

# Zplyňování odpadů

Michael Pohorelý<sup>a,b</sup>, Michal Jeremiáš<sup>a</sup>, Karel Svoboda<sup>a</sup>, Siarhei Skoblia<sup>b</sup>, Zdeněk Beňo<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Ústav chemických procesů AV ČR, v. v. i., Rozvojová 135/1, 165 02 Praha 6, [pohorely@icpf.cas.cz](mailto:pohorely@icpf.cas.cz)

<sup>b</sup> Ústav energetiky & Ústav plynných a pevných paliv a ochrany ovzduší, VŠCHT Praha, Technická 5, 166 28 Praha 6, [michael.pohorely@vscht.cz](mailto:michael.pohorely@vscht.cz)

Termické zpracování odpadů je ověřený způsob jejich minimalizace. Tradičně bývaly odpady termicky redukovány (na popel) bez využití jejich vázané energie za účelem zmenšení objemu materiálu ke skládkování. V současnosti je ale valná většina termicky zpracovaného odpadu využita pro výrobu elektřiny či pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla ve spalovnách, respektive v zařízeních na energetické využití odpadu. Spalovací technologie jsou velmi vyspělé, spolehlivé a významně převažující v rámci termických procesů zpracování odpadů, zejména pak spalování na roštu. [1, 2] Ovšem, jak bude uvedeno v následující kapitole (1), mají klasické spalovny limity v dosažitelné účinnosti a ve zmenšování měřítka, tak aby množství zpracovávaného odpadu odpovídalo reálné aglomeraci menšího města. Tyto limity lze obejít použitím inovativních technologií [3], mezi něž lze zařadit i technologie využívající zplyňování.

Zplyňováním je myšlena termochemická konverze paliva na výhřevný plyn. Tato přeměna je umožněna působením zplyňovacího média a vysoké teploty. Jako zplyňovací médium bývá použit standardně vzduch, ale ve speciálních případech může být použita i vodní pára nebo směs kyslíku, vodní páry nebo oxidu uhličitého. Produktem je plyn obsahující výhřevné složky ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  a další organické minoritní sloučeniny), doprovodné složky ( $N_2$ ,  $CO_2$  a  $H_2O$ ) a znečišťující složky (dehet, prach, sloučeniny síry, chlóru, alkálie a další). Dle stupně zplynění je pevným zbytkem procesu popel či uhlíkatý porézní zbytek. Vyrobený výhřevný plyn může být použit pro různé aplikace, přičemž „nejjednodušší“ je jeho spálení v kotli za účelem výroby energetické páry. Mezi více komplikované způsoby využití patří např. pohon plynového motoru či turbíny nebo dokonce syntéza chemikálií (především alternativních paliv), přičemž zásadní je ve všech těchto aplikacích správné čištění plynu především (ale nejenom) od dehtových sloučenin, což činí tuto technologii komplikovanou. [4–9]

Konceptů a demonstračních jednotek pro zplyňování odpadů je mnoho a jsou detailně popsány v souhrnných člancích [10, 11]. Přesto, že se jedná o zajímavé a technologicky schůdné procesy, je nutné podotknout, že v porovnání s běžnými spalovnami nejsou dostatečně ověřené. Přesto ale existují příklady úspěšných, ekonomicky rentabilních a odzkoušených technologií pro využití odpadů pro výrobu elektřiny a tepla, které využívají technologii zplyňování. Dva úspěšné koncepty budou popsány v kapitole 2 a 3 a v kapitole 4 bude nastíněno, jakým směrem by se mohly dále vyvíjet technologie využívající zplyňování k energetickému využití odpadů.

## 1 Možnosti spaloven odpadů

Pro potřeby tohoto textu je potřeba shrnout několik faktů o spalovnách odpadů. Spalovny jsou v porovnání s klasickými elektrárnami a teplárnami relativně malé (37,5 % spaloven zpracovává <100 000 tun/rok odpadu, 39,5 % 100–250 tisíc tun za rok a 39,5 % spaloven zpracovává ročně více než 250 tisíc tun odpadu). Průměrné evropské hodnoty elektrické účinnosti byly v roce 2009 20,7 % pro zařízení pracující v kondenzačním režimu a 14,2 % pro zařízení pracující v režimu kombinované výroby elektřiny a tepla [12, 13]. Tyto hodnoty účinnosti výroby elektřiny jsou relativně malé v porovnání s klasickými elektrárnami spalujícími uhlí. Hlavním důvodem je kromě menšího měřítka nutnost předcházet významné vysokoteplotní kyselé korozi způsobené chloridy kovů v popílku a vysokými koncentracemi chlorovodíku (HCl) ve spalinách [14–16]. Míra vysokoteplotní koroze je závislá především na teplotě povrchu kovu; tedy pro předcházení vysokoteplotní koroze musí být limitována teplota povrchu výparníků a přehříváků omezením výparného tlaku a přehřívací teploty. Navíc je nutné předcházet riziku kondenzace při expanzi páry v parních turbínách, což v důsledku znamená další omezení pro zvolený výparný tlak [1]. Z těchto důvodů bývají voleny konzervativní parametry páry (běžně je maximální přehřívací teplota kolem 400 °C) spolu s omezením teploty spalin v přehříváku pod 650 °C [16], což má za následek i nižší účinnost výroby elektřiny. V moderních spalovnách bývají někdy použity vyšší parametry páry (např. 60 bar a 500 °C nebo i vyšší), to ale vede k nutnosti použít korozně odolné materiály (např. Inconel 625) k ochraně výměníků, což má za následek i zvýšení investičních nákladů, což se ale vyplatí spíše u větších zařízení. [1] Možností pro zvýšení elektrické účinnosti je přehřívání páry, které je ale opět finančně schůdné pouze u velkých zařízení. [17]

Druhou příčinou snížení elektrické účinnosti je vysoká komínová ztráta. Ta bývá v rozmezí 7–25 % energie paliva (odpadu) v závislosti na výstupní teplotě spalin a na přebytku

vzduchu při spalování. [17] Spaliny na výstupu bývají ochlazené výměňikovým systémem na teplotu 150–380 °C [18]. Přebytek vzduchu bývá běžně v rozmezí 1,75–1,9, ale optimalizací spalovací komory je možné jej snížit i na 1,39 [1, 19]. Další možností, jak (omezeně) snížit komínovou ztrátu, je použití recirkulace spalin pro kontrolu teploty spalovací komory a dosažení koncentrace kyslíku ve spalinách co neblíže 6 %. [1]

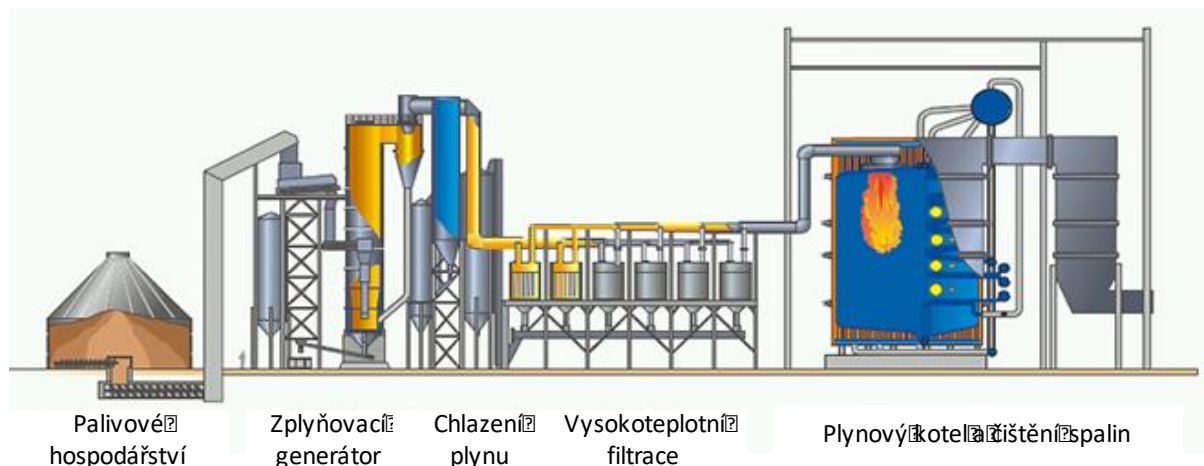
Příkladem moderní velké spalovny s vysokou elektrickou účinností je spalovna v Amsterdamu, která byla zprovozněna v roce 2007. Toto zařízení s horizontálním roštem spaluje 530 tisíc tun odpadu ročně o průměrné výhřevnosti 10 MJ kg<sup>-1</sup>. Vysoké elektrické účinnosti (nad 30 %) je dosaženo vysokými parametry páry (440 °C a 130 bar) a jejím dohříváním za prvním stupněm turbíny při tlaku 14 bar na 320 °C saturovanou párou. Tlak v kondenzátoru je udržován na 0,03 baru chlazením mořskou vodou. Provozní fond zařízení byl v roce 2011 přibližně 93%. Přebytek vzduchu při spalování se pohyboval okolo 1,4 a přibližně 25 % spalin se recirkulovalo. [20]

## 2 Zplynění odpadu, čištění vyrobeného plynu a jeho spálení pro výrobu páry s vysokými parametry, tj. koncept dvoustupňového spalování

Jak vyplývá z výše uvedeného textu, jsou hlavními příčinami nižší účinnosti výroby elektřiny ve spalovnách odpadů (1) vysokoteplotní koroze způsobená převážně sloučeninami chloru ve spalinách a související nutnost udržovat parametry páry spíše v konzervativních hodnotách a (2) vysoká komínová ztráta způsobená hlavně vysokým přebytkem vzduchu nutným k dostatečnému spálení odpadu. Tyto dvě příčiny je možné obejít rozdělením procesu spalování odpadů na (i) zplyňovací krok, (ii) relativně jednoduché čištění vzniklého plynu a (iii) jeho spálení s minimálním přebytkem vzduchu.

Tento koncept je úspěšně demonstrován na zařízení Kymijärvi II v Lahti (Finsko). Toto zařízení je v provozu od konce roku 2011, zpracovává 250 tisíc tun paliva RDF ročně a produkuje v kogeneračním režimu 50 MW elektrické energie a 90 MW tepla ze 160 MW příkonu v palivu. To odpovídá elektrické účinnosti 31 % a celkové účinnosti 87,5 %. [21]. RDF palivem se v tomto případě rozumí směs odpadu z průmyslu, maloobchodů, stavebnictví a domácností, který není vhodný na recyklaci. Tento odpad je svážen z okruhu 200 km v čemž je zahrnuto i město Helsinky, které je vzdálené 100 km. Nákup paliva je zajištěn dlouhodobými smlouvami a jeho kvalita je pečlivě ověřována. [22] Palivo je dále před-upraveno namletím a

odstraněním kovů v magnetických separátorech a na separátorech s vířivým proudem. Výhřevnost paliva se pohybuje v rozmezí 8–15 MJ/kg. [21] Zařízení má za sebou úspěšný provoz čítající více než 26 000 hodin s 20 000 hodinami v provozu s RDF palivem a s 6 000 hodinami se směsí RDF a odpadního stavebního dřeva. Stavba zařízení začala na jaře 2010 a na konci roku 2011 již bylo zařízení ve zkušebním provozu. Na jaře 2012 bylo zařízení předáno ke komerčnímu provozu. Celkové náklady na toto zařízení byly přibližně 160 milionů EUR. Průměrná využitelnost jednotky během prvního roku provozu byla 80 % z celkového časového fondu a po následném vylepšení funkce keramických filtrů se zvýšila na 90 %. Palivo je zplyněno ve dvou fluidních generátorech, každý o příkonu 80 MW v palivu, a surový vyrobený plyn (850–900 °C) je schlazen na 400 °C při využití tepla pro předehřev kotelní vody. [21] Fluidní lože generátorů je tvořeno směsí písku a vápence. [22] Když je plyn ochlazen na tuto teplotu, alkalické korozivní sloučeniny chloru vykondenzují na pevných částicích v plynu, které jsou za této teploty odfiltrovány na keramických filtrech. Při teplotě 400 °C zůstanou přítomné dehty v plynné (nezkondenzované) formě. Takto vyčištěný plyn (obsahující páry dehtů) je následně spálen v kotli s velmi mírným přebytkem vzduchu za produkce páry o tlaku 121 bar a teplotě 540 °C. Takto vysoké parametry páry ve srovnání s běžnou spalovnou (40 bar a 400 °C) umožňují dosáhnout výše zmíněné vysoké elektrické účinnosti 31 % vztažené k příkonu v palivu. [21] Spaliny z kotle procházejí vícestupňovým čištěním (denitrifikace, odprášení, přístřik hydrogenuhličitanu sodného a také vápence s aktivním uhlím), díky čemuž jsou emise škodlivin ve spalínách minimální [23].



Obr. 1 Technologie zplynění RDF v cirkulujícím fluidním loži s následnou vysokoteplotní filtrací a vysokoúčinném spálení plynu v kotli za produkce páry o vysokých parametrech (121 bar, 540 °C). [23]

Samozřejmě je nutné dodat, že toto zařízení v Lahti je světlou výjimkou a několik podobných pokusů zplyňovat odpad v minulosti skončilo neúspěchem. Například obdobné

zařízení v Greve in Chianti v Itálii pro zpracování 200 tun RDF denně ve formě peletek bylo po třech periodách provozu během pěti let odstaveno. [1, 24, 25]

### 3 Využití zplyňovací technologie pro zpracování odpadu v menším měřítku

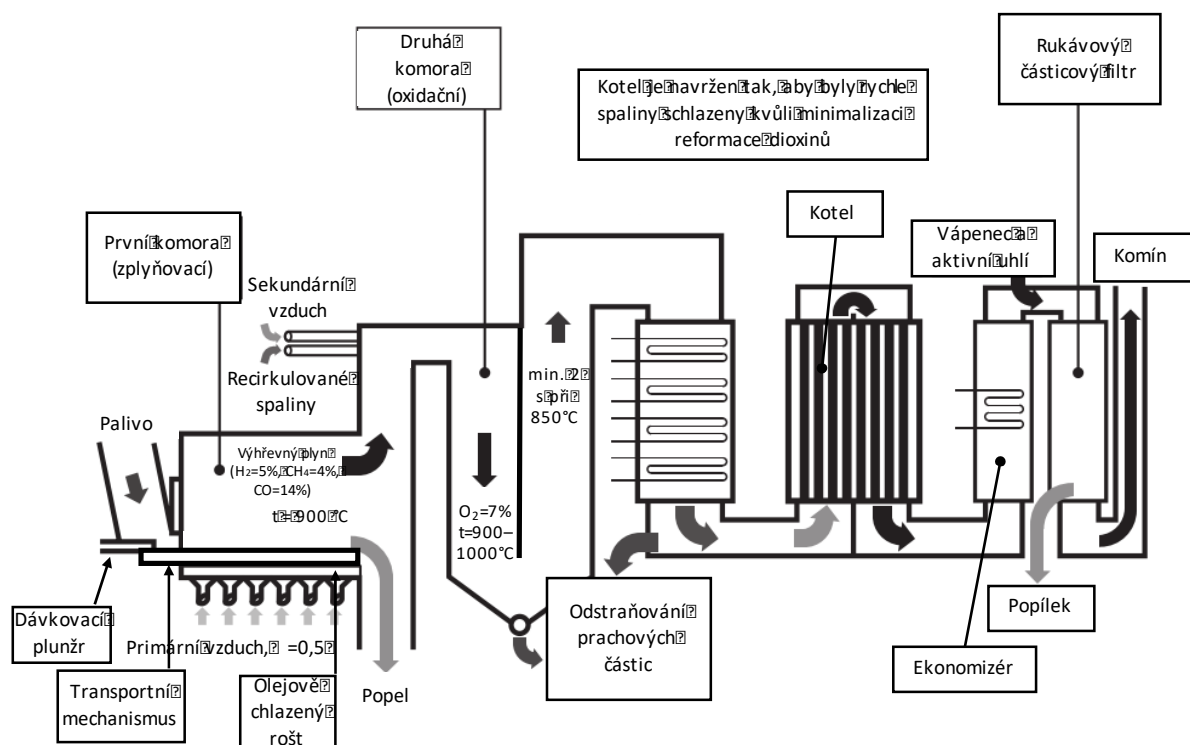
Dalším důvodem pro využití zplyňování při zpracování odpadů může být snaha o zajištění minimálních emisí zařízení i v menší velikosti vhodné pro kapacitu menší městské aglomerace. Tím se dá předejít nutnosti svážet odpad z velkých vzdáleností do velkého zařízení a tím i emisím spojeným s jeho přepravou. Taktéž teplo produkované termickým využitím odpadů je snadněji uplatnitelné v rámci lokální tepelné distribuční sítě.

Z této logiky vychází zařízení Energos [26, 27]. Uvádí se, že tato technologie dosahuje nízkých emisí oxidu uhelnatého (CO), oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) a dioxinů bez použití standardních technologií čištění plynu používaných v tradičních spalovnách. Taktéž obsah uhlíku (nedopalu) v popelu je pod 3% TOC a jeho vyluhovatelnost se pohybuje na úrovni 10 % oproti běžným zařízením pro energetické využití odpadu. [26, 28]

Technologie Energos byla vyvinuta na institutu SINTEF v Trondheimu v Norsku v letech 1990–1997 a v průběhu následujících 5 let bylo postaveno šest tepláren, které jsou stále v provozu (pět v Norsku a jedna v Německu) každá zpracovávající 39 000 t/rok zbytkového nerecyklovatelného komunálního a průmyslového odpadu. V roce 2004 energetická společnost Energ-G získala technologii Norské společnosti Energos ASA a přivedla technologii též na trh Velké Británie, kde byla postavena jednotka na Isle of Wight v roce 2009 (30 000 t/rok) [28]. Od té doby byla zprovozněna ještě jedna jednotka Norsku v roce 2010 (78 000 t/rok) a další tři jsou v současnosti ve stavbě ve Velké Británii (144 000, 96 000 a 144 000 t/rok). [26]

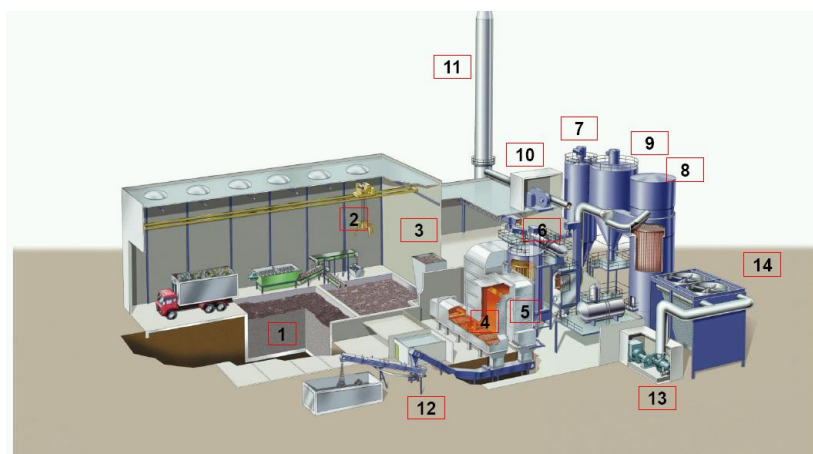
Technologie Energos (Obr. 2 a Obr. 3) je určena na energetické využití zbytkového nerecyklovatelného komunálního a průmyslového odpadu a její hlavní předností jsou velmi nízké emise zejména oxidů dusíku a dioxinů, aniž by byla k tomu nutná sekundární opatření (v případě emisí NO<sub>x</sub> se daří dosahovat hodnot na úrovni cca 20 % zákonných limitů, u dioxinů je to dokonce i 1 %). Výše uvedené je umožněno uplatněním principu zplyňování na roštu. Před zplyněním je palivo namleto a na magnetickém separátoru jsou vyseparovány kovy. Rošt je koncipován jako horizontální, pohyblivý a zplyňování probíhá za nedostatku kyslíku při teplotách okolo 900 °C. Průměrný stechiometrický koeficient přebytku vzduchu v této komoře

je kolem 0,5 a vzduch je distribuován do roštu tak, aby bylo dosaženo minimální koncentrace uhlíku v popelu. Výhřevný plyn (obsahující CO 14 %, H<sub>2</sub> 5 % a CH<sub>4</sub> 4 %) poté prochází oxidační komorou (za přídavku sekundárního vzduchu a recirkulovaných spalin), odprášením a je posléze energeticky využit pro výrobu tepla v parním kotli (23 bar, 380 °C) a elektriny v závislosti na poptávce po teple, což je v případě této technologie primární produkt. Spaliny jsou v kotli díky jeho konstrukci rychle vychlazený pod teploty, které vylučují rekombinaci dioxinů a poté za přídavku mletého vápence a aktivního uhlí zbaveny ostatních monitorovaných škodlivin v tkaninovém filtru. [26–31]



Obr. 2 Schématické znázornění technologie Energos [28, 31]





Obr. 3 – Schéma kompletního zařízení Energos; vysvětlivky: 1 – bunkr, 2 – jeřáb, 3 – zásobník, 4 – zplyňovací rošt (primární komora), 5 – oxidační komora (sekundární komora), 6 – parní vyvíječ (kotel), 7 – silo na aktivní uhlí a vápenec, 8 – tkaninový odlučovač, 9 – sklad odloučených zbytků, 10 – spalinový ventilátor, 11 – komín, 12 – popelové hospodářství, 13 – parní turbína, 14 – vzduchem chlazený kondenzátor [27]

## 4 Další možný vývoj technologií využívajících zplyňování odpadů

Předpokládáme, že zplyňovací technologie odpadů mají budoucnost spíše v aplikacích s co nejvyšší mírou jednoduchosti a v reaktorech s fluidním ložem, které umožňuje zpracování paliva s mírně proměnlivou strukturou, a kde je možnost použití levného přírodního katalyzátoru, jako je např. vápenec nebo dolomit (v kalcinovaných formách). [32, 33] Zajímavou možností zůstává použití zplyňování odpadů ve fluidním loži s následným čištěním plynu od korozivních sloučenin a těžkých kovů s následným spálením tohoto plynu v existujících kotlích na fosilní paliva (s možností produkce páry s vysokými parametry) nebo v cementářských pecích a pecích pro výrobu páleného vápna. Takto by se teoreticky dala nahradit část fosilního paliva v kotli horkým plynem vyrobeným z odpadu. Spolu-spalování plynu by pravděpodobně mělo minimální vliv na provoz stávajícího zařízení, korozi, popeloviny a emise. Naopak, ze zkušeností s obdobným konceptem ze zařízení Vaasa (Finsko), lze dovodit, že je takto možné dosáhnout zlepšení emisních charakteristik kotle. Investice nastíněného konceptu by byly výrazně nižší než při stavbě celého nového zařízení pro energetické využití odpadů. [21] Při zachování tohoto jednoduchého konceptu je nadějně zkoumat možnosti vysokoteplotního čištění plynu [34]. Dalšími progresivními výzkumnými úkoly je hledání ideální předúpravy reálného odpadu pro zplyňování a otestování možnosti synergického spolu-zplyňování jiného paliva (např. odpadní dřevní biomasy) spolu s odpadem [35, 36] a dále ověření možností využití vzniklého plynu pro náročnější aplikace (např. plynový

motor s generátorem pro produkci elektřiny) a využití jiných zplyňovacích médií než je vzduch, např. H<sub>2</sub>O a CO<sub>2</sub> spolu s kyslíkem (se stechiometrickým koeficientem vzduchu kolem 0,3), čímž by se zajímavě zvýšila i využitelnost vyrobeného plynu [8, 9] např. pro výrobu biopaliv druhé generace [4, 37, 38].

- [1] L. Lombardi, E. Carnevale and A. Corti, "A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste", *Waste Manag.*, vol. 37, pp. 26–44, 2015.
- [2] B. Leckner, "Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy (WtE) units", *Waste Manag.*, vol. 37, pp. 13–25, 2015.
- [3] F. Lamers, E. Fleck, L. Pelloni and B. Kamuk, "Alternative Waste Conversion Technologies", *ISWA - Int. Solid Waste Assoc.*, p. 35, 2013.
- [4] M. Pohořelý, M. Jeremiáš, P. Kameníková, S. Skoblja, K. Svoboda and M. Punčochář, "Biomass Gasification", *Chem. List.*, vol. 106, pp. 264–274, 2012.
- [5] "Česká asociace pro pyrolýzu a zplyňování (CPGA)". [Online]. Available: <http://cpga.cz>. [Accessed: 23-Nov-2017].
- [6] O. Bičáková, M. Jeremiáš, M. Pohořelý, P. Straka, K. Svoboda and M. Šyc, *Nontraditional sources of energy, clean fuels and the new combustion methods*, Strategie. Prague: Středisko společných činností AV ČR, 2016, ISBN 978-80-200-2665-1.
- [7] M. Jeremiáš, M. Pohořelý, K. Svoboda, V. Manović, E. J. Anthony, S. Skoblja, Z. Beňo and M. Šyc, "Gasification of biomass with CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O mixtures in a catalytic fluidised bed", *Fuel*, vol. 210, pp. 605–610, 2017.
- [8] M. Pohořelý, M. Jeremiáš, K. Svoboda, P. Kameníková, S. Skoblja and Z. Beňo, "CO<sub>2</sub> as moderator for biomass gasification", *Fuel*, vol. 117, pp. 198–205, 2014.
- [9] M. Jeremiáš, M. Pohořelý, P. Bode, S. Skoblja, Z. Beňo and K. Svoboda, "Ammonia yield from gasification of biomass and coal in fluidized bed reactor", *Fuel*, vol. 117, pp. 917–925, 2014.
- [10] T. Malkow, "Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal", *Waste Manag.*, vol. 24, no. 1, pp. 53–79, 2004.
- [11] U. Arena, "Process and technological aspects of municipal solid waste gasification A review", *Waste Manag.*, vol. 32, no. 4, pp. 625–639, 2012.
- [12] D. O. Reimann, "CEWEP Energy Report II (Status 2004-2007)", 2009.



- [13] D. O. Reimann, "CEWEP Energy Report III (Status 2007-2010)", 2013.
- [14] S. H. Lee, N. J. Themelis and M. J. Castaldi, "High-temperature corrosion in waste-to-energy boilers", *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 104–110, 2007.
- [15] K. Persson, M. Broström, J. Carlsson, A. Nordin and R. Backman, "High temperature corrosion in a 65 MW waste to energy plant", *Fuel Process. Technol.*, vol. 88, no. 11–12, pp. 1178–1182, 2007.
- [16] J. De Greef, K. Villani, J. Goethals, H. Van Belle, J. Van Caneghem and C. Vandecasteele, "Optimising energy recovery and use of chemicals, resources and materials in modern waste-to-energy plants", *Waste Manag.*, vol. 33, no. 11, pp. 2416–2424, 2013.
- [17] M. Pavlas, M. Touš, P. Klimek and L. Bébar, "Waste incineration with production of clean and reliable energy", *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 13, no. 4, pp. 595–605, 2011.
- [18] P. Stehlík, "Up-to-date technologies in waste to energy field", *Rev. Chem. Eng.*, vol. 28, no. 4–6, pp. 223–242, 2012.
- [19] O. Gohlke, "Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the greenhouse gas balance", *Waste Manag. Res.*, vol. 27, no. 9, pp. 894–906, 2009.
- [20] M. J. Murer, H. Spliethoff, C. M. W. de Waal, S. Wilpshaar, B. Berkhout, M. A. J. van Berlo, O. Gohlke and J. J. E. Martin, "High efficient waste-to-energy in Amsterdam: getting ready for the next steps", *Waste Manag. Res.*, vol. 29, no. 10\_suppl, pp. S20–S29, 2011.
- [21] M. Bolhar-Nordenkampf and J. Isaksson, "Operating experiences of large scale CFB-gasification plants for the substitution of fossil fuels", in *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*, 2016, no. 24thEUBCE, pp. 375–381.
- [22] RICARDO-AEA, "Lahti Gasification Facility, Finland", 2013.
- [23] CPGA, "Technologie zplyňování METSO", 2017. [Online]. Available: <http://cpga.cz/aplikovane-technologie/metso>. [Accessed: 22-Nov-2017].
- [24] M. Morris and L. Waldheim, "Energy recovery from solid waste fuels using advanced gasification technology", *Waste Manag.*, vol. 18, no. 6–8, pp. 557–564, 1998.
- [25] V. Belgiorno, G. De Feo, C. Della Rocca and R. M. A. Napoli, "Energy from gasification of solid wastes", *Waste Manag.*, vol. 23, no. 1, pp. 1–15, 2003.
- [26] "Energos". [Online]. Available: <http://www.energus.com>. [Accessed: 23-Nov-2017].
- [27] CPGA, "Technologie zplyňování ENERGOS (pro energetické využití směsných

- komunálních odpadů)", 2017. [Online]. Available: <http://cpga.cz/aplikovane-technologie/energus>. [Accessed: 18-Nov-2017].
- [28] M. Pugh, A. Read and D. Mitchell, "The Energus gasification plant: early performance assessment", *Proc. Inst. Civ. Eng. - Waste Resour. Manag.*, vol. 164, no. 3, pp. 191–203, 2011.
- [29] G. del Alamo, A. Hart, A. Grimshaw and P. Lundstrøm, "Characterization of syngas produced from MSW gasification at commercial-scale ENERGUS Plants", *Waste Manag.*, vol. 32, no. 10, pp. 1835–1842, 2012.
- [30] C. Ellyin and N. J. Themelis, "Small scale waste-to-energy technologies", in *19th Annual North American Waste-to-Energy Conference, NAWTEC19*, Lancaster, PA, United States, 2011, pp. 169–176.
- [31] C. Ellyin, "Small Scale Waste-To-Energy Technologies", doctoral thesis, Columbia University, 2012.
- [32] M. Pohořelý, M. Jeremiáš, S. Skoblja, Z. Beňo, M. Šyc and K. Svoboda, "Transient Catalytic Activity of Calcined Dolomitic Limestone in a Fluidized Bed during Gasification of Woody Biomass", *Energy & Fuels*, vol. 30, no. 5, pp. 4065–4071, 2016.
- [33] J. Corella, J. M. Toledo and G. Molina, "Performance of CaO and MgO for the hot gas clean up in gasification of a chlorine-containing (RDF) feedstock", *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 16, pp. 7539–44, 2008.
- [34] K. Svoboda, J. Leitner, J. Havlica, M. Hartman, M. Pohořelý, J. Brynda, M. Šyc, Y.-P. Chyou and P.-C. Chen, "Thermodynamic aspects of gasification derived syngas desulfurization, removal of hydrogen halides and regeneration of spent sorbents based on  $\text{La}_2\text{O}_3/\text{La}_2\text{O}_2\text{CO}_3$  and cerium oxides", *Fuel*, vol. 197, pp. 277–289, 2017.
- [35] A. Ramos, E. Monteiro, V. Silva and A. Rouboa, "Co-gasification and recent developments on waste-to-energy conversion: A review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. March 2017, pp. 380–398, 2018.
- [36] M. Balas, M. Lisy, P. Kracik and J. Pospisil, "MUNICIPAL SOLID WASTE GASIFICATION WITHIN WASTE-TO-ENERGY PROCESSING", *MM Sci. J.*, vol. 2017, no. 2, pp. 1783–1788, 2017.
- [37] M. Fatih Demirbas, M. Balat and H. Balat, "Biowastes-to-biofuels", *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 4, pp. 1815–1828, 2011.
- [38] V. S. Sikarwar, M. Zhao, P. S. Fennell, N. Shah and E. J. Anthony, "Progress in biofuel production from gasification", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 61, pp. 189–248, 2017.