basic Handbook* (2nd ed.), Gulf Professional Publishing, Cambridge, MA, USA. doi: 10.1016/B978-0-12-809570-6.00004-7

- Speight J.G. (2021). *Coal-Fired Power Generation Handbook* (2nd. Ed.), Scrivener Publishing, Beverly, MA, USA.
- Štefánik P., Mlynár M., Kotek P. (2020). *Vykurovacie sústavy a obnoviteľné zdroje energie*, Slovenská technická univerzita, Bratislava.
- Stodola A. (1924). *Dampf- und Gasturbinen: Mit einem Anhang über die Aussichten der Wärmekraftmaschinen* (6. Auflage), Springer, Berlin, Germany.
- Tampubolon F.R.S., Yuwono A.S., Tambunan A.H., Achsani N.A. (2021). Coal mining energy utilization and environmental impact management strategy using the LCA method, *Nature Environment and Pollution Technology* 20(5 Suppl.), 2007–2015. doi: 10.46488/NEPT.2021.v20i05.017
- The Engineering Toolbox (2024). https://www.engineeringtoolbox.com/coal-heating-values-d_1675.html
- The Engineering Toolbox (2025). https://www.engineeringtoolbox.com/wood-density-d_40.html
- Titus B.D., Brown K., Helmisaari H.S., Vanguelova E., Stupak I., Evans A., Clarke N., Guidi C., Bruckman V.J., Varnagiryte-Kabasinskiene I., Armolaitis K., de Vries W., Hirai K., Kaarakka L., Hogg K., Reece P. (2021). Sustainable forest biomass: A review of current residue harvesting guidelines, *Energy, Sustainability and Society* 11(1), 10. doi: 10.1186/s13705-021-00281-w
- Tormey D., Huntley S. (2023). *The Effects of Cooking on Residential Indoor Air Quality: A Critical Review of the Literature with an Emphasis on the Use of Natural Gas Appliances*, California Restaurant Association, Sacramento, CA, USA. https://www.calrest.org/sites/main/files/file-attachments/analysis_effects_of_cooking_on_indoor_air_quality_3.2.2023.pdf
- Trading Economics (2025). *EU Carbon Permits*, <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>
- Twidell J., Weir T. (2015). *Renewable Energy Resources* (3rd ed.), Routledge, New York, USA. ISBN: 978-1-315-76641-6
- UNEP, United Nations Environment Programme (2013). Annex 28: Heating Values and Biomass Ash Contents. In *Toolkit for Identification and Quantification of Releases of Dioxins, Furans and Other Unintentional POPs under Article 5 of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants* (2nd ed.).
- ÚRSO, Úrad pre reguláciu sieťových odvetví (2025). *Parametre pre výpočet ceny tepla na rok 2024*, <https://www.urso.gov.sk/parametre-pre-vypocet-ceny-tepla-na-rok-2024/>
- Vakkilainen E.K. (2017). *Boiler Processes, Steam Generation from Biomass*, 57–86, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK. doi: 10.1016/b978-0-12-804389-9.00003-4
- van den Broek R., Faaij A., van Wijk A. (1996). Biomass combustion for power generation, *Biomass and Bioenergy* 11(4), 271–281. doi: 10.1016/0961-9534(96)00033-5
- van der Meulen S., Grijspaardt T., Mars W., van der Geest W., Roest-Crollius A., Kiel J. (2023). *Cost Figures for Freight Transport – final report*, Panteia, Zoetermeer, NL.
- van Loo S., Koppejan J. (Eds.) (2008). *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, Earthscan, London, UK. ISBN: 978-1-84407-249-1
- Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C.G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass, *Fuel*, 89(5), 913–933. doi: 10.1016/j.fuel.2009.10.022
- vykurene.sk (2025). *Cenník služieb*, <https://vykurene.sk/cennik/>
- vykurovanie24.sk (2024). *Aká je spotreba plynu v rodinnom dome a čo na ňu vplýva*, <https://vykurovanie24.sk/magazin/vykurovanie-plynom/kolko-plynu-spotrebujem-ak-byvam-v-rodinnom-dome/>

- Wang K., Masiol M., Thimmaiah D., Zhang Y.Y., Hopke P.K. (2017). Performance evaluation of two 25 kW residential wood pellet boiler heating systems, *Energy Fuels*, 31, 12174–12182. doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b01868
- Wu D.W., Wang R.Z. (2006). Combined cooling, heating and power: A review, *Progress in Energy and Combustion Science* 32(5–6), 459–495. doi: 10.1016/j.peccs.2006.02.001
- Yokogawa Electric Corporation (2025). <https://www.yokogawa.com/industries/renewable-energy/biomass-power/#News>
- Zhang H.L., Shu Y.X., Wang X.B., Zhou X., Li W.C., Zheng H.G., Tan H.Z. (2025). Improving the flexibility of coal-fired power plants via a pre-gasification burner with ultra-enhanced flame stability, *Engineering*, in press. doi: 10.1016/j.eng.2025.04.015
- Zhu Q. (2015). High-efficiency power generation – review of alternative systems, IEA Clean Coal Centre, London, UK. ISBN: 978-92-9029-569-3