

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká Fakulta
Ústav pro životní prostředí

Ekologie a ochrana prostředí
Ochrana životního prostředí

Progresivní trendy energetického využívání fosilních paliv

Pavel Horák

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Rudolf Přibil, CSc.

Srpen 2010

Prohlašuji,

že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, na něž se v práci odkazuji nebo jsem je v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Zároveň prohlašuji, že tištěná verze této práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do Studijního informačního systému (SIS).

V Praze dne 23. 9. 2010

.....
Pavel Horák

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval RNDr. Rudolfu Přibilovi, CSc. za vedení mé práce a za předmětné připomínky při jejím psaní.

Dále bych rád poděkoval Ing. Miroslavu Krebsovi a Ing. Františku Vaňkovi, CSc. ze společnosti ČEZ za ochotu a poskytnuté informace, jež jsem mohl ve své práci využít.

*„Kdo zná protivníka a zná sebe,
vybojuje sto bitev beze ztrát...“*

Sun-c' ping fa

Abstrakt

Tato práce se zabývá rešeršním zhodnocením progresivních trendů při vývoji technologií na energetické využití fosilních paliv. Úvodní kapitola je zaměřena na důvody pro zvyšování energetické účinnosti spalovacích procesů, zejména na důvody využívání fosilních paliv a jejich spotřebu ve světě a v České republice. Následující kapitola se zaměřuje na majoritně využívané fosilní zdroje, tedy uhlí, ropu a její deriváty a zemní plyn. Ty potom hodnotí z hlediska vlastností i historického vývoje. Stěžejní kapitola potom rozebírá jednotlivá zlepšení i komplexní technologie, kterých se v energetice využívá, například využití plynových turbín, výhody Kalinova cyklu, komplexní technologii integrovaného zplyňování (IGCC), kombinovanou výrobu tepla a elektřiny (CHP), paroplynový cyklus nebo spalování v tlakovém fluidním loži (PFBC).

Abstract

This paper, as literature retrieval, evaluates progressive trends in development of technologies for energetic use of fossil fuels. The introduction is focused on reasons for increase of energetic efficiency of combustion processes, especially reasons for using of fossil fuels and their consumption over the world and in Czech Republic. Next chapter focuses on mainly used fossil fuels, which means coal, crude oil and its derivatives and natural gas. Those are evaluated in term of quality and historical progress, too. Fundamental chapter analyses particular improvements but also complex technologies used in energetic, for example using of gas turbines, assets of Kalina cycle, complex technology of Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC), combined heat and power production (CHP), combined cycle gas turbine (CCGT) or pressurised fluid bed combustion (PFBC).

OBSAH

1. ÚVOD	8
2. NEJDŮLEŽITĚJŠÍ FOSILNÍ ZDROJE	11
2.1. UHLÍ	11
2.1.1. Charakteristika.....	11
2.1.2. Historie a možnosti využívání.....	12
2.2. ROPA A JEJÍ PRODUKTY	12
2.2.1. Charakteristika.....	12
2.2.2. Historie využití	13
2.3. ZEMNÍ PLYN.....	14
2.3.1. Charakteristika.....	14
2.3.2. Historie využití	14
3. MODERNÍ TECHNOLOGIE	16
3.1. INOVACE DÍLČÍCH TECHNOLOGIÍ	16
3.1.1. Plynová turbína (spalovací).....	16
3.1.2. Kalinův cyklus	16
3.2. PAROPLYNOVÝ CYKLUS.....	18
3.3. SPALOVÁNÍ V TLAKOVÉM FLUIDNÍM LOŽI (PFBC).....	19
3.4. KOMBINOVANÝ CYKLUS S INTEGROVANÝM ZPLYŇOVÁNÍM (IGCC).....	21
3.5. KOGENERACE	25
4. ZÁVĚR	26
SEZNAM ZDROJŮ:.....	28
SEZNAM ZKRATEK:	30
SEZNAM TABULEK:	31
SEZNAM OBRÁZKŮ:.....	32
SEZNAM PŘÍLOH:	33

1. Úvod

Dnešní svět a globální ekonomika je zcela závislá na energii. Vývojem společnosti a vývojem technologickým je dáno, že se tato energie z převážné části získává ze sluneční energie uložené v minulých geologických dobách do organické hmoty, která je poté geochemickými procesy transformována do zdrojů, na něž jsou lidské technologie uzpůsobeny, tedy především na uhlí, ropu a zemní plyn, souhrnně nazývané jako fosilní paliva.

Existují i jiné způsoby získávání energie než těžbou a využitím, zejména spaláním, fosilních zdrojů. Souhrnně se nazývají alternativními zdroji. V zásadě jsou snáze dostupné a ekologicky šetrnější, přesto mají fosilní paliva několik výhod. Hlavní výhodou je energetická hustota. Energetická využitelnost např. síly větru je daná pouze kinetickou energií proudícího vzduchu, která je dána vztahem pro kinetickou energii (6) (viz Příloha č. 1). přičemž objem vzduchu prošlého plochou je za čas $t = 1$ s. Pro hustotu vzduchu $\rho_v = 1,25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a rychlost větru $v_v = 10 \text{ ms}^{-1}$ by dosazením do vztahu (7) vyšel energetický tok $E_t = 625 \text{ Wm}^{-2}$ a ze vztahů (5) a (4) vyjde objem plynu $V_v = 10 \text{ m}^3$ a jeho hmotnost $m_v = 1,25 \text{ kg}$. Při spalování např. hnědého uhlí je uvolněná energie okolo $22,7 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, což je průměrná výhřevnost tohoto typu paliva [1]. Další výhodou je stabilita energetického výkonu, neboť kolísání rychlosti ale i směru větru je základní vlastností volné atmosféry, a podle vztahu (6) je např. pokles síly větru o 10 % doprovázen poklesem kinetické energie ve větru obsažené o 27 %.

Světové hospodářství je tedy založeno na spotřebě fosilních paliv, která se pro potřeby současné civilizace těží a využívají ve stále větším objemu. Tabulka č. 1 ukazuje světové zásoby a spotřebu tří hlavních druhů fosilních paliv – uhlí, ropy a zemního plynu. Z ní lze také přibližně předpovědět dobu, na jakou zásoby vystačí. Nejlépe prozkoumané a ohodnocené jsou zásoby uhlí, které by, při současné spotřebě, mělo být vytěženo za zhruba 120 let. Zde však záleží na typu uhlí, jeho kvalitě a geografickém rozmístění nalezišť a spotřeby.

Ropy, která je využívána na větší množství aplikací než uhlí nebo zemní plyn, by podle současných údajů měl být nedostatek za zhruba 43 let. Podle grafu *Světová spotřeba a zásoba ropy* na listu Příloha č. 2 je vidět rostoucí trend za posledních 20 let jak u spotřeby, tak u celkové světové zásoby, což je v důsledku dalších prospekcií ložisek, zejména v severních oblastech severní polokoule, tedy hlavně v Grónsku a v šelfových oblastech Severního ledového oceánu, ze kterých ustupuje ledová pokrývka s postupující globální klimatickou změnou, nebo z nově získaných údajů např. ze zemí třetího světa, zejména těch, na něž je uvaleno hospodářské či vojenské embargo.

Tabulka č. 1: Světové zásoby a světová spotřeba některých fosilních zdrojů v roce 2009

Surovina	Zásoba	Spotřeba
Uhlí	826001 mil tun	6940,6 mil tun *
Ropa	1333,1 mld barelů	84077 tis barelů/den
Zemní plyn	187,49 bil m ³	2940,4 mld m ³ /rok
* - nejedná se o přímou spotřebu, ale o těžbu		

Zdroj: BP (2010): Statistical review of world energy, [1]

Dostatek zemního plynu, opět podle předchozí tabulky, by měl být světovou zásobou zajištěn přibližně na 63 let.

Podle takto vypočtených údajů je nejhorší situace, i přes prospekci nových ložisek, v oblasti těžby a využití ropy a technologie kompletně její spotřebu nahrazující by se tedy měly začít uplatňovat nejpozději během čtyřiceti let. V průběhu jejich vývoje je však možné

a z důvodu opatrnosti i vhodné používat technologie úspornější a efektivnější. Ty by se také mohly uplatnit v ostatních oblastech, neboť např. i uhlí, kterého je prokázaná světová zásoba při současné spotřebě na více než sto let, je podle statistického přehledu BP [1] na povrchu planety rozmístěno nerovnoměrně a jeho doprava na velké vzdálenosti neúměrně zatěžuje jeho spotřebu jak ekonomicky tak ekologicky. Navíc lze jako možnou konkrétní situaci uvést např. velké zásoby uhlí v Rusku (celkově 157 010 milionů tun), ale také nejvyšší světovou a stále rostoucí spotřebu v Číně, která by mohla ohrozit možné potřebné budoucí dodávky pro zbytek Evropy právě z Ruska.

Z údajů Českého statistického úřadu [3] lze získat představu o spotřebě paliv, jejich podílech za odvětví v celém národním hospodářství České republiky a také účinnost těchto procesů. S určitou mírou variability lze přibližně odhadnout i podíly spotřeb v zemích s podobně rozvinutou ekonomikou. Přesné údaje za ČR ukazují v tabulkách Příloha č. 3.

První dvě z nich, Tabulka č. 9 a Tabulka č. 10, vznikly výběrem hodnot z databáze ČSÚ [3] z tabulky „Spotřeba paliv a energií v členění podle odvětví“, kdy nejvýraznější z hodnot jsou právě v položce „Výroba a rozvod elektřiny, plynu a tepelné energie“, což udává význam podílu energetiky na spotřebě primárních fosilních zdrojů, tedy hlavně černého (34,20 %) a hnědého uhlí (83,08 %) a zemního plynu (19,01 %). Na základě těchto dat lze vyhodnotit možné technologické úspory v samotném procesu výroby energie nebo minimalizace technologických ztrát v přípravných procesech pro tuto výrobu jako velice významné jak z ekonomického tak i ekologického hlediska.

Třetí tabulka v příloze tvoří výběr z datového souboru „Bilance energetických procesů“ a je zaměřena na efektivitu výroby elektrické a tepelné energie z primárních fosilních zdrojů. Z uvedených dat lze odečíst průměrnou účinnost jak celkového využití fosilních paliv v České republice ($\eta_{\text{celk}} \approx 0,63$), tak v jeho hlavních oblastech, tedy produkci tepla ($\eta_{\text{tep}} \approx 0,81$) a elektrické energie ($\eta_{\text{el}} \approx 0,36$) za několik posledních let. Z jednotlivých ročních údajů je však vidět určité kolísání a tím tedy i možnosti zlepšení stávajících technologií, stejně jako možnosti využití technologií inovativních a tím zvýšení i průměrné účinnosti. Podle poměru rozdílu krajních hodnot účinností (minimální a maximální) na minimální účinnosti podle vzorce:

$$(1) \quad R_{\text{ú}} = \frac{\text{Max}(\eta_x) - \text{Min}(\eta_x)}{\text{Min}(\eta_x)} * 100 [\%],$$

přičemž $R_{\text{ú}}$ značí rezervu účinnosti, $\text{Max}(\eta_x)$ maximální hodnotu ze souboru hodnot a $\text{Min}(\eta_x)$ minimální hodnotu, pak je největší rezerva při výrobě tepla, konkrétně $R_{\text{ú,tep}} = 4,29 \%$. Tato rezerva a tedy ztráty účinnosti mohou být dány jak použitou technologií, tak i specifickými podmínkami v daných letech, vždy by však měla být snaha tyto ztráty minimalizovat optimalizací právě výrobních technologií.

Z údajů ČSÚ o spotřebě primárních zdrojů v energetice (Příloha č. 3) a za použití rezervy vypočtené ze vzorce (1) lze vypočítat teoreticky možnou úsporu paliva. Konkrétně např. u hnědého uhlí v roce 2000, kdy byla vypočtena největší rezerva v účinnosti při výrobě tepla $R_{\text{ú,tep}} = 4,29 \%$, by bylo možné ušetřit pouze v České republice teoreticky přibližně 245 tisíc tun suroviny za předpokladu rovnoměrného rozložení spotřeby jednotlivých paliv v jednotlivých oblastech spotřeby.

Nutné je také podotknout, že vzhledem ke spotřebě fosilních zdrojů v České republice, jak ukazuje Tabulka č. 11 na listu Příloha č. 3, by se zvýšením celkové účinnosti výroby energie při spalování fosilních paliv o jedno procento např. v roce 2008 dospělo k úspoře 1813 GWh elektrické a tepelné energie, tj. k celoročnímu výkonu 503,6 MW, což je přibližně 7x více než bylo vyprodukováno za všechny alternativní zdroje, tzn. větrné, solární, geotermální i jiné elektrárny mimo vodních, přičemž včetně vodních, jež s ostatními alternativními zdroji v roce 2008 vyprodukovaly 2623,1 GWh [3], by úspora tohoto jednoho procenta znamenala 69 % veškeré z nich vyrobené energie.

Pokud nelze uvažovat zásadní změnu ve využití energie, zejména ve snížení její spotřeby o několik řádů, pak je z těchto porovnání zřejmé, že za současné struktury využívaných energetických zdrojů má mnohem větší význam zvyšování účinnosti spalovacích procesů, což primárně vede k nižší spotřebě a tedy i těžbě fosilních zdrojů, než rozvoji zdrojů alternativních, zejména solární, geotermální a větrné energie. Přímé spalování biomasy případně spalování bioplynu z biomasy uvolněného je na rozdíl od předchozích v jiné pozici, neboť se také jedná o termické procesy, ke kterým je, jak bude zřejmé z následujících kapitol, možné využít i některé technologie určené primárně pro paliva fosilní.

2. Nejdůležitější fosilní zdroje

2.1. Uhlí

2.1.1. Charakteristika

Uhlí je podle Petránka [7] hornina ze skupiny kaustobiolitů, tedy hořlavých organogenních sedimentů, z uhelné řady tzv. humolitů, tedy vzniklá z cévnatých rostlin, zejména z jejich dřeva, procesem uhelnatění. Dělí se na několik typů podle obsahu uhlíku, spalného tepla, ostatních příměsí nebo obsahu prchavých látek, tj. hořlavých látek, které uvolní v plynné formě z uhelného vzorku při zahřívání na teplotu okolo 850 °C za nepřístupu vzduchu [9]. Všechny tyto atributy jsou závislé na složení původní organické hmoty, stáří sedimentu a místních podmínkách, tedy tlaku a teplotě působících na vrstvu humolitu.

Základní, všeobecně známé, dělení je na hnědé uhlí, které je převážně třetihorního stáří, a na černé uhlí, které časově pochází z karbonu a permu (svrchní paleozoikum) a triasu a jury (mezozoikum). K humolitům patří také rašelina, ale vzhledem k jejímu malému globálnímu významu a téměř nulovému významu pro průmysl a energetiku v České republice se technologie na její úpravu a využití neuvažují.

Uhlí lze dále dělit podle obsažených látek, zejména prchavých, jak ukazuje Tabulka č. 2. Toto dělení a hlavně parametry dané kategorie jsou důležité pro použití dané suroviny v rámci konkrétních technologických postupů.

Tabulka č. 2: Základní klasifikace hnědého a černého uhlí

Typ uhlí	Prchavé látky [% hm]	Spalné teplo hořlaviny (HHV _h *) [MJ.kg ⁻¹]
Hnědé uhlí		
Lignit	49 – 63	5800 – 6700
Celistvé hnědé uhlí	51 – 58	6600 – 7250
Pololesklé hnědé uhlí	49 – 53	6800 – 7450
Lesklé hnědé uhlí	44 – 50	7600 – 8100
Černé uhlí		
Pálavé	> 41	6900 – 8400
Plynové	33 – 41	8200 – 8550
Žírné	28 – 33	8300 – 8700
Koksové-žírné	24 – 28	8500 – 8750
Koksové	14 – 24	8550 – 8900
Antracitové	10 – 14	8500 – 8750
Antracit	< 10	8200 – 8500
* HHV – spalné teplo (Higher Heating Value)		

Zdroj: PETRÁNEK, J. (1993): Malá encyklopedie geologie; JIH, České Budějovice. [7]

2.1.2. Historie a možnosti využívání

Spalování uhlí je, hned po spalování dřeva, nejstarším způsobem, kterým člověk získával energii pro své potřeby. Nejprve bylo získáváno teplo spalováním uhlí, což má již mnoha tisíciletou tradici. Existují domněnky, že kamenné uhlí bylo využíváno již v tzv. pavlovienské kultuře, jež byla středoevropskou odnoží kultury gravettienské (Svoboda, 2005 [6]). Další zmínky pocházejí ze starověkých kultur Řecka či Říma, kde se uhlí využívalo na zpracování kovových rud, případně z Číny [11], kde sloužilo mimo běžného ohřevu a metalurgie také k dopravě.

Novodobá a již nepřerušovaná těžba začíná v 18. století, kdy po vynálezu parního stroje začala stoupat potřeba paliva a dřevěné uhlí k tomu již nedostačovalo. Zatím se jednalo o využití v dopravě pomocí mechanický přenos tepelné energie přes píst, ale vynálezem turbíny v roce 1884 Britem Parsonsem [10] již bylo možné použít páru z parního kotle vytápěného uhlím i k produkci energie elektrické. Od té doby se těžba a využití uhlí v absolutních číslech stále zvětšuje.

Dalším způsobem využití uhlí je zdroj surovin pro petrochemický průmysl. Pro něj lze z uhlí získat kapalné uhlovodíky zkapalněním nebo zplyňováním. Zkapalnění lze provést několika způsoby, např. hydrogenací v rámci Bergiusova procesu, nízkoteplotní karbonizací nebo pomocí Fischer-Tropschova procesu [13], který byl použit např. v období druhé světové války v některých zemích kvůli nedostatku ropných produktů. Tento postup však spočíval primárně ve zplynění uhlí na syngas, tedy směs oxidu uhelnatého a plynného vodíku, a poté zkapalnění na lehké uhlovodíky.

Produkty ze zplyňování, které je popsáno ve Fischer-Tropschově metodě, tedy syngas, lze také využít bez zkapalnění. Vodík jako redukční činidlo v chemickém průmyslu a oxid uhelnatý k energetickému využití. Uhlí z různých ložisek obsahuje také různé množství příměsí, především však síru v proměnlivých množstvích z různých zdrojů. Ta se při zplyňování uhlí v redukčním prostředí redukuje na sulfan, čímž se stává významnou surovinou pro výrobu síry, kyseliny sírové a dalších siřných produktů.

2.2. Ropa a její produkty

2.2.1. Charakteristika

Další surovinou s globálním významem je ropa a její produkty. Podle Petránka [7] je to, podobně jako uhlí, sediment ze skupiny kaustobiolitů, ale z živičné řady tzv. sapropelitů, vzniklý rozkladem z odumřelých nižších rostlin a živočichů. Na rozdíl od uhlí, které je tvořeno převážně z rostlin s pletivy, nedochází při rozkladu k uhelnatění, ale k anaerobnímu rozkladu v redukčním prostředí, a tím k uvolňování kratších uhlovodíkových řetězců, z nichž ty nejvíce těžké stoupají ložiskem a tvoří ve vertikálním pohledu vrchní kapsy zemního plynu.

Ropa je složena z několika typů uhlovodíků, podle Blažka a Rábla [14] se jedná o:

- nasycené alifatické řetězce ze skupiny alkanů s obecným sumárním vzorcem C_nH_{2n+2} , pro $5 < n < 15$ se jedná o uhlovodíky kapalné, při $n > 15$ o polotuhé a tuhé,
- nenasyčené alifatické řetězce alkenů se vzorcem C_nH_{2n} ,
- nasycené cyklické řetězce ze skupiny cykloalkanů s obecným sumárním vzorcem C_nH_{2n} a
- řetězce s aromatickými jádry, tedy se vzorcem C_nH_{2n-6} .

Kromě nich se v ropě objevují proměnlivá množství příměsí, zejména síry, dusíku, vanadu, či niklu, která závisí na konkrétních geologických podmínkách, ve kterých daný sediment vznikl a jeho specifičnost lze tedy rozlišovat geograficky. Na množství výše zmíněných heteroatomů,

zejména kovů, potom závisí specifická hmotnost dané ropy, tedy s jejich rostoucí koncentrací se zvyšuje i hmotnost. Obvyklé složení základních prvků je přibližně 84 – 87 % hm. uhlíku, 11 - 14 % hm. vodíku, 0,05 – 1,0 % hm. kyslíku. Obsah některých heteroatomů v konkrétních druzích ropy uvádí následující tabulka:

Tabulka č. 3: Hustota vybraných druhů ropy při 15 °C a obsah některých příměsí

Druh ropy	Země původu	Hustota [kg.m ⁻³]	Síra [% hm]	Dusík [% hm]	Vanad [mg/kg]	Nikl [mg/kg]
Saharan blend	Alžírsko	798	0,12	0,03	0,1	0,1
Brega	Libye	825	0,20	0,04	1,0	4,0
Oseberg blend	Norsko	847	0,25	0,13	1,6	0,8
REB	Rusko	866	1,55	0,18	38	12
Arabian medium	Saud. Arábie	878	2,5	0,13	30	13
Souedieh	Sýrie	909	4,1	0,32	97	32
Maya	Mexiko	920	3,4	0,37	275	52

Zdroj: Blažek, J., Rábl, V. (2006): Základy zpracování a využití ropy, skripta VŠCHT. [14]

Ropa však není využívána do technologických postupů v surovém stavu, neboť směs uhlovodíků, ze kterých se skládá, a jejich vlastností je značně heterogenní. K tomu je ještě potřeba uvažovat nečistoty v podobě rozpuštěných látek a příměsí nerozpuštěných, např. vody a písku. Proto se provádí její čištění a frakční destilace, ze které se již získávají suroviny potřebné pro veškerý průmysl včetně energetiky. Hrubé členění frakcí a jejich základní vlastnosti, tedy teplotní rozmezí varu a délku řetězců, uvádí Tabulka č. 4:

Tabulka č. 4: Frakce získané destilací ropy, jejich přibližné destilační rozmezí a obsažené n-alkany

Frakce	Teplota varu [°C]	Délka obsažených alkanů
Plynné uhlovodíky	< 5	C1 – C4
Lehký benzín	30 – 85	C5 – C6
Těžký benzín	85 – 180	C7 – C10
Petrolej	180 – 270	C11 – C15
Plynový olej	270 – 370	C16 – C22
Vakuové destiláty	370 – 550	C22 – C45
Vakuový zbytek	> 550	> C45

Zdroj: Blažek, J., Rábl, V. (2006): Základy zpracování a využití ropy, skripta VŠCHT. [14]

2.2.2. Historie využití

První zmínky o využití ropy a ropných produktů spadají do období třetího tisíciletí před naším letopočtem do oblasti blízkého středního východu, hlavně oblasti babylónské civilizace [16]. Zde byl především ve stavebnictví využíván asfalt, který se nacházel v povrchových depresích po výronu ropy a odpaření snadno těkavých složek, jak popisuje

Petránek [7]. Odtud se používání těchto surovin resp. materiálů rozšířilo do Egyptské a antické Řecké a Římské civilizace.

Jako první doložený energetický význam a zároveň zřejmě i první podpovrchová těžba se uvádí stará Čína, období Wei Jin (r. 220 – 589 n. l.) [18]. Zde a také v Japonsku, byla ropa používána jako zdroj světla a tepelné energie pro vytápění nebo odpařování slané vody a produkci soli. Další významnou kulturou využívající ropu byla civilizace perská, kdy došlo zřejmě i k první destilaci, provedené alchymistou Muhammadem ibn Zakariya Rázím v 9. století. [15]. Poté se využití ropných produktů rozšířilo po perském a arabském světě, hlavně ve formě kerosenu, používaného do olejových lamp, využívajících tepelnou energii a světlo při spalování. Od této doby byla ropa využívána podobným způsobem, až do 19. století a vynálezu spalovacího motoru.

2.3. Zemní plyn

2.3.1. Charakteristika

Zemní plyn je třetí ze zde uvedených fosilních zdrojů. Proces jeho geneze je velmi podobný procesu vzniku ropy, v mnoha případech je s ním dokonce přímo spojený. [7][19] Při transformaci organické hmoty pozůstalé po odumřelých planktonních organismech za redukčního prostředí, tedy bez přístupu vzduchu, vzniká nejprve tzn. sapropel, který lze popsat jako bahno z organické hmoty, a z něj se posléze za vyššího tlaku a teploty uvolňují delší či kratší řetězce uhlovodíků. [21] Složky zemního plynu jsou potom parafíny (alkany), tedy nasycené nerozvětvené řetězce C1 – C4 s obecným vzorcem C_nH_{2n+2} . [20] V závislosti na plynových ložiscích, resp. složení původních organismů, minerálním složení okolní horniny apod. bývají v zemním plynu příměsi jako vodík (H_2), dusík (N_2), oxid uhličitý (CO_2), sulfan (H_2S), helium (He) apod. Následující tabulka ukazuje flexibilitu složení zemního plynu z několika ložisek v Austrálii:

Tabulka č. 5: Složení zemního plynu z některých ložisek v Austrálii

Složky (údaje v %)	Longford-Melbourne	Moomba - Sydney	Roma - Brisbane	Denison Trough	Dampier - Perth	Dongara - Perth	Amadeus - Darwin
Metan	90.1	89.9	88.8	90.8	83.9	91.1	75.7
Etan	5.8	7.2	6.5	3.2	7.2	2.9	10.7
Propan	1.1	0.1	1.5	1.0	3.1	0.9	3.3
Butan	0.2	0.0	0.5	0.2	1.0	0.3	1.1
Pentan	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3
Delší řetězce	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1
Dusík	0.8	1.1	1.2	2.8	2.5	1.5	8.6
CO_2	1.9	1.6	1.8	1.5	2.3	3.0	0.0
Jiné	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
HHV [MJ/m^3]	39.3	38.9	40.1	38.3	40.8	38.0	40.7

Zdroj: DICKS, A. (2009): Impact of Australian natural gas and coal bed methane composition on PEM fuel cell performance [22]

2.3.2. Historie využití

Využití zemního plynu sahá přibližně do stejného období jako využití ropy a jejích produktů. První objevy úniků z ložisek se datují do období 6000 – 2000 let před naším letopočtem a lokalizují do oblasti středního východu, resp. okolí města Baku, dnešního Azerbajdžánu. Plyn, nejprve zřejmě zapálený bleskem, se stal objektem uctívání některých náboženství z kultury starých Peršanů. Další zmínky pocházejí také ze staré Číny okolo roku 900

př. n. l. První hlubinná těžba je zdokumentována také z Číny kolem roku 211 n. l. (období Wei Jin), kdy podzemní vrt dosáhl hloubky 150 m. Plyn byl poté Číňany využíván obdobně jako ropa (viz kapitola 2.2.2) na vysoušení kamenné soli, příp. mořské vody z důvodu produkce soli.

V Evropě byl zemní plyn poprvé objeven r. 1659 ve Velké Británii, ale nerozšířilo se jeho používání kvůli plynu získávanému z uhlí při výrobě koksu. První využití zemního plynu se tak přesouvá do 19. století, přesně rok 1821 do Spojených států amerických do obce Fredonia ve státě New York, kde byl distribuován úzkými olověnými trubkami ke spotřebitelům na svícení a vaření. Až do konce 19. století však zůstávalo využití zemního plynu pouze lokální záležitostí kvůli nemožnosti jeho transportu. V roce 1890 však došlo v této oblasti k zásadnímu objevu nepropustných trubkových spojů, avšak kvůli materiálovým a konstrukčním technologiím se nedosahovalo rozvodu na delší vzdálenosti, než zhruba 160 km. Do druhé světové války se však rádius plynovodů zdvojnásobil a také průměr potrubí, který byl nejprve 51 cm se zvětšil u páteřních plynovodů na 142 cm. Stavbou těchto velkokapacitních plynovodů pak začíná masová těžba a využití zemního plynu.

3. Moderní technologie

Podle spotřeby fosilních energetických surovin nastíněné v kapitole 1 a podle podílu energetiky na této spotřebě existuje opodstatněný důvod ke zlepšování technologií přednostně při výrobě energie. Proto je tato práce zaměřená právě na technologie zvyšující účinnost v tomto procesu. V současné době existuje v této oblasti několik trendů. Kromě inovace technologií jednotlivých dílčích součástí výroby energie, např. u spalovacího procesu zlepšení hoření úpravou kotle nebo optimalizací paliva, u přenosu tepla parním okruhem na turbínu využití Kalinova cyklu apod., existují také komplexnější řešení za využití těchto dílčích vylepšení. Za nejvýznamnější z nich lze považovat:

- paroplynový cyklus, při kterém je generátor poháněn spalným plynem i parou,
- spalování v tlakovém fluidním loži (PFBC),
- kombinovaný cyklus s integrovaným zplyňováním (IGCC) a
- kogenerační technologii pro současnou výrobu elektrické a tepelné energie.

3.1. Inovace dílčích technologií

3.1.1. Plynová turbina (spalovací)

Metodika dokumentů BREF [23] upravuje parametry a využití systémů plynových turbin, které se provozují podobným způsobem jako systémy parních turbin, pouze s rozdílem, že k otáčení lopatek se místo páry používají spalné plyny. Kromě generátoru elektřiny pohání turbina také rotující kompresor ke stlačování vzduchu, který se potom mísí ve spalovací komoře buď s plynem nebo s kapalným palivem. Většího stlačení, vyšší teploty a účinnosti lze potom dosáhnout v plynové turbíně. Plyny vypouštěné z turbíny emitují do atmosféry. Na rozdíl od systému parní turbíny nemají systémy plynových turbin kotle nebo dodávku páry, kondenzátory (výměníky) nebo systém zneškodňování odpadního tepla. Proto jsou investiční náklady na systém plynové turbíny mnohem nižší než na systém parní. U zařízení na výrobu elektřiny se plynových turbin používá běžně při špičkových potřebách, kde je zapotřebí rychlého najezení a krátkého provozu. Plynové turbíny se oproti topeništi provozují za zvýšeného tlaku a mohou se v nich použít přímo pouze čistá paliva, hlavně zemní plyn často s motorovou naftou jako zálohou. Popelnatá paliva potřebují po shoření a expanzi plynu ještě systémy na čištění spalin.

Plynová turbina se v zásadě skládá ze tří prvků: kompresoru, spalovací komory a expanzní turbíny. Vzduch z okolního prostředí se nasává do kompresoru systémem přívodu filtrovaného vzduchu a potom se u leteckého typu nebo ve větších průmyslových plynových turbínách stlačuje na tlak mezi 10 až 30 bary.

Plynové turbíny se projektují o jedné nebo dvou hřídelích. Jednohřídelové plynové turbíny mají jednu nepřerušovanou hřídel a proto mají všechny stupně stejné otáčky. Tyto jednotky jsou většinou vhodné k pohonu elektrického generátoru, kde se pracuje při konstantních otáčkách (kolísání rychlosti je nežádoucí). Ve dvouhřídelové plynové turbíně je nízkotlaká část turbíny oddělena od vysokotlaké části, která pohání kompresor. Nízkotlaká turbina je schopna provozu v širokém rozmezí otáček a tím pádem se ideálně hodí pro zařízení s proměnnými otáčkami. Tato charakteristika je však v elektrárnách méně důležitá, protože generátor má během běžného provozu konstantní rychlost navazující na frekvenci sítě.

3.1.2. Kalinův cyklus

Nezávisle na typu spalování, zejména však při najíždění kotlů na tuhá paliva, dochází při nižších teplotách v této první fázi ke ztrátám kvůli pomalejšímu ohřevu pracovního média a z paliva uvolněná energie se označuje jako tzv. nízkoteplotní odpadní teplo [25]. To je způsobeno závislostí Carnotova cyklu, kdy maximální efektivita každého tepelného stroje je

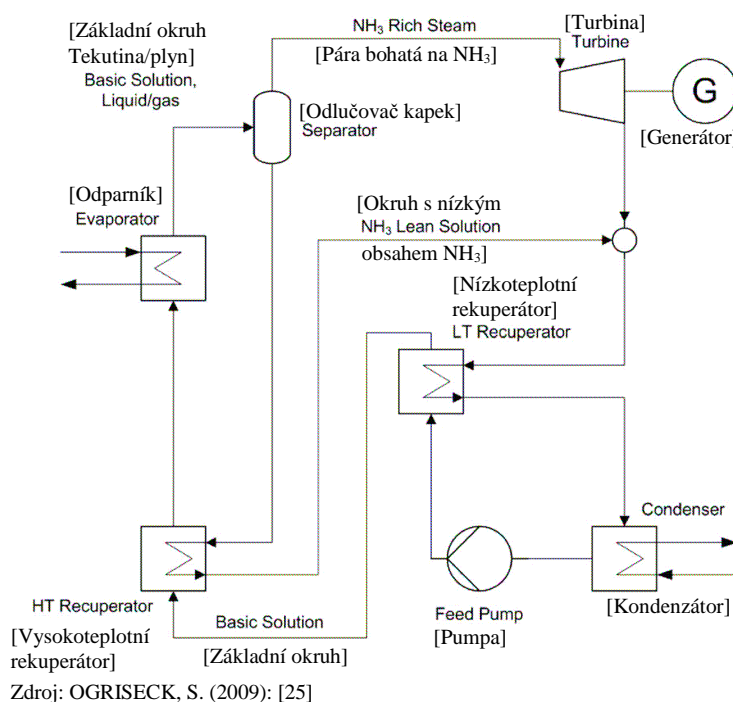
funkcí pouze teploty teplejšího a studenějšího zásobníku, mezi kterými se koná práce. Matematicky vyjádřeno je to rovnicí:

$$(2) \quad \eta = 1 - \frac{T_s}{T_t} = \frac{\Delta T}{T_t},$$

kdy η je maximální účinnost tepelného stroje, T_s teplota chladnějšího zásobníku v K a T_t teplota zásobníku teplejšího v K. ΔT je potom absolutní rozdíl těchto hodnot.

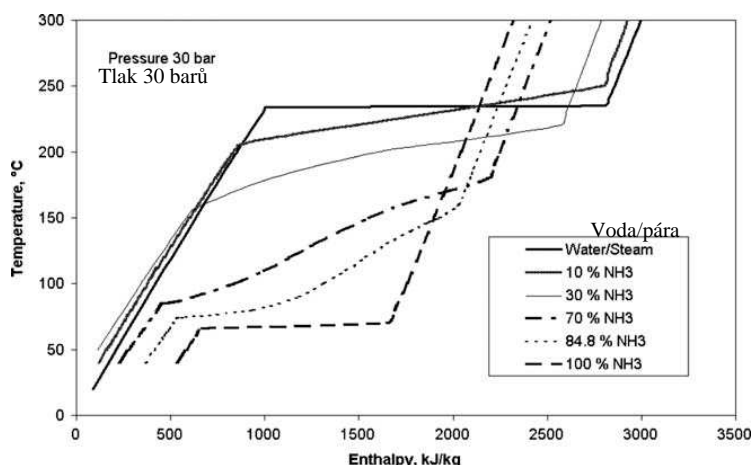
Kalinovo vylepšení pracovního cyklu parní turbíny spočívá ve smísení vody s amoniakem (NH_3), který má teplotu varu za standardních podmínek $-33,34 \text{ }^\circ\text{C}$. Tato směs má tedy proměnlivou teplotu varu a kondenzace. Během odpařování se tak stále mění koncentrace roztoku, protože amoniak s nižší teplotou tání přechází do plynného skupenství přednostně. Se zvyšující se teplotou potom přibývá i vodní páry. Obrázek č. 1 potom ukazuje schematický diagram Kalinova cyklu s dalším zlepšením v podobě rekuperátorů tepla. Cyklus tedy začíná odpařením kapaliny (Evaporator), která je přes odlučovač kapek (Separator) přivedena k turbíně (Turbine). Molekulová hmotnost amoniaku ($M_r(\text{NH}_3) = 17 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$) je podobná molekulové hmotnosti vody ($M_r(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$), a proto lze pro tuto směs použít normální turbínu se zpětným tlakem. Z ní jde pára do kondenzátoru (Condenser), kde odevzdá zbytek latentního tepla chladící kapalině a zkondenzuje. Před tím však ještě předá část své vnitřní reziduální energie ve formě tepla již zkondenzované tekutině v nízkoteplotním rekuperátoru (LT Recuperator). Z něj jde pracovní tekutina přes vysokoteplotní rekuperátor (HT Recuperator), kde je jí opět dodána tepelná energie, v tomto případě z páry z vody odloučené v odlučovači, do odparníku, do kterého je přivedeno teplo z kotle, a tím je okruh uzavřen.

Obrázek č. 1: Schematický diagram Kalinova cyklu



Kalinův cyklus je možné přizpůsobovat různým podmínkám změnou poměru složek voda - amoniak. Větší množství čpavku je výhodnější při nižších teplotách ohřevu, avšak se zvyšující se koncentrací klesá specifická entalpie páry a tedy i výkon turbíny při vyšších teplotách oproti vodě. Obrázek č. 2 ukazuje průběh specifické entalpie páry z různě koncentrovaných směsí voda – amoniak při tlaku 30 barů.

Obrázek č. 2: Srovnání varu čisté vody a různými směsmi voda – amoniak při 30 barech



Hlavní výhody Kalinova cyklu tedy jsou především:

- nízké náklady na zavedení technologie, neboť ho lze využívat s konvenčními turbinami bez dalších zvláštních úprav,
- u kapalin s nižší teplotou varu se dosáhne většího tlaku na turbině při nižší hmotnosti pracovní látky (snížení nákladů provozu),
- použití amoniaku umožňuje využít nízkoteplotní odpadní teplo, které by bylo jinak bez užítku ztraceno chladící kapalinou,
- náklady na přídavnou látku, tedy amoniak jsou nízké, případně
- snadná manipulace s amoniakem a jeho ověřené použití v průmyslu.

3.2. Paroplynový cyklus (CCGT)

Dnes při výrobě elektřiny tvoří elektrárny s kombinovanými cykly (paroplynové elektrárny) asi polovinu nového instalovaného výkonu. [23] U těchto zařízení se k výrobě elektřiny spojuje plynová (spalovací) turbina s turbinou parní. Z důvodů technických i ekonomických se v praxi pro paroplynové elektrárny používají paliva jako je zemní plyn a jako záložní palivo lehký topný olej.

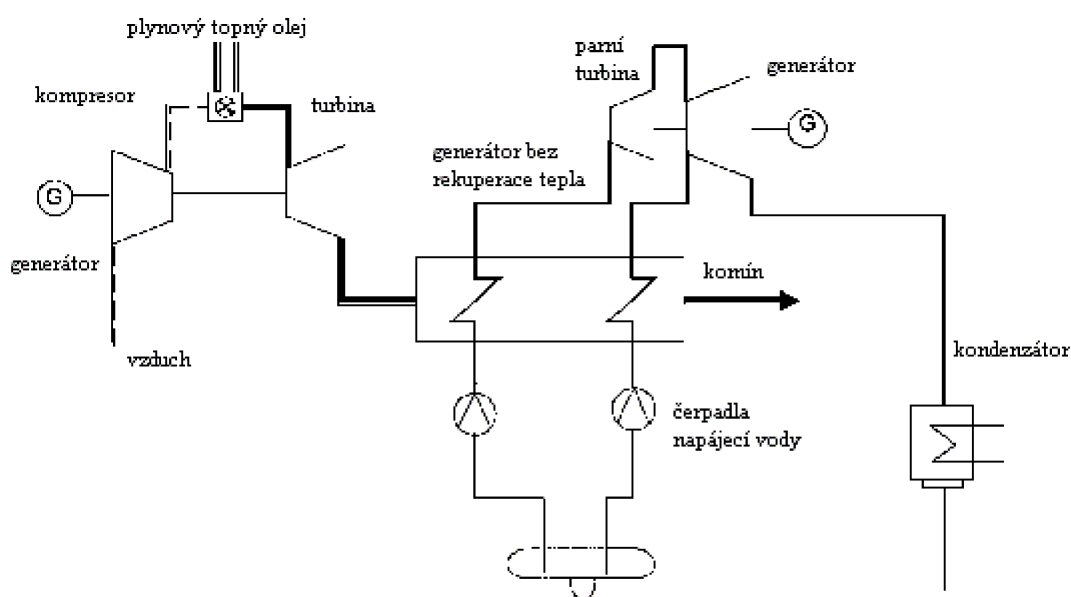
U paroplynových elektráren vyrábějí plynové turbíny elektřinu s účinností asi 33 - 38 %. Spaliny z plynové turbíny mají obvykle teplotu 430 - 630 °C v závislosti na typu turbíny a na podmínkách okolního prostředí. Tento horký plyn se vede do spalínového kotle, kde se ho používá k výrobě páry, která potom expanduje v parní turbíně elektrárny v zásadě podobným způsobem jako u kondenzační elektrárny. Velkou výhodou paroplynové elektrárny je nízká měrná spotřeba tepla a nízké investiční náklady, takže je konkurenceschopná navzdory vysokým nákladům na palivo, tj. zemní plyn. V minulých 20 letech se měrná spotřeba tepla paroplynových cyklů snížila z 2,2 na 1,7, tj. účinnost cyklu vztažená na výhřevnost vzrostla ze 45 na 58 %. Plynové turbíny se v současné době stále ještě rychle vyvíjejí a je možné, že se u nich v blízké budoucnosti dosáhne měrné spotřeby tepla pod 1,67 (účinnosti nad 60 %). V dnešních zařízeních s paroplynovým cyklem pochází asi 2/3 výkonu z plynové turbíny a zbývající 1/3 z parní turbíny.

Protože se při spalování ve spalovací komoře plynové turbíny spotřebuje méně než 1/3 kyslíku ze vstupního vzduchu, lze ve spalínách plynové turbíny uskutečnit přídavné spalování paliva. V moderních paroplynových technologiích to působí při bilanci výroby elektřiny lehké zvýšení měrné spotřeby tepla. U průmyslových kogenerací se přídavné spalování často používá

k regulaci množství páry vyráběné ve spalínovém kotli nezávisle na výkonu spalovací turbíny. U kogeneračních jednotek zlepšuje přídavné spalování celkovou účinností výroby tepla a elektřiny. Protože jak zemní plyn, tak lehký topný olej jsou velmi čistá paliva a umožňují ve spalovací komoře plynové turbíny prakticky dokonalé spalování, nejsou u zařízení kombinovaných cyklů s plynovou turbínou problémy s popelem, spódiem nebo SO₂. Problém je pouze s tvorbou NO_x, která se u moderních zařízení redukuje za použití speciálních nízkoemisních hořáků a někdy se k paroplynovému cyklu připojuje selektivní katalytická redukce. U starších hořáků se může NO_x snižovat nástřikem vody nebo páry do hořáků, ale to zvyšuje měrnou spotřebu tepla.

Na následujícím obrázku je schematicky znázorněn okruh v elektrárně s paroplynovým kombinovaným cyklem a parním generátorem bez přídavného spalování. Při tomto procesu se palivo zavádí výhradně do spalovací komory a k žádnému přídavnému spalování ve spalínovém kotli nedochází. Pára vyrobená spalínovým kotlem z tepelné energie obsažené ve spalínách plynové turbíny se dále využívá při výrobě elektřiny prostřednictvím parní turbíny. Tento typ kombinovaného cyklu dosahuje až 58,5 % účinnosti. Obvykle využívaným palivem je zemní plyn nebo lehký topný olej, ale lze také využít uhlí ve zplyňovacím zařízení, které je třeba postavit před plynovou turbínu (viz kapitola 3.4 – Integrované zplyňování a technologie IGCC).

Obrázek č. 3: Schéma paroplynového kombinovaného cyklu s parním generátorem bez přídavného spalování



Zdroj: EUROPIEN COMMISSION (2009): Large combustion plants; [23]

3.3. Spalování v tlakovém fluidním loži (PFBC)

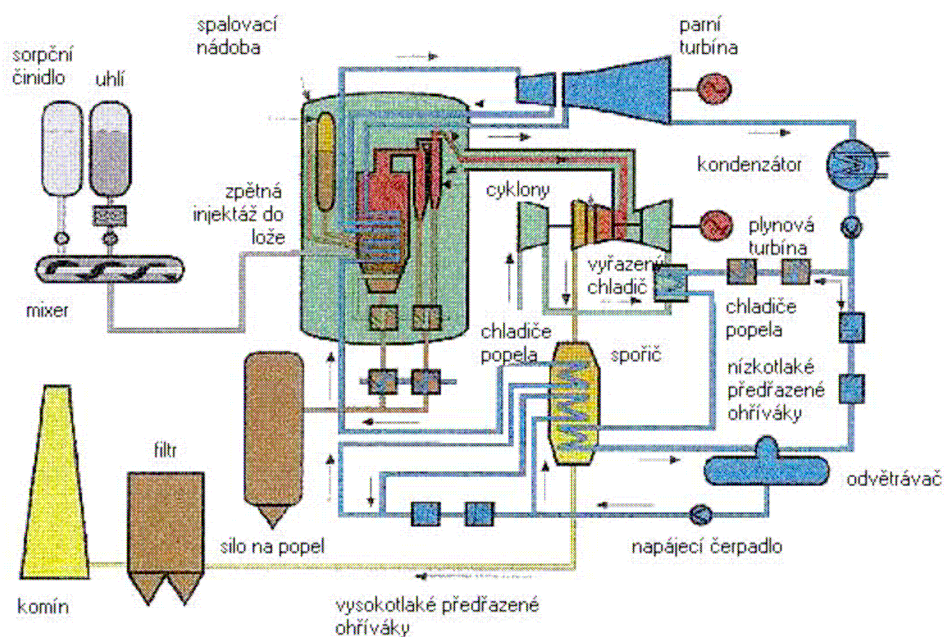
Rozvoj spalování v tlakovém fluidním loži (PFBC), založený na zkušenostech získaných se systémy spalování ve fluidním loži za atmosférického tlaku, začal uprostřed 70. let. [23] Systémy tlakového fluidního lože nabízejí výhodu zařízení o menší velikosti, ale stejného výkonu, což znamená snížené investiční náklady a srovnatelně nízké emise bez potřeby sekundárního opatření k jejich snižování a vše o srovnatelné tepelné účinnosti nebo lehce vyšší než je u konvenčních zařízení spalujících uhlí. Protože je teplota spalování nižší, netvoří se žádné tepelné NO_x a palivové NO_x se mohou během spalování snížit zavedením čpavku do volného prostoru nebo před plynovou turbínu. V případě spalování ve fluidním loži za atmosférického tlaku je možné rozlišovat mezi systémy se stacionárním ložem a cirkulujícím fluidním ložem. V současné době jsou všechna zařízení s tepelnou kapacitou přesahující

50 MW_{el.} systémy se stacionárním fluidním ložem, ale rozvíjí se i příprava systémů s cirkulujícím fluidním ložem.

Hlavními součástmi tlakového systému spalování ve fluidním loži jsou:

- příprava uhlí a úsek manipulace,
- tlakový kotel se stacionárním nebo cirkulujícím fluidním ložem,
- sekce čištění horkého plynu za využití keramických svíčkových filtrů či cyklonů,
- plynová turbína a
- okruh pára/voda u parní turbíny.

Obrázek č. 4: Schéma stacionárního lože u PFBC



Zdroj: RENTZ, O., NUNGE, S. (1999):[26]

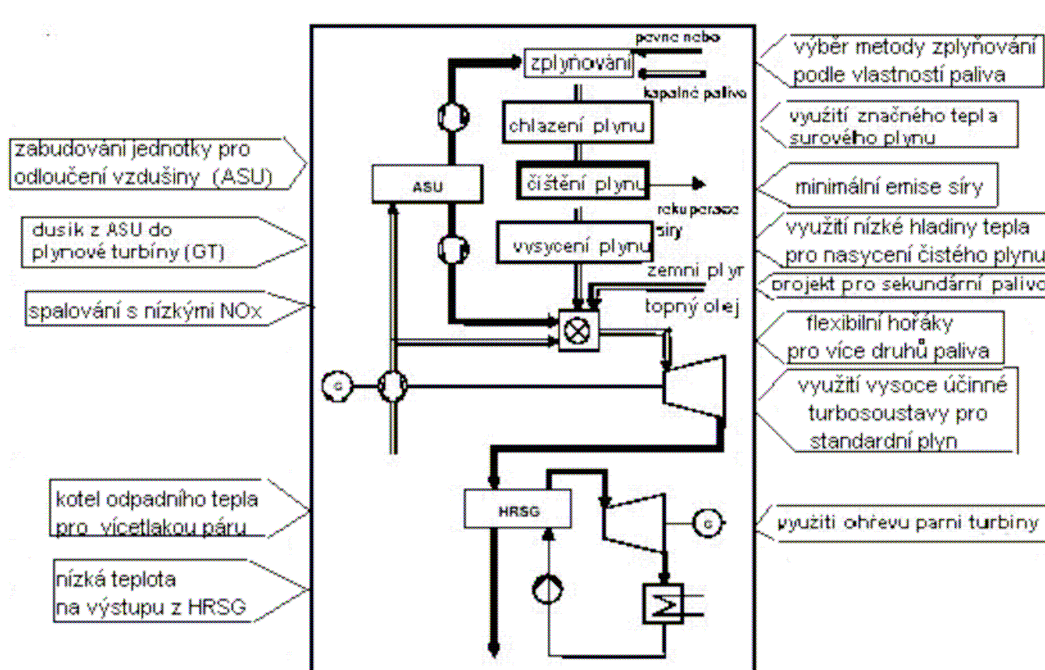
Při přípravě se uhlí nejprve rozdrtí v mlýnech na velikost částic v průměru 1000 μm (pro stacionární fluidní lože) nebo 100 – 1000 μm (pro cirkulující fluidní lože). Menší částice mohou být vyneseny z lože, větší částice přispívají ke spékání a většímu podílu popela. Maximální velikost zrn je 3 – 20 mm. Po nadrcení se uhlí smísí s vápencem (CaCO_3) nebo dolomitem ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Směs je poté dopravena pneumatickým systémem nebo přetlakovým kalovým čerpadlem ke spalovacímu zařízení, do kterého se dostává řadou nástřikových míst. Spalovací vzduch, který je předem stlačen za použití kompresoru plynové turbíny, přechází do zádržné nádoby spalovacího zařízení vnějším okruhem, přičemž spalné plyny jdou do turbíny středním průchodem. Spalování uvnitř tlakové nádoby probíhá při teplotě 850 – 900 $^{\circ}\text{C}$ a tlaku cca 1,6 MPa. Ve spalovací komoře jsou ještě zapuštěny tepelné výměníky, které umožňují udržet stálou teplotu spalování a přitom ještě produkují vysokotlakou páru na pohon parní turbíny. Horké spalné plyny jsou nejprve vyčištěny pomocí keramických svíčkových filtrů nebo cyklonů a z nich jdou již do plynové turbíny, kde vyrábějí další elektřinu. Plyny vystupující z turbíny ještě ohřívají vodu v parním cyklu před vstupem do odparníků ve fluidním kotli čímž předávají ještě zbytek energie před jejich filtrací a výpustí komínem do atmosféry. V některých případech, pokud myjí plyny nižší teplotu, je možné je přehřívát plynovými hořáky na syngas nebo zemní plyn.

V současnosti jsou schopné tyto systémy dosáhnout tepelné účinnosti až 45 %. Z toho parní turbina vytváří přibližně 80 % energie. Díky nižším teplotám jsou však omezená další zlepšení na základě Carnotova cyklu, avšak v kombinaci např. s Kalinovým cyklem by dalšího zvýšení bylo možné dosáhnout.

3.4. Kombinovaný cyklus s integrovaným zplyňováním (IGCC)

Tato technologie při výrobě energie spojuje zplyňování s čištěním plynu, konverzi syntetického plynu a technologii výroby energie v turbíně, což dohromady poskytuje ucelenější využití energetických zdrojů a nabízí vysokou účinnost a nízkou míru znečištění. Navíc může být výstup z této technologie zaměřený podle požadavků trhu – zplyněním je možné získat, kromě elektřiny a páry z kombinovaného cyklu také velice čisté chemické látky jako vodík, redukovanou síru, příp. i další látky, jejichž obsah a množství jsou závislé na složení vsázky. V rámci systému je potom k dispozici mnoho možností volby typu zplyňovacího zařízení, mj. systém mokrého nebo suchého zavážení uhlí, dmýchání vzduchu nebo kyslíku, pevné lože atd. Obrázek č. 5 poté ukazuje hlavní části systému s dmýcháním kyslíku.

Obrázek č. 5: Hlavní části systému IGCC s dmýcháním kyslíku



Zdroj: SIEMENS (1999), [29]

Zplyňovací zařízení přeměňuje sloučeniny uhlíku ze vsázky na plynné složky teplem za zvýšeného tlaku a v redukčním prostředí, resp. za přítomnosti páry. Injektáží kyslíku přitom dochází k exotermní reakci a z ní uvolněným teplem a zvýšeným tlakem dochází k rozrušování vazeb mezi složkami paliva a tím se produkuje syngas. Nezplynitelné minerály potom opouštějí dno zařízení ve formě nereaktivní sklovité strusky, příp. jiných dále využitelných materiálů. Základní obecné chemické rovnice podle Pérez-Fortesové [28] jsou ukázány na listu Příloha č. 9.

Další látkou, kterou je výhodnější využít v průmyslu, než ho i přes tepelný výtěžek spálit, je v redukčním prostředí vzniklý sulfan (H_2S). Ten lze odloučit během čištění plynu před jeho energetickým využitím a snížit tak riziko koroze kovových systémů, resp. minimalizovat investiční náklady potřebné na systém z odolných materiálů. Další významnou výhodou tohoto procesu je redukce obsahu oxidů síry ve spalném plynu, které je vyžadováno na základě mezinárodní konvence CLRTAP (Úmluva o dálkovém znečišťování ovzduší přesahujícím hranice států), ke které Česká republika přistoupila 1. 1. 1993. [30] Síru ze spalin lze jinak čistit také přidáním mletého vápence ($CaCO_3$) do vsázky, a to dle dokumentů BREF [23] hlavně

u technologií spalování ve fluidním loži, nebo u kotlů na práškové uhlí v plynových odlučovačích za účasti vápence a vodní páry, ale až po pracovním cyklu spalných plynů. V prvním případě vzniká inertní struskový materiál, druhou, avšak energeticky náročnější technologií, dále využitelný sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). K dalším látkám, které lze účinněji odstranit před vlastním spalováním, patří např. amoniak (NH_3) nebo kyanovodík (HCN).

Velkou pozornost směřující k technologii IGCC vyvolává v poslední době sílící obava z globálního oteplování, které je podle některých odborníků způsobeno produkcí CO_2 ze spalovacích, zejména energetických procesů. Jako jeden z prvků technologie IGCC je možné využít tzv. CCS systémů, tedy systémů na zachycování a ukládání uhlíku (z angl. Carbon Capture and Storage). Jak na několika příkladech ukazuje Chen a Rubin [31], existuje v této oblasti několik technologií lišících se efektivitou jak energetickou, tak vyjádřenou ve finálních ukazatelích. Autoři porovnávali v případové studii v rámci konkrétního IGCC provozu různé typy paliv, od nízkoenergetického lignitu ($\text{HHV} = 13993 \text{ kJ/kg}$) až po bituminózní černé uhlí ($\text{HHV} = 30882 \text{ kJ/kg}$) a také dvě technologická vylepšení.

První srovnání proběhlo na modelové elektrárně s parametry, které ukazuje následující tabulka:

Tabulka č. 6: Parametry modelové elektrárny se systémem IGCC pro testování výkonových ukazatelů

Parametr	Hodnota
Referenční typ paliva	Uhlí typu Pittsburgh č.8
Zplyňovací systém	s mokrou závázkou od GE*
Teplota a tlak při zplyňování	1343 °C, 4,24 MPa
Počet zplyňovacích zařízení	2 provozní, 1 záložní
Čistota kyslíku po odloučení	95 %
Plynové turbíny	2x GE 7FA
Okolní teplota a tlak	15 °C, 0,101 MPa
Parní okruh	9,65 MPa, 538 °C
Tlak kondenzátoru	0,0046 MPa
Efektivita redukce síry ze syngasu	99 %
Efektivita zachycování CO_2	90 %
Tlak CO_2 po zachycení	14,5 MPa
* - výrobce General Electrics	

Zdroj: CHEN, Ch., RUBIN, E. (2008); [31]

Základní výkonové údaje jsou potom v další tabulce:

Tabulka č. 7: Porovnání výkonových údajů pro modelovou elektrárnu se systémem IGCC s a bez použití CCS

Typ elektrárny	Čistý výkon [MW]	Tepelná efektivita (HHV) [%]	Emise CO ₂ [kg/kWh]
Modelová bez CCS	538	38,1	0,819
Modelová s CCS (90 % zachycení CO ₂)	495	32,9	0,094
Změna [%]	- 8,0 %	- 13,7 %	- 88,5 %

Zdroj: CHEN, Ch., RUBIN, E. (2008); [31]

Již pro základní palivo, pro které je toto zařízení optimalizováno, je zřejmé, že pouze vlastní odloučení CO₂ technologií CCS sníží výkon elektrárny o 8 % snížením tepelné efektivitivy z 38,1 na 32,9 %. Celková kapacita těchto elektráren by tedy měla být v případě zachytávání CO₂ o těchto 8 % vyšší a tím tedy i spotřeba uhlí. Nicméně lze říci, že základní problém diskutované globální změny je snížením emisí CO₂ o 88,5 % z velké části vyřešen.

Další testování probíhalo s různými palivy. Podle Pérez-Fortesové [28] je v rámci IGCC možné efektivně využívat různé typy paliv – od fosilních (rašelina, uhlí, zbytky po frakční destilaci ropy atd.), přes organické zbytky, biomasu apod. až po běžný komunální odpad. Chen a Rubin [31] se zabývají pouze čtyřmi typy uhlí, avšak jejich výsledky lze, alespoň obecně, vztáhnout na většinu prvotních i druhotných surovin. Autoři porovnávají v modelovém IGCC-provozu s parametry uvedenými v předchozích dvou tabulkách (Tabulka č. 6 a Tabulka č. 7) další tři typy uhlí se základním palivem. Jejich parametry uvádí následující tabulka:

Tabulka č. 8: Typy uhlí použité při testování účinnosti modelového provozu IGCC a jejich parametry

Typové označení	Pittsburgh č. 8*	Illinois č. 6	Wyoming PRB	ND Lignit
Parametry				
Typ uhlí	černé	černé	sub-bituminózní**	lignit
HHV [kJ/kg]	30822	25336	19386	13993
Vlhkost [%]	5,05	13,00	30,24	33,03
Popeloviny [%]	7,24	11,00	5,32	15,92
Uhlík [%]	73,81	61,20	48,18	35,04
Vodík [%]	4,88	4,20	3,31	2,68
Dusík [%]	1,42	1,16	0,70	0,77
Kyslík [%]	5,41	6,02	11,87	11,31
Síra [%]	2,13	3,25	0,37	1,16
Chlor [%]	0,06	0,17	0,01	0,09
Cena [\$/t]	43,2	35,4	9,2	12,5
Cena [\$/GJ]	1,40	1,39	0,48	0,89
Celkový obsah vody v zavážce [%]	34	37	44	55
* - základní palivo; ** - dle parametrů odpovídá typu Lesklé hnědé uhlí nebo Pálavé černé uhlí dle [7]				

Zdroj: CHEN, Ch., RUBIN, E. (2008); [31]

Výsledkem testování je porovnání tří hlavních parametrů, a to:

- spotřeba tepla na jednotku vyrobené energie (kJ/kWh),
- tepelná efektivita a
- efektivita zplynění.

Ve všech třech sledovaných parametrech bylo pro poměrné srovnání jako základ stanoveno základní palivo, tedy 'Pittsburgh č. 8', a z porovnání vyšlo zároveň jako nejvhodnější. Nejhorší je u této technologie 'ND Lignit', zejména kvůli nízké efektivitě zplyňování a potřebě zvýšeného množství kyslíku potřebného pro udržení požadované teploty ve zplyňovacím procesu. Toto je způsobeno obsahem nežádoucích příměsí, zejména vlhkosti (33,03 %) a popelovin (15,92 %). Spotřeba tepla na jednotku vyrobené energie je potom o 37 % vyšší než u základního paliva, a tepelná efektivita i efektivita zplynění téměř o 30 % nižší. Avšak sami autoři uvádějí, že při jiném nastavení zplyňovacího procesu, např. u systému se suchou zavázkou, může být výkon o mnoho vyšší i ze surovin s horší kvalitou.

Další testovanou vlastností byla efektivita zachytávání CO₂ pomocí technologie CCS a její porovnání s provozem bez zachytávání CO₂ při využití dvou nových technologických zlepšení, a to:

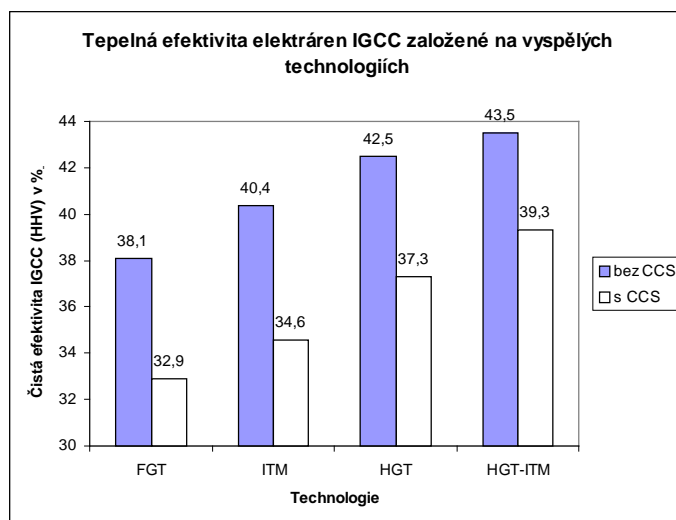
- iontová transportní membrána (ITM) v plynovém odlučovači (ASU) a
- skládaná plynová turbína (H-frame gas turbine, HGT),

se kterými byly zkoumány 4 provozy v uspořádání technologií:

1. standardní plynová turbína bez ITM (FGT, ASU s kryogenní technologií),
2. standardní plynová turbína s ITM (ITM),
3. skládaná plynová turbína bez ITM (HGT),
4. skládaná plynová turbína s ITM (HGT-ITM),

dále ještě členěné na systém s CCS a bez CCS. Z výsledků pokusu vyplynulo, že u systémů bez zachytávání energie lze výše uvedenými zlepšeními zvýšit čistou efektivitu IGCC-provozu bez technologie CCS z původních 38,1 % (viz Tabulka č. 7) až na 43,5 % a s technologií CCS z 32,9 % až na 39,3 % HHV. Podrobnější členění ukazuje Obrázek č. 6, na němž je graf ukazující čistou účinnost systému IGCC při použití jednotlivých technologií.

Obrázek č. 6: Graf účinností systémů IGCC s novými technologiemi



Zdroj: CHEN, Ch., RUBIN, E. (2008); [31]

3.5. Kogenerace

Tato technologie využívá jediného pochodu jak k výrobě elektřiny tak využitelného tepla. Kogenerace neboli „kombinovaná výroba tepla a elektřiny“ (CHP) je odzkoušenou technologií a uplatňuje se hlavně u průmyslových zařízení, kde je zapotřebí jak elektřiny, tak tepla (horké vody nebo páry), nebo při vytápění obytných zón a sídelních celků v blízkosti těchto energetických zdrojů. Mimo úspor nákladů přináší kogenerace také přínosy pro životní prostředí, neboť využívá fosilních paliv účinněji. To vede k nižším emisím, než u oddělených výrob elektřiny a také k optimalizaci účinnosti paliva a části energie tzv. exergie.

Parní turbíny poháněné kotli na fosilní palivo se využívají pro průmyslové systémy kogenerace již po mnoho let. Vysokotlaká pára, která se vytvořila v konvenčním kotli na černé nebo hnědé uhlí expanduje v turbině za tvorby mechanické energie, která se potom může použít k pohonu elektrického generátoru. Množství vyrobené elektřiny závisí na tom, do jaké míry se může snížit tlak páry turbinou, aby byla ještě schopna vyhovět potřebám stanice na tepelnou energii. V některých případech se turbina vybavuje samostatným nebo zabudovaným nízkotlakým válcem, což umožňuje výrobu elektřiny nezávislou na dodávce tepla.

Pro nákladově účinnou výrobu tepla jsou oproti teplotě elektrárny s kondenzací ve vakuu nutné vyšší teploty. První možností je odvod páry o vyšším tlaku, což je ztrátou pro výrobu elektřiny v nízkotlaké parní turbině, ale teplota je dost vysoká na to, aby se dodávala do rozvodného systému vytápění. Další možností u kombinované výroby tepla a elektřiny je odebrat páru z nízkotlaké parní turbíny s menší ztrátou pro výrobu elektřiny. Systém zpětné kondenzace (nad 1 atmosférou) se týká vody z kondenzace páry o teplotě více než 100 °C. Běžný systém dálkového vytápění potřebuje teploty mezi 80 a 120 °C. V každém případě odvod tepla z optimalizovaného okruhu voda/pára snižuje elektrickou účinnost. Jak se množství dotčeného tepla zvyšuje, lze ztráty na elektřině použít jako využitelné teplo. Charakteristickým koeficientem pro poměr získaného rozvodného tepla ku ztrátě elektrické účinnosti je 7. Při nižších teplotách odběru se tento koeficient zvyšuje. Ale technická a zdravotní kritéria omezují nejnižší teplotu pro rozvodné systémy vytápění. Obvyklá míra zužitkování paliva je mezi 75 a 90 %, kde se v takto udávané energii spojují vysokojakostní elektřina i teplo.

Výhody kogenerace:

- vysoká celková účinnost paliva a exergie,
- může se použít jakýkoliv druh paliva,
- může kolísat poměr tepla a elektřiny,
- schopnost vyhovět požadavku na jakost tepla u více než jedné stanice,
- vysoká spolehlivost a dostupnost, obvykle lepší než 98 %,
- široký rozsah dostupných velikostí,
- dlouhá doba životnosti.

Nevýhody kogenerace:

- vysoký poměr tepla ku elektřině,
- vysoké náklady,
- pomalé najíždění.

Podle výše uvedených specifikací lze kvalifikovat kombinovanou výrobu tepla a elektřiny, která lze aplikovat téměř u všech tepelných strojů spalujících fosilní paliva, jako technologii s největším kladným dopadem na efektivitu spalování fosilních zdrojů. Výjimku použitelnosti zde tvoří stroje s přímou konverzí energie, tedy zejména plynové turbíny a motory na kapalná paliva, která však lze také technologicky uzpůsobit k produkci páry, například kombinovaným paroplynovým cyklem (viz kapitola 3.2).

4. Závěr

V předchozí kapitole je popsáno několik technologií zvyšujících účinnost procesů založených na spalování fosilních zdrojů. Vývoj těchto systémů však stále pokračuje, nelze tedy říci, že se jedná o výčet konečný. Lze však říci, že jsou zde zahrnuty technologie přinášející jedny z největších úspor díky zvyšování efektivity elektrárenských systémů.

Další otázka, která je, kromě způsobu jak ušetřit, pro dnešní lidstvo zásadní, zní: „Kolik budou tyto slevy stát?“ Ekonomické porovnání jednotlivých zlepšení, zejména náklady na investice, uvádějí některé z citovaných prací, např. [28], [31],[34] atd. a jejich další rozbor by vydal na samostatnou práci. Ve zkratce lze říci, že existují dva typy nákladů na tato vylepšení, a to náklady investiční placené předem, tzv. TCR (Total Capital Requirement), které zvyšují cenu jednotky instalovaného výkonu a na jednotku produkce se snižují s dobou využití zařízení, a vlastní provozní cena elektřiny, tzv. COE (Cost Of Electricity), která je uvedena za jednotku produkce a je potřeba ji zaplatit v každém okamžiku za každou jednotku.

Podle těchto nákladů se uvedené technologie mohou rozdělit na technologie, u kterých se uvažuje pouze investiční náročnost (TCR), např. celkové zvýšení účinnosti provozu dané výstavbou nebo přestavbou jednotlivých subsystémů, a technologie, do kterých je kromě prvotních investic (TCR) potřeba zakalkulovat i provozní náklady zvyšující COE. Takovou technologií je systém CCS z kapitoly 3.4, který kromě investice do zařízení na zachytávání CO₂ zvyšuje provozní náklady snížením celkové efektivity výroby elektřiny.

Velice zajímavou práci s ekonomickým podtextem je potom článek Whitea a Kulcinskeho [35], který porovnává základní typy výroby energie, tedy tepelné zdroje využívající uhlí, jaderný rozpad v atomových elektrárnách, jadernou fúzi a větrné elektrárny pomocí tzv. Birth to death analýzy nebo též analýzy úplného životního cyklu (LCA). V ní lze velice těžko zjistit veškeré náklady, avšak základní materiálové a energetické toky jsou v ní podchyceny, takže určitě poskytuje alespoň rámcovou představu náročnosti jednotlivých typů energetických výrob.

Základní charakteristikou této analýzy je míra energetické návratnosti - EPR (Energy payback ratio), která porovnává energii vloženou jak do celé technologie, na její výstavbu i likvidaci, tak do její údržby a provozu včetně přípravy paliva, s energií za celou dobu provozu získanou. Z tohoto pohledu vychází nejhůře fosilní energetika představovaná spalováním uhlí, jejíž EPR vychází zhruba 11, a nejlépe jaderná fúze, jejíž EPR je rovna 27. Jelikož tato technologie není ještě zcela zvládnuta pro masový provoz, jeví se jako nejekeologičtější z tohoto pohledu větrná energetika, jejíž EPR byla spočtena na 23. Další charakteristiky jsou založeny na produkci CO₂ pro jednotlivé provozy a z nich vychází nejhůře také spalování uhlí. Je potřeba zmínit, že tato práce počítá pouze s elektrickým výkonem daných zařízení a tepelné výkony neuvažuje, avšak při pohledu na podíl výkonů z kogeneračních tepláren na celkovém výkonu všech elektráren v rámci EU [32], lze tyto tepelné výkony zanedbat.

Podle údajů uvedených v úvodní kapitole je však zřejmé, že energetickou situaci lidstva je potřeba v relativně krátkém časovém úseku vyřešit, resp. komplexně přepracovat. V případě ropy a jejích produktů, jejichž zásoba byla odhadnuta přibližně na 40 let a které nezasahují pouze do energetické oblasti, ale i do přípravy materiálů, by v případě vyčerpání zásob došlo, samozřejmě za současných podmínek bez odpovídající materiálové náhrady, k vážné socioekonomické situaci. Převážná část využívané energie z tohoto zdroje je spotřebována v dopravě a proto je tedy nutné najít odpovídající energetický substituent.

Výše zmíněnou čtyřicetiletou zásobu by však bylo možné v časovém horizontu prodloužit, a to hlavně využitím jako substituentu dalších dvou zdrojů, tedy zemního plynu, jehož zásoba je odhadnuta na přibližně 60 let, a uhlí se současnými 120 lety. Při této náhradě by však bylo nutné i tyto estimace překalkulovat, resp. snížit. Zásadní myšlenkou při řešení světové energetické situace by tak stále mělo být, spíše než zvýšené využívání jaderné energetiky, případně i tzv.

alternativních nebo také čistých zdrojů, absolutní snížení energetické spotřeby, ať už v rámci nových nízkoenergetických systémů nebo opouštěním zbytečných spotřeb.

Seznam zdrojů:

- [1] BP (2010): *Statistical review of world energy*; www.bp.com; 15. 7. 2010;
- [2] ZEKAI, S. (2000): *Stochastic wind energy calculation formulation*; JOURNAL OF WIND ENGINEERING AND INDUSTRIAL AERODYNAMICS;
- [3] ČSÚ: *Statistická ročenka 2009*, oddíl 81 – Energetika; www.czso.cz; 30. 7. 2010; Příloha č. 4 – Příloha č. 8;
- [4] Pacific Northwest National Laboratory: LHV and HHV of Hydrogen and Fuels; http://hydrogen.pnl.gov/filedownloads/hydrogen/datasheets/lower_and_higher_heating_values.xls; 15. 7. 2010;
- [5] <http://www.okd.cz/cz/tezime-uhli/historie-tezby-uhli/praveky-clovek-a-uhli>; 15. 7. 2010;
- [6] SVOBODA, J. (1994): *The Pavlov site, Czech Republic – Lithic evidence from the upper paleolithic*; JOURNAL OF FIELD ARCHAEOLOGY;
- [7] PETRÁNEK, J. (1993): *Malá encyklopedie geologie*; JIH, České Budějovice;
- [8] LONGWELL, J. P., (1995): *Coal: Energy for the future*; PROGRES IN ENERGY AND COMBUSTION SCIENCE;
- [9] Geologická encyklopedie – <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie>; 15. 7. 2010;
- [10] BOLTER JR.(1994): *Parsons, Charles and electrical power generation – a turbine designers perspective*; PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART A - JOURNAL OF POWER AND ENERGY;
- [11] HE and ZHANG (2009): *Historical record of black carbon in urban soils and its environmental implications*; ENVIRONMENTAL POLLUTION;
- [12] Navrátilová, L. (2009): *Měření odraznosti vitrinitu a modelování tepelné a erozivní historie*; bakalářská práce; Masarykova Univerzita Brno, Přírodovědecká Fakulta;
- [13] SIE, T. S., KRISHNA, R. (1999): *Fundamentals and selection of advanced Fischer–Tropsch reactors*; APPLIED CATALYST A: GENERAL;
- [14] BLAŽEK, J., RÁBL, V. (2006): *Základy zpracování a využití ropy*; skripta VŠCHT;
- [15] AL-HASSANI, S. (2008): *A Shared legacy: islamic science east and west*; UNIVERSITAT DE BARCELONA; str. 63;
- [16] ENCYKLOPAEDIA BRITANNICA: *Petroleum, history of use*; 20. 7. 2010; <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/454269/petroleum/50694/History-of-use>;
- [17] ENCYKLOPAEDIA BRITANNICA: *Natural gas, history of use*; 20. 7. 2010; <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/406163/natural-gas/50586/History-of-use>;
- [18] Čínská encyklopedie; <http://czech.cri.cn/chinaabc/index.htm>; 20. 7. 2010
- [19] DANESH, A. (1998): *PVT and Phase Behaviour of Petroleum Reservoir Fluids*; ELSEVIER;
- [20] SNOWDON, L. R. (2001): *Natural gas composition in a geological environment and the implications for the processes of generation and preservation*; ORGANIC GEOCHEMISTRY;
- [21] MANGO, F. D. (1999): *The origin of light hydrocarbons*; GEOCHIMICA ET COSMOCHIMICA ACTA;
- [22] DICKS, A. (2009): *Impact of Australian natural gas and coal bed methane composition on PEM fuel cell performance*; INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY;

- [23] EUROPEAN COMMISSION (2006): *Large Combustion Plants*; IPPC BREF;
- [24] NAG, P. K., GUPTA, A. (1997): *Exergy analysis of the Kalina cycle*; APPLIED THERMAL ENGINEERING;
- [25] OGRISECK, S. (2009): *Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study*; APPLIED THERMAL ENGINEERING;
- [26] RENTZ, O., NUNGE, S. (1999): Technical background document for the actualisation and assessment of UN/ECE protocols related to the abatement of the transboundary transport of nitrogen oxides from stationary sources; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit;
- [27] ZAPOROWSKI, B. (2003): *Analysis of energy-conversion processes in gas-steam power-plants integrated with coal gasification*; APPLIED ENERGY;
- [28] PÉREZ-FORTES, M. (2009): *Conceptual model and evaluation of generated power and emissions in an IGCC plant*; ENERGY;
- [29] SIEMENS (1999): *Using refinery residues and coal in IGCC plants provides clean and efficient power*; POWER GENERATION GROUP (KWU);
- [30] UNECE – CLRTAP: <http://www.unece.org/env/lrtap/>; 20. 7. 2010;
- [31] CHEN, Ch., RUBIN, E. S. (2008): *CO₂ control technology effects on IGCC plant performance and cost*; ENERGY POLICY;
- [32] EUROSTAT (2010): *Eurostat yearbook 2009*; EUROPEAN COMMISSION;
- [33] BLAŽEK, L.(2009): *Ohřejeme se v 21. století?*; FUTURA Praha;
- [34] PEETERS, A.N.M., FAAIJ, A.P.C (2007): *Techno-economic analysis of natural gas combined cycles with post-combustion CO₂ absorption, including a detailed evaluation of the development potential*; INTERNATIONAL JOURNAL OF GREENHOUSE GAS CONTROL;
- [35] WHITE, S. W., KULCINSKI, G. L. (2000): *Birth to death analysis of the energy payback ratio and CO₂ gas emission rates from coal, fission, wind, and DT-fusion electrical power plants*; FUSION ENGINEERING AND DESIGN;

Seznam zkratek:

ASU	–	vzdušný odlučovač/separátor (Air Separation Unit)
BP	–	British Petroleum
BREF	–	referenční dokumenty o nejlepších dostupných technikách (Reference Document on Best Available Techniques)
CCGT	–	kombinovaný paroplynový cyklus (Combined cycle gas turbine)
CCS	–	zachycování a ukládání uhlíku (Carbon Capture and Storage)
CHP	–	kombinovaná produkce elektřiny a tepla (Combined Heat and Power)
CLRTAP	–	Úmluva o dálkovém znečišťování ovzduší přesahujícím hranice států
COE	–	cena elektřiny (Cost Of Electricity)
ČSÚ	–	Český statistický úřad
EPR	–	míra energetické návratnosti (Energy Payback Ratio)
FGT	–	standardní plynová turbína (GE 7FA Gas Turbine)
HGT	–	skládaná plynová turbína (H-frame Gas Turbine)
HHV	–	spalné teplo (Higher Heating Value)
HT	–	vysokoteplotní (High Temperature)
IGCC	–	kombinovaný cyklus s integrovaným zplyňováním (Integrated Gasification Combined Cycle)
IPPC	–	integrovaná prevence a omezování znečištění (Integrated Pollution Prevention and Control)
ITM	–	iontová transportní membrána (Ion Transport Membrane)
LCA	–	analýza životního cyklu (Life Cycle Assessment)
LT	–	nízkoteplotní (Lower Temperature)
PFBC	–	spalování v tlakovém fluidním loži (Presssurised fluidised bed combustion)
TCR	–	celkové kapitálové náklady (Total Capital Requirement)
VŠCHT	–	Vysoká škola chemicko-technologická

Seznam tabulek:

Tabulka č. 1: Světové zásoby a světová spotřeba některých fosilních zdrojů v roce 2009...	8
Tabulka č. 2: Základní klasifikace hnědého a černého uhlí	11
Tabulka č. 3: Hustota vybraných druhů ropy při 15 °C a obsah některých příměsí	13
Tabulka č. 4: Frakce získané destilací ropy, jejich přibližné destilační rozmezí a obsažené n-alkany.....	13
Tabulka č. 5: Složení zemního plynu z některých ložisek v Austrálii	14
Tabulka č. 6: Parametry modelové elektrárny se systémem IGCC pro testování výkonových ukazatelů	22
Tabulka č. 7: Porovnání výkonových údajů pro modelovou elektrárnu se systémem IGCC s a bez použití CCS.....	23
Tabulka č. 8: Typy uhlí použité při testování účinnosti modelového provozu IGCC a jejich parametry	23
Tabulka č. 9: Spotřeba paliv v České republice za všechna odvětví s uvedením podílu energetiky na celkové spotřebě v roce 2008 v měrných jednotkách a GJ.....	Příloha č. 2
Tabulka č. 10: Spotřeba paliv v České republice za všechna odvětví s uvedením podílu energetiky na celkové spotřebě v roce 2000 v měrných jednotkách a GJ.....	Příloha č. 2
Tabulka č. 11: Bilance energetických procesů, zejména výroby tepla a elektrické energie v ČR v roce 2008.....	Příloha č. 2

Seznam obrázků:

Obrázek č. 1: Schematický diagram Kalinova cyklu	17
Obrázek č. 2: Srovnání varu čisté vody a různými směsmi voda – amoniak při 30 barech	18
Obrázek č. 3: Schéma paroplynového kombinovaného cyklu s parním generátorem bez přídavného spalování	19
Obrázek č. 4: Schéma stacionárního lože u PFBC	20
Obrázek č. 5: Hlavní části systému IGCC s dmýcháním kyslíku	21
Obrázek č. 6: Graf účinností systémů IGCC s novými technologiemi	24

Seznam příloh:

Příloha č. 1: Odvození vzorce pro kinetickou energii proudícího vzduchu

Příloha č. 2: Grafy světových zásob a spotřeby ropy a zemního plynu

Příloha č. 3: Výběry ze statistických dat ČSÚ

Příloha č. 4: Bilance energetických procesů v České republice; ČSÚ

Příloha č. 5: Výroba elektřiny a ostatních energetických zdrojů v ČR; ČSÚ

Příloha č. 6: Bilance zemního plynu v ČR; ČSÚ

Příloha č. 7: Bilance černého uhlí v ČR; ČSÚ

Příloha č. 8: Bilance hnědého uhlí v ČR; ČSÚ

Příloha č. 9: Základní rovnice přeměn látek při pyrolýze v IGCC

Příloha č. 10: Podíl energie vyrobené z CHP na celkové produkci elektřiny v r. 2009

Příloha č. 1: Odvození vzorce pro kinetickou energii proudícího vzduchu

Obecný vzorec pro kinetickou energii je:

$$(3) \quad E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad [\text{J}]$$

Dosazením hmotnosti vypočítané z hustoty vzduchu, tedy

$$(4) \quad m_v = \rho V \quad [\text{kg}],$$

kde objem je dán plochou, přes kterou se měří energetický tok, a rychlostí větru násobenou délkou časového intervalu měření, tedy

$$(5) \quad V_v = S^2vt \quad [\text{m}^{-3}],$$

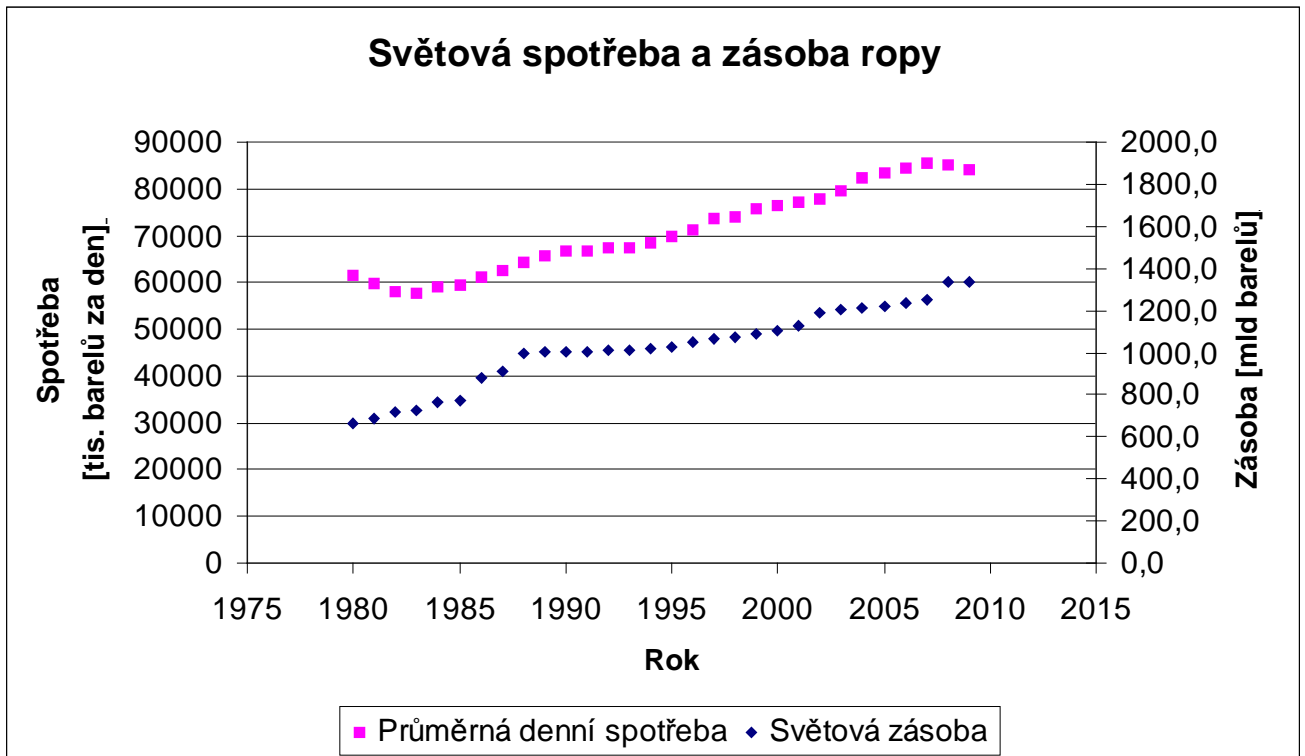
do vzorce (3) dostáváme

$$(6) \quad E_{kin} = \frac{1}{2}\rho S^2v^3t \quad [\text{J}].$$

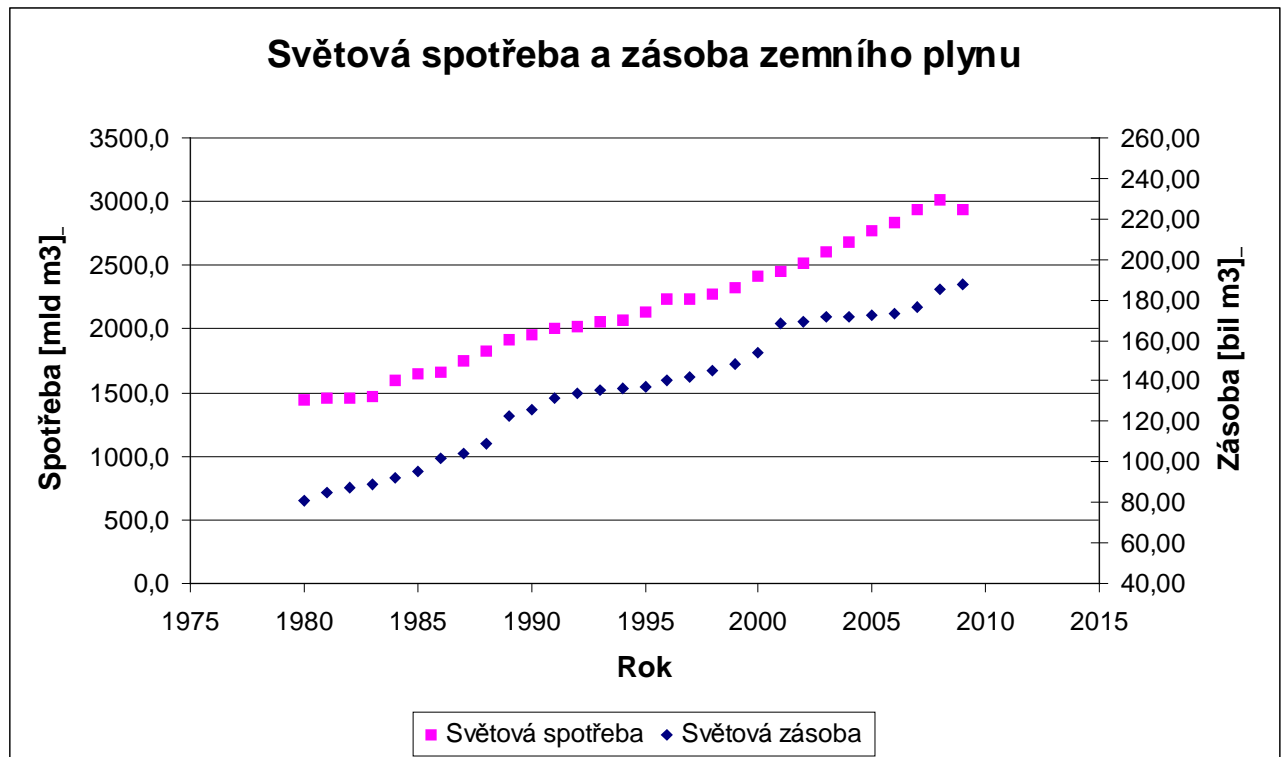
Pro energetický tok proudu vzduchu jednotkovou plochou, tedy 1 m^2 , lze vzorec (6) upravit na:

$$(7) \quad E_t = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad [\text{Wm}^{-2}].$$

Příloha č. 2: Grafy světových zásob a spotřeby ropy a zemního plynu



Zdroj dat: BP (2010): Statistical review of world energy



Zdroj dat: BP (2010): Statistical review of world energy

Příloha č. 3: Výběry ze statistických dat ČSÚ

Tabulka č. 9: Spotřeba paliv v České republice za všechna odvětví s uvedením podílu energetiky na celkové spotřebě v roce 2008 v měrných jednotkách a GJ

Typ paliva	Celková spotřeba v NH	Výroba a rozvod elektřiny, plynu a tepla	Výroba a rozvod elektřiny, plynu a tepla [GJ]	Podíl na NH [%]
Černé uhlí [t]	8646036	2957096	67878097	34,20
Hnědé uhlí [t]	44106593	36645132	458528631	83,08
Benzíny [m ³]	208254	2731	88311	1,31
Motorová nafta [t]	2044346	4265	182116	0,21
Zemní plyn [tis. m ³]	4913450	933988	31755595	19,01

Tabulka č. 10: Spotřeba paliv v České republice za všechna odvětví s uvedením podílu energetiky na celkové spotřebě v roce 2000 v měrných jednotkách a GJ

Typ paliva	Celková spotřeba v NH	Výroba a rozvod elektřiny, plynu a tepla	Výroba a rozvod elektřiny, plynu a tepla [GJ]	Podíl na NH [%]
Černé uhlí [t]	9819369	3545577	73941649	36,11
Hnědé uhlí [t]	44581576	37403716	458365690	83,90
Benzíny [m ³]	320422	6732	215707	2,10
Motorová nafta [t]	1487393	7968	338640	0,54
Zemní plyn [tis. m ³]	5318362	1061951	36106334	19,97

Tabulka č. 11: Bilance energetických procesů, zejména výroby tepla a elektrické energie v ČR v roce 2008

Rok		2000	2005	2006	2007	2008
Vsázka celkem *		1421175	1577209	1594403	1599635	1582116
Z toho	Teplo	276633	249638	239100	230296	225927
	Elektřina	708263	811917	826603	868504	811859
Výroba celkem *		909043	994448	1009322	982245	1006787
Z toho	Teplo	219783	205473	198123	184161	184428
	Elektřina	259016	288641	294340	309535	292450
Efektivita celkem ($\eta_{x,celk}$) **		63,96	63,05	63,30	61,40	63,64
Z toho	Teplo (η_{tep})	79,45	82,31	82,86	79,97	81,63
	Elektřina (η_{el})	36,57	35,55	35,61	35,64	36,02
* - údaje v TJ; ** - údaje v %						

Zdroj všech tabulek: ČSÚ: Statistická ročenka 2009 [3]

Příloha č. 4: Bilance energetických procesů v České republice; ČSÚ

PRŮMYSL A ENERGETIKA						INDUSTRY AND ENERGY
16-14. Bilance energetických procesů						
Balance of energy processes						
v TJ						TJ
Ukazatel	2000	2005	2006	2007	2008 ¹⁾	Indicator
V s á z k y celkem	1 421 175	1 577 209	1 594 403	1 599 635	1 582 116	Inputs, total
v tom:						
výroba tepla	276 633	249 638	239 100	230 296	225 927	Heat production
výroba elektřiny	708 263	811 917	826 603	868 504	811 859	Electricity production
zušlechťování paliv celkem	436 279	515 654	528 700	500 835	544 330	Fuel upgrading, total
v tom:						
briketování hnědého uhlí	6 706	7 903	9 248	7 146	4 959	Lignite briquetting
koksování	129 258	127 899	130 180	123 566	129 234	Coking
tlakové zplyňování uhlí	18 920	20 136	20 337	20 044	22 189	Coal pressure gasification
vysokopecní proces	24 100	24 034	27 221	28 556	24 875	Blast furnace process
zpracování ropy	257 214	335 606	341 704	321 429	362 969	Crude oil processing
zplyňování mazutu	0	0	0	0	0	Mazut gasification
průmyslové generátory	80	76	93	94	104	Industrial generators
V ý t ě ž k y celkem	909 043	994 448	1 009 322	982 245	1 006 787	Outputs, total
v tom:						
výroba tepla	219 783	205 473	198 123	184 161	184 428	Heat production
výroba elektřiny	259 016	288 641	294 340	309 535	292 450	Electricity production
zušlechťování paliv celkem	430 244	500 334	516 859	488 550	529 909	Fuel upgrading, total
v tom:						
briketování hnědého uhlí	6 513	7 613	8 689	6 468	4 326	Lignite briquetting
koksování	125 657	123 999	126 541	119 365	124 673	Coking
tlakové zplyňování uhlí	18 071	19 758	20 158	19 425	22 142	Coal pressure gasification
vysokopecní proces	24 100	24 034	27 221	28 556	24 875	Blast furnace process
zpracování ropy	255 848	324 878	334 186	314 671	353 821	Crude oil processing
zplyňování mazutu	0	0	0	0	0	Mazut gasification
průmyslové generátory	55	52	64	65	72	Industrial generators
Z t r á t y celkem v energetických procesech	572 681	650 022	653 381	684 464	647 588	Energy processes losses, total
v tom:						
výroba tepla	62 430	50 249	46 705	51 481	47 367	Heat production
výroba elektřiny	469 303	546 269	555 580	583 399	542 568	Electricity production
zušlechťování paliv celkem	40 948	53 504	51 096	49 584	57 653	Fuel upgrading, total
v tom:						
briketování hnědého uhlí	904	1 083	1 443	1 274	1 098	Lignite briquetting
koksování	17 953	18 850	18 862	18 712	19 626	Coking
tlakové zplyňování uhlí	4 582	4 167	3 671	4 279	5 170	Coal pressure gasification
vysokopecní proces	-	-	-	-	-	Blast furnace process
zpracování ropy	17 482	29 373	27 089	25 288	31 724	Crude oil processing
zplyňování mazutu	0	0	0	0	0	Mazut gasification
průmyslové generátory	27	26	31	31	35	Industrial generators
Podíl vsázky na použitých prvotních energetických zdrojích (%)	86	85	85	85	87	Share of inputs in primary energy resources used (%)
Podíl ztrát na použitých prvotních energetických zdrojích (%)	35	35	35	37	36	Share of losses in primary energy resources used (%)
Prvotní zdroje celkem	1 656 660	1 855 737	1 878 712	1 877 339	1 814 530	Primary resources, total
¹⁾ předběžné údaje						¹⁾ Preliminary data

**Příloha č. 5: Výroba elektřiny a ostatních energetických zdrojů v ČR; ČSÚ
PRŮMYSL A ENERGETIKA**

16-15. Výroba elektřiny a ostatních energetických zdrojů

Production of electricity and other energy sources

Ukazatel	Měřicí jednotka	2000	2005	2006	2007	2008 ¹⁾	Unit
Výroba elektřiny a instalovaný výkon							
Výroba elektřiny celkem	GWh	73 466	82 578	84 361	88 198	83 518	GWh
v tom:							
parní a paroplynové elektrárny	GWh	57 550	54 789	54 992	59 367	54 319	GWh
jaderné elektrárny	GWh	13 590	24 728	26 046	26 172	26 551	GWh
spalovací elektrárny	GWh	13	13	17	8	14	GWh
vodní elektrárny	GWh	2 313	3 027	3 257	2 524	2 376	GWh
větrné a solární elektrárny	GWh	.	21	49	127	258	GWh
Celkový instalovaný výkon	MW	15 323	17 412	17 508	17 562	17 724	MW
v tom:							
parní a paroplynové elektrárny	MW	11 429	11 435	11 478	11 453	11 524	MW
jaderné elektrárny	MW	1 760	3 760	3 760	3 760	3 760	MW
spalovací elektrárny	MW	36	29	51	60	58	MW
vodní elektrárny	MW	2 097	2 166	2 175	2 175	2 192	MW
větrné a solární elektrárny	MW	1	22	44	114	190	MW
Výroba tepla celkem	TJ	219 783	215 141	208 403	193 362	192 688	TJ
v tom:							
elektrárny a teplárny	TJ	159 894	160 602	154 470	146 987	147 071	TJ
výtopny	TJ	59 889	54 539	53 933	46 376	45 617	TJ
Odbytová těžba černého uhlí	tis. tun	14 855	13 254	13 385	12 894	12 663	thous. t
Odbytová těžba hnědého uhlí	tis. tun	49 854	48 305	48 600	48 858	47 121	thous. t
Výroba hnědouhelných briket	tis. tun	263	301	345	247	156	thous. t
Výroba koksu a polokoksu	tis. tun	3 411	3 412	3 428	3 258	3 399	thous. t

¹⁾ předběžné údaje

Zdroj: ČSÚ: Statistická ročenka 2009 [3]

Příloha č. 6: Bilance zemního plynu v ČR; ČSÚ

PRŮMYSL A ENERGETIKA						INDUSTRY AND ENERGY
16-16. Bilance zemního plynu						
<i>Balance of natural gas</i>						
Ukazatel	2000	2005	2006	2007	2008 ¹⁾	Indicator
	mil. m ³					
Přírodní zdroje	219	201	194	201	192	Natural resources
Vývoz	0	85	124	402	968	Exports
Dovoz	9 209	9 359	9 804	8 628	9 573	Imports
Čerpání (+), doplnění (-) zásob dodavatelů	-186	17	-582	375	-77	Stock of suppliers: withdrawals (+), entries (-)
Jiné zdroje (+), úbytky (-)	0	0	0	-151	-39	Other sources (+), decreases (-)
Prvotní zdroje celkem	9 242	9 492	9 292	8 651	8 681	Primary resources, total
z toho:						
velkoodběr	5 545	5 272	5 112	4 868	4 839	Large-scale consumption
maloodběr	878	1 257	1 189	1 119	1 158	Small-scale consumption
Vsázka celkem	2 366	1 897	1 801	1 690	1 698	Input, total
v tom:						
při výrobě tepla	2 091	1 720	1 640	1 543	1 516	Heat production
při výrobě elektřiny	275	177	161	147	182	Electricity production
při zušlechťování paliv	0	0	0	0	0	Fuel upgrading
Provozovací spotřeba při zušlechťování paliv	135	145	139	120	132	Operating consumption for fuel upgrading
Provozovací spotřeba při těžbě paliv	11	10	14	11	12	Operating consumption for fuel extraction
Ztráty	293	115	125	84	95	Losses
Konečná spotřeba celkem	6 437	7 323	7 213	6 746	6 744	Final consumption, total
z toho v domácnostech	2 525	2 834	2 793	2 495	2 508	Households
	TJ					
Přírodní zdroje	7 455	6 846	6 174	6 778	6 579	Natural resources
Vývoz	0	2 895	4 249	13 700	33 161	Exports
Dovoz	313 474	318 768	335 280	295 174	327 918	Imports
Čerpání (+), doplnění (-) zásob dodavatelů	-6 331	579	-20 100	13 023	-2 852	Stock of suppliers: withdrawals (+), entries (-)
Jiné zdroje (+), úbytky (-)	0	0	0	-5 220	-1 135	Other sources (+), decreases (-)
Prvotní zdroje celkem	314 598	323 298	317 105	296 055	297 349	Primary resources, total
z toho:						
velkoodběr	188 752	179 564	175 067	164 066	165 665	Large-scale consumption
maloodběr	29 887	42 813	40 720	37 713	39 656	Small-scale consumption
Vsázka celkem	80 539	64 612	60 558	57 378	58 148	Input, total
v tom:	34	477	2 067	7 336	2 838	
při výrobě tepla	71 178	58 583	55 031	52 818	51 284	Heat production
při výrobě elektřiny	9 361	6 029	5 527	4 560	6 127	Electricity production
při zušlechťování paliv	0	0	0	0	0	Fuel upgrading
Provozovací spotřeba při zušlechťování paliv	4 595	4 939	4 755	4 097	4 496	Operating consumption for fuel upgrading
Provozovací spotřeba při těžbě paliv	374	341	478	371	411	Operating consumption for fuel extraction
Ztráty	9 974	3 917	4 289	2 854	3 288	Losses
Konečná spotřeba celkem	219 115	249 421	247 025	231 851	231 744	Final consumption, total
z toho v domácnostech	85 951	96 526	94 962	84 086	85 903	Households
¹⁾ předběžné údaje						¹⁾ Preliminary data

Příloha č. 7: Bilance černého uhlí v ČR; ČSÚ
16-17. Bilance černého uhlí a černouhelného koksu

v tis. t

Thousand tonnes

Ukazatel	2000	2005	2006	2007	2008 ¹⁾	Indicator
	černé uhlí		Bituminous coal			
Přírodní zdroje	14 855	13 254	13 385	12 894	12 663	Natural resources
Vývoz	5 886	5 254	6 517	6 805	6 082	Exports
Dovoz	1 094	1 220	1 997	2 508	2 241	Imports
Čerpání (+), doplnění zásob (-)	654	-35	1 016	1 121	.	Withdrawals from (+), entries into inventories (-)
Jiné zdroje (+), úbytky (-)	0	0	9	0	.	Other sources (+), decreases (-)
Prvotní zdroje celkem	10 717	9 185	9 890	9 718	.	Primary resources, total
Bilanční rozdíly	0	-16	469	-163	.	Balancing differences
Transformační sektor celkem	8 443	7 615	7 923	8 459	.	Transformation sector, total
Zušlechťování paliv	4 556	4 342	4 334	4 110	.	Input for fuel upgrading
Výroba elektřiny a tepla	3 887	3 273	3 589	4 349	.	Input for electricity and heat production
Energetický sektor celkem	4	0	0	0	.	Energy sector, total
Ztráty	0	81	96	102	.	Losses
Konečná spotřeba celkem	2 270	1 505	1 349	1 320	.	Final consumption, total
Průmysl	1 875	1 290	1 222	1 201	.	Industry sector
Hutnictví železa	1 187	806	766	716	.	Iron and steel
Ostatní průmysl	688	484	456	485	.	Other industry
Obchod a veřejné služby	21	12	4	4	.	Commercial and public services
Domácnosti	365	200	119	112	.	Residential
Zemědělství	9	3	3	2	.	Agriculture
Nespecifikováno	0	0	1	1	.	Not elsewhere specified
	černouhelný koks		Pit-coal coke			
Výroba	3 411	3 412	3 428	3 258	3 399	Manufacture
Vývoz	948	913	956	807	830	Exports
Dovoz	602	510	705	735	519	Imports
Čerpání (+), doplnění zásob (-)	79	-60	30	22	.	Withdrawals from (+), entries into inventories (-)
Jiné zdroje (+), úbytky (-)	0	0	16	0	.	Other sources (+), decreases (-)
Prvotní zdroje celkem	3 144	2 949	3 223	3 208	.	Primary resources, total
Bilanční rozdíly	0	0	0	.	.	Balancing differences
Transformační sektor celkem	861	964	1 073	1 050	.	Transformation sector, total
Zušlechťování paliv	846	962	1 072	1 050	.	Input for fuel upgrading
Výroba elektřiny a tepla	15	2	1	0	.	Input for electricity and heat production
Energetický sektor celkem	0	0	0	0	.	Energy sector, total
Ztráty	0	0	1	1	.	Losses
Konečná spotřeba celkem	2 283	1 985	2 149	2 157	.	Final consumption, total
Průmysl	2 127	1 893	2 083	2 099	.	Industry sector
Hutnictví železa	2 028	1 847	2 026	2 043	.	Iron and steel
Ostatní průmysl	99	46	57	56	.	Other industry
Obchod a veřejné služby	68	26	26	13	.	Commercial and public services
Domácnosti	80	52	40	40	.	Residential
Zemědělství	8	1	0	3	.	Agriculture
Nespecifikováno	0	13	0	2	.	Not elsewhere specified

¹⁾ předběžné údaje

¹⁾ Preliminary data

Zdroj: ČSÚ: Statistická ročenka 2009 [3]

Příloha č. 8: Bilance hnědého uhlí v ČR; ČSÚ

PRŮMYSL A ENERGETIKA					INDUSTRY AND ENERGY	
16-18. Bilance hnědého uhlí, lignitu a hnědouhelných briket						
<i>Balance of sub-bituminous coal, lignite and lignite briquettes</i>						
v tis. t						Thousand tonnes
Ukazatel	2000	2005	2006	2007	2008 ¹⁾	Indicator
hnědé uhlí a lignit						
<i>Sub-bituminous coal, lignite</i>						
Přírodní zdroje	50 307	48 772	49 059	49 295	47 537	Natural resources
Vývoz	2 768	1 207	1 387	1 194	1 537	Exports
Dovoz	1	1	0	0	35	Imports
Čerpání (+), doplnění zásob (-)	2 832	56	-158	39	.	Withdrawals from (+), entries into inventories (-)
Jiné zdroje (+), úbytky(-)	0	0	0	0	.	(-)
Prvotní zdroje celkem	50 372	47 622	47 514	48 140	.	Primary resources, total
Bilanční rozdíly	0	0	-448	163	.	Balancing differences
Transformační sektor celkem	42 942	42 973	42 507	44 576	.	Transformation sector, total
Zušlechťování paliv	1 795	2 023	2 130	1 961	.	Input for fuel upgrading
Výroba elektřiny a tepla	41 147	40 950	40 377	42 615	.	Input for electricity and heat production
Energetický sektor celkem	6	5	5	4	.	Energy sector, total
Ztráty	10	14	18	0	.	Losses
Konečná spotřeba celkem	7 414	4 630	5 432	3 397	.	Final consumption, total
Průmysl	4 942	3 323	3 503	2 138	.	Industry sector
Hutnictví železa	205	89	75	70	.	Iron and steel
Ostatní průmysl	4 737	3 234	3 428	2 068	.	Other industry
Obchod a veřejné služby	592	700	158	116	.	Commercial and public serv
Domácnosti	905	564	1 720	1 103	.	Residential
Zemědělství	125	43	51	31	.	Agriculture
Nespecifikováno	850	0	0	9	.	Not elsewhere specified
hnědouhelné brikety <i>Lignite briquettes</i>						
Výroba	253	301	345	247	156	Manufacture
Vývoz	120	152	192	114	60	Exports
Dovoz	0	0	1	0	13	Imports
Čerpání (+), doplnění zásob (-)	0	-2	2	1	.	Withdrawals from (+), entries into inventories (-)
Jiné zdroje (+), úbytky(-)	0	0	0	0	.	(-)
Prvotní zdroje celkem	133	147	156	134	.	Primary resources, total
Bilanční rozdíly	0	0	0	0	.	Balancing differences
Transformační sektor celkem	15	0	2	8	.	Transformation sector, total
Zušlechťování paliv	0	0	0	0	.	Input for fuel upgrading
Výroba elektřiny a tepla	15	0	2	8	.	Input for electricity and heat production
Energetický sektor celkem	0	14	16	11	.	Energy sector, total
Ztráty	0	0	0	0	.	Losses
Konečná spotřeba celkem	118	133	138	115	.	Final consumption, total
Průmysl	0	3	5	4	.	Industry sector
Obchod a veřejné služby	3	2	0	0	.	Commercial and public serv
Domácnosti	115	128	133	111	.	Residential
Zemědělství	0	0	0	0	.	Agriculture
Nespecifikováno	0	0	0	0	.	Not elsewhere specified
¹⁾ předběžné údaje						¹⁾ Preliminary data

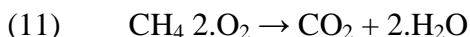
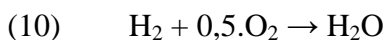
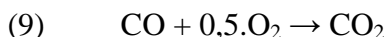
Zdroj: ČSÚ: Statistická ročenka 2009 [3]

Příloha č. 9: Základní rovnice přeměn látek při pyrolýze v IGCC

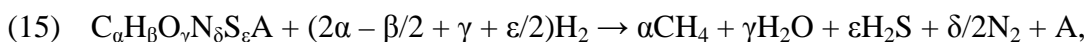
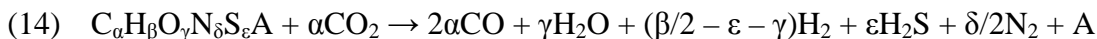
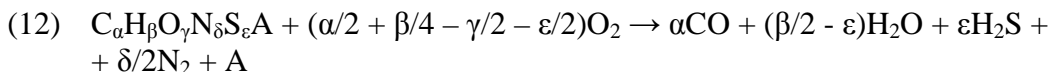
Surovina pro pyrolýzu pocházející z organických látek, např. uhlí, ropa, ale také biodpad, resp. odpad obecně, je, podle Péres-Fortese [28] obecně dána sumárním vzorcem $C_aH_bO_cN_dS_e(H_2O)_wA$, který udává obecné složení z jednotlivých prvků či skupin s jejich stechiometrickými koeficienty a, b, c, d, e, w , kde je C – uhlík, H – vodík, O – kyslík, S – síra, H_2O – voda, a A hmota minerálů, resp. popelovin. Vzorec $C_\alpha H_\beta O_\gamma N_\delta S_\varepsilon A$ udává stechiometrické koeficienty $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$, které jsou stanoveny na základě teploty v reaktoru a množství těkavých látek v daném palivu. Mezi nimi je vztah vyplývající z následující rovnice:



Hlavní reakce spalování těkavých látek potom jsou:



Reakce spalování a zplynění pevných látek z paliva lze zapsat jako:



v nichž nastává spalování kvůli prezenci O_2 , rovnice (12) – (14) a/nebo zplynění kvůli redukčním podmínkám, rovnice (13) – (15).

Příloha č. 10: Podíl energie vyrobené z CHP na celkové produkci elektřiny v letech 2005 - 2008

Rok	2005	2006	2007	2008
EU celkem	10,5	11,1	10,9	10,9
Belgie	8,4	8,5	8,7	12,5
Bulharsko	7,3	6,1	6	9,4
Česko	16,4	16,8	15,1	13
Dánsko	50	52,1	40,7	42,8
Německo	9,3	12,6	12,5	12,2
Estonsko	9,9	10,2	10,7	7,1
Irsko	2,6	2,4	5,6	6,3
Řecko	1,5	1,7	1,7	1,6
Španělsko	7,9	7,8	7,2	7,1
Francie	4,1	4	3,2	3,2
Itálie	8,1	9	9,8	10,3
Kypr		0,3	0,3	0,3
Lotyšsko	32	30,7	42,6	40,9
Litva	11,6	15,5	14,3	13,2
Lucembursko	10,6	10,1	10,9	9,9
Maďarsko	18,2	19,1	22,4	21,4
Holadsko	29,5	29,4	29,9	30,1
Rakousko	15,2	15,4	16,1	15,6
Polsko	17	16,8	16	17,3
Portugalsko	11	11,6	11,6	12,3
Rumunsko	26,4	26,2	18	10,7
Slovinsko	6,4	7,3	7,4	7,2
Slovensko	15,3	15,3	27,6	25,6
Finsko	34	38,9	34,9	34,4
Švédsko	8,1	6,7	8	8,2
Velká Británie	6,7	6,8	6,3	6,4
Turecko	4	4,4	4,4	4,6

Zdroj: EUROSTAT: Statistical yearbook 2009 [32]