



## **TERMOLÝZNÍ ZPRACOVÁNÍ ZBYTKOVÉ BIOMASY, SEPAROVANÝCH PLASTOVÝCH A CELULÓZOVÝCH PODÍLŮ TUHÉHO KOMUNÁLNÍHO ODPADU PRO ENERGETICKÉ A SUROVINOVÉ VYUŽITÍ**

**Petr Jevič, Zdeňka Šedivá, Jan Malat'ák, Jiří Křížek**

### **CERTIFIKOVANÁ METODIKA**



**Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i. (VÚZT, v.v.i.), Praha  
PolyComp, a.s., Poděbrady**

Metodika je výstupem řešení projektu Ministerstva průmyslu a obchodu v programu „TIP“ ev. č. FR TI2/365 „Výzkum technologie umožňující materiálové a energetické využití nerecyklovatelných plastových, celulóзовých a jiných obdobných odpadů MEVO“. Jsou zde rovněž prezentovány dílčí výsledky věcné etapy 5 „Technologické postupy udržitelné výroby a užití biosurovin a energetických nosičů nové generace se zřetelem na potravinovou bezpečnost a globální trhy souvisejících produktů“ výzkumného záměru Ministerstva zemědělství MZe 0002703102.

Autorský kolektiv:

<b>Ing. Petr Jevič, CSc., prof. h.c.</b>	VÚZT, v.v.i., Praha
<b>Ing. Zdeňka Šedivá</b>	VÚZT, v.v.i., Praha
<b>Doc. Ing. Jan Malat'ák, Ph.D.</b>	ČZU v Praze
<b>Ing. Jiří Křížek</b>	PolyComp, a.s. Poděbrady

Editor: Ing. Zdeňka Šedivá

Oponenti: Ing. Vladimír Třebický, CSc. SGS Czech Republic, s.r.o., Divize paliv a maziv,  
U Trati 42, 100 00 Praha 10

Ing. Jiří Trnka CZ BIOM - České sdružení pro biomasu,  
U čtyř domů 1201/3, 140 00 Praha 4

© Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i. Praha, 2012

Odbor environmentální a ekologického zemědělství sídlem Ministerstvo zemědělství,  
Těšnov 147, 117 05 Praha 1 vydal 29. 10. 2012 osvědčení 04/2012 o uznání této certifikované  
metodiky v souladu s podmínkami „Metodiky hodnocení výsledků výzkumu a vývoje“.

ISBN 978-80-86884-67-7

Ministerstvo zemědělství (MZe)  
Těšnov 17, 117 05 Praha 1

Ministerstvo průmyslu a obchodu (MPO)  
Na Františku 32, 110 15 Praha 1



MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ



MINISTERSTVO  
PRŮMYSLU A OBCHODU

Ing. Petr Jevič, CSc., prof. h.c. a kol.

**Termolýzní zpracování zbytkové biomasy,  
separovaných plastových a celulózových  
podílů tuhého komunálního odpadu  
pro energetické a surovinové účely**

**CERTIFIKOVANÁ METODIKA**

Ing. Petr Jevič, CSc., prof. h.c. a kol.

## **TERMOLÝZNÍ ZPRACOVÁNÍ ZBYTKOVÉ BIOMASY, SEPAROVANÝCH PLASTOVÝCH A CELULÓZOVÝCH PODÍLŮ TUHÉHO KOMUNÁLNÍHO ODPADU PRO ENERGETICKÉ A SUROVINOVÉ ÚČELY**

Metodika, určená pro praktické použití v souvisejících oblastech, vychází ze zahraničních a vlastních výsledků výzkumu termolýzních technologických postupů pro energeticko-surovinové využití zbytkové biomasy a separovaných plastových a celulóзовých podílů tuhého komunálního a průmyslového odpadu. Jsou popsány vybrané technologické postupy a zařízení zkušebních, ověřovacích a předváděcích provozů. Uvedené doplňující příklady s analýzou hmotnostní a energetické bilance včetně kvality syntetického plynu a doprovodných produktů jsou určeny pro podporu a návrh směřování dalšího vývoje těchto technologií, které by mělo vyústit v ekologicky a ekonomicky nejvhodnější řešení průmyslového komerčního zařízení.

*Klíčová slova:* biomasa, tuhý komunální a průmyslový odpad, zplyňování, pyrolýza, syntetický plyn, biopaliva, biokapaliny

Petr Jevič, Ph.D., prof. h.c. et al.

## **PROCESSING OF RESIDUAL BIOMASS AND SEPARATED PLASTIC AND CELLULOSE FRACTIONS OF SOLID MUNICIPAL WASTE BY THERMOLYSIS FOR ENERGY AND MATERIAL PURPOSES**

The methodology, destined for practical use in related spheres, comes from foreign and our own research results of thermolysis technological processes for energy and material utilization of residual biomass and separated plastic and cellulose fractions of solid municipal and industrial waste. In the article there are described the selected technological processes and equipment in the bench scale, pilot plant and demonstration operational facilities. The mentioned additional examples with mass and energy balance analysis including the synthetic gas quality and accompanying products are intended for the support of further development and orientation of these technologies, which should lead to the environmentally and economically optimal design of industrial commercial equipment.

*Keywords:* biomass, solid municipal and industrial waste, gasification, pyrolysis, syngas, biofuels, bioliquids

## OBSAH

<b>I. CÍL METODIKY .....</b>	<b>6</b>
<b>II. VLASTNÍ POPIS METODIKY.....</b>	<b>6</b>
<b>II.1 Úvod.....</b>	<b>6</b>
<b>II.2 Právní úprava, terminologie a klasifikace související s termolýzním zpracováním         zbytkové biomasy a spalitelných částí tuhého odpadu.....</b>	<b>7</b>
<b>II.3 Příklady termolýzních technologií pro zpracování zbytkové biomasy a         spalitelných odpadů pro energeticko surovinové využití.....</b>	<b>9</b>
<b>II.3.1 Technologické procesy, jednotlivé operace a kroky termolýzy biomasy.....</b>	<b>9</b>
<b>II.3.2 Příklady technologií a zařízení určených k termolýze spalitelných odpadů a                 TAP .....</b>	<b>17</b>
<b>II.3.3 Inženýrská chemie technologií termolýzního zpracování spalitelných odpadů                 a TAP .....</b>	<b>19</b>
<b>II.3.4 Termolýzní procesy ověřené a vyvíjené v ČR.....</b>	<b>38</b>
<b>II.3.5 Orientační ekonomická a environmentální hlediska .....</b>	<b>43</b>
<b>II.4 Závěr .....</b>	<b>45</b>
<b>III. SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPU .....</b>	<b>47</b>
<b>IV. POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY.....</b>	<b>47</b>
<b>V. SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY .....</b>	<b>48</b>
<b>VI. SOUHRN PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE .....</b>	<b>51</b>

## I. CÍL METODIKY

Cílem metodiky je poskytnout ucelené informace a poznatky o současném stavu a perspektivách termolýzního zpracování zbytkové biomasy, energetických plodin a spalitelných podílů tuhých komunálních a průmyslových odpadů (biomasa, celulóza, plasty) pro energeticko-surovinové účely. Dále popsat vybrané technologické postupy a zařízení zkušebních, ověřovacích a předváděcích provozů. Následně uvést doplňující příklady analýz hmotnostní a energetické bilance, kvality syntetického plynu a souvisejících produktů, sloužících k podpoře rozhodovacích procesů a k vypracování nových technologických, ekologických a ekonomických návrhů směřování dalšího vývoje těchto technologií, které by mělo vyústit v provozně optimální řešení průmyslového komerčního zařízení.

## II. VLASTNÍ POPIS METODIKY

### II.1 Úvod

Na národní a unijní úrovni jsou vydány různé zákony řešící problematiku recyklace odpadů a jiné předpisy zaměřené na splnění ekologických požadavků. Hlavním záměrem této legislativy je snížit vypouštění a vyvážení odpadů, podpořit jejich recyklaci a zamezit nepovolenému nakládání s nimi. Hierarchie nakládání s odpady představuje nejdříve minimalizovat odpad, v druhém sledu odpad materiálově využít tříděním a recyklací, až následně jej využít energeticky. Je nutné podporovat způsoby využívání odpadů oproti doposud považujícímu zneškodňování, které je v hierarchii způsobů nakládání s odpady podle směrnice EP a Rady č. 98/2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic zařazeno až na poslední místo. Tato směrnice také definuje mj. odpad, nebezpečný odpad, biologický odpad a sběr odpadů.

Energeticko-surovinové využití se týká upravených odpadů neklasifikovaných jako nebezpečné. Vstupní odpad může být specifickým odpadem z výroby, tuhým komunálním odpadem, průmyslovým odpadem, odpadem ze staveb a demolic, dále čistírenským kal apod. Je tedy zřejmé, že z nich vyrobená tuhá alternativní paliva lze zařadit do heterogenní skupiny paliv. Energie z biomasy, ze skládkového plynu, z kalového plynu čistíren odpadních vod a z bioplynu patří mezi obnovitelné zdroje energie.

Klíčové jsou směrnice EP a Rady 2009/28/ES ze dne 23.4.2009, o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES (směrnice RED) a dále směrnice 2009/30/ES ze dne 23.4.2009, kterou se mění směrnice 98/70/ES, pokud jde o specifikaci benzínu, motorové nafty a plynových olejů, zavedení mechanismu pro sledování a snížení emisí skleníkových plynů (směrnice FQD). Tyto směrnice jsou zapracovány do zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, účinného od 1.9.2012 a do související legislativy. Zde se specifikují také požadavky na snížení emisí CO<sub>2eq</sub> z pohonných hmot a kritéria udržitelnosti biopaliv s certifikací jako nástrojem jejich dodržování.

Biomasa, mezi kterou je zahrnuta i biologicky rozložitelná část průmyslových a komunálních odpadů, je jediným obnovitelným zdrojem uhlíku, takže může dlouhodobě nahradit určitou část fosilních surovinových zdrojů a nosičů energie. Přitom se pro hromadné využití dají identifikovat především následující polohy problému. Biomasa, charakterizovaná velkou rozmanitostí, vzniká regionálně rozptýleně, tzn., musí být velkoplošně soustředěna a dopravována příslušně dlouhými cestami. Zvláště méně hodnotná biomasa, bohatá na popel, vykazuje nízkou objemovou energetickou hustotu (balíková sláma cca 2 GJ/m<sup>3</sup>). Také zde se klade otázka ekonomicky obhájitelných dopravních tras. Zvýšením hustoty energie biopaliva je možné podstatně snížit dopravu, skladované množství a náklady. Je třeba zajistit, aby

uplatněné postupy mohly zpracovat co největší šířku rozsahu použitých hmot. Biomasa je odnímána biosféře, pro dlouhodobé využití je třeba zaručit ekologicky únosný odběr suroviny. Obzvláště vysoký obsah popela mnohých biomas (sláma, seno, ale také dřevo z korun, rychlerostoucí dřevní podrost, křoviny atd.) působí při termochemických procesech problémy následkem koroze, slepování a zanášení v technických zařízeních. Syntézy pohonných hmot vyžadují syntetický plyn, prostý dehtu, s nízkým obsahem methanu při vysokých tlacích (Fischer-Tropschova syntéza do 30 bar, methanol a dimethylether do 80 bar) a nákladné čištění stopových prvků, které působí jako katalyzátorové jedy. Na druhé straně to ulehčuje nebo teprve umožňuje splnění přísných norem výfukových plynů při využívání plynné nebo kapalné pohonné hmoty.

Zplyňování a pyrolýza tuhých fosilních paliv jsou dlouhodobě užívanými, ověřenými a dále zdokonalovanými technologiemi. Jsou také již delší dobu považovány za velmi perspektivní i v oblasti výroby biopaliv nové generace z biomasy a energetického využití spalitelných odpadů. Přestože je výzkum v této oblasti předmětem širokého zájmu prakticky na celém světě a technologický vývoj výrazně pokročil, podle dostupných informací ani jedna technologie v komplexním systému od zajištění a logistiky vstupní suroviny, před vlastní termolýzou, až po využití všech výstupů zatím plně nedosáhla stavu efektivního průmyslového (komerčního) zařízení. Vedle toho existují u energetického využívání spalitelných odpadů legislativní bariéry. V zákoně o ochraně ovzduší je oproti dřívější právní úpravě nově zaveden pojem „tepelné zpracování odpadů“, který v sobě zahrnuje různé způsoby tepelného zpracování odpadu, nejen oxidační procesy, ale i procesy bez přístupu vzduchu. Dřívější zákon o ovzduší používal pojmy „spalovna odpadů“ a „spoluspalovací zařízení“. Tyto možnosti nebyly úplné, a proto se rozšířily i o další způsoby zpracování, jako jsou např. zplyňování, pyrolýza, anaerobní digesce. Pro postupné odstraňování administrativních překážek je důležité rozlišovat různé technologie energetického využití odpadu, který není klasifikován jako nebezpečný a na které se nevztahují stejné požadavky jako na spalovny odpadů. Je proto účelné připravit za účasti všech dotčených orgánů a zájmových institucí kritéria a požadavky pro stav, kdy jsou paliva z odpadů považována za výrobky, případně vedlejší produkty a mohly by tak být energeticky využívány mimo režim nakládání s odpady.

Metodika vychází z dostupných zahraničních zdrojů a vlastních výsledků výzkumu termolýzních technologických postupů pro energeticko surovinové využití zbytkové biomasy a separovaných plastových a celulózových podílů tuhého komunálního a průmyslového odpadu. Popisuje vybrané technologické postupy a zařízení zkušebních, ověřovacích a předváděcích provozů. Uvádí doplňující příklady hmotností energetické bilance a kvality syntézního plynu a doprovodných produktů. Je určena pro podporu a návrh možností dalšího vývoje těchto technologií a odstraňování administrativních bariér, ovlivňujících energetické využívání spalitelných odpadů.

## **II.2 Právní úprava, terminologie a klasifikace související s termolýzním zpracováním zbytkové biomasy a spalitelných částí tuhého odpadu**

Právní rámec problematiky zahrnuje předpisy Evropské unie a České republiky. V EU jde zejména o:

- směrnici EP a Rady (ES) č. 98/2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic;
- směrnici EP a Rady (ES) 2009/28/ES o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES (RED);
- směrnici EP a Rady (ES) 2009/30/ES, kterou se mění směrnice 98/70/ES, pokud jde o specifikaci benzínu, motorové nafty a plynových olejů, zavedení mechanismu pro sledování a snížení emisí skleníkových plynů (FQD).

Mezi základní zákony národního právního systému, jež se týkají této problematiky, patří:

- zákon č. 228/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky uváděné na trh, v posledním znění;
- zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech, ve znění novel. Tento zákon doznal mnoha změn. Kromě jiného došlo k významným změnám v ustanovení zákona novelou č. 314/2006 Sb. Bylo definováno tzv. malé zařízení, k jehož uvedení do provozu stačí souhlas obce s rozšířenou působností a byl stanoven obsah vyhlášky o nakládání s biologicky rozložitelnými odpady. Další významnou změnou byla novela č. 154/2010 Sb., která změnila některou terminologii odpadového hospodářství. Větší důraz klade na předcházení vzniku odpadů a zavádí výpočet energetické účinnosti při energetickém využití odpadů;
- zákon č. 76/2002 Sb., o integrované prevenci a omezení znečištění, o integrovaném registru znečišťování a o změně některých zákonů v platném znění;
- zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Obsah zákona byl dlouhou dobu předmětem diskuze a k jeho novelizaci došlo až zákonem č. 330/2010 Sb.;
- zákon č. 201/2012, o ochraně ovzduší.

Z prováděcích vyhlášek k uvedeným základním zákonům jsou nejdůležitější:

- vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrch terénu, ve znění pozdějších předpisů;
- vyhláška č. 381/2001 Sb., o přepravě odpadů, ve znění pozdějších předpisů;
- vyhláška č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, ve znění pozdějších předpisů;
- vyhláška č. 475/2005 Sb., kterou se provádějí některá ustanovení zákona o podpoře OZE, ve znění pozdějších předpisů;
- vyhláška č. 252/2001 Sb., o způsobu výkupu elektřiny a tepla, ve znění pozdějších předpisů;
- vyhláška č. 482/2005 Sb., o stanovení druhů, způsobů využití a parametrů biomasy při podpoře výroby elektřiny z biomasy, ve znění pozdějších předpisů.

V současnosti označené Nařízením vlády č. 446/2011 Sb., o kritériích udržitelnosti biopaliv, se k 1.9.2012 mění s ohledem na stejnou platnost nového zákona o ovzduší. Odbor ochrany ovzduší Ministerstva životního prostředí zpracoval metodický pokyn pro osoby autorizované k certifikaci procesu výrobního řetězce udržitelných biopaliv a ověřování zprávy o emisích u dodavatelů pohonných hmot v souladu se zákonem o ochraně ovzduší.

Terminologie a popis, týkající se této problematiky, jsou obsaženy ve směrnících o odpadech a RED. Podrobné definice, ke kterým je vhodné přihlížet, jsou uvedeny v normativních dokumentech:

- ČSN EN 14588 „Tuhá biopaliva - Terminologie, definice a popis“. ÚNMZ, červen 2011;
- ČSN EN 15357 „Tuhá alternativní paliva - Terminologie, definice a popis“. ÚNMZ, září 2011.

Současné technologie nejčastěji využívají ke zpracování upravenou biomasu a připravené spalitelné odpady. Úprava a příprava může zahrnovat třídění, drcení, mletí, separaci, prosévání, homogenizaci, zhutňování apod. na kvalitu, umožňující obchodování mezi výrobcí a uživateli. Příkladem tvaru takto získaných paliv jsou např. vlákenný prach, prášek, štěpky, vločky, brikety, pelety, balíky.

ČSN EN 14961-1 „Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 1: Obecné požadavky (červen 2010) stanovuje kvalitu pro třídy a specifikace tuhých biopaliv, tj. paliv vyráběných přímo nebo nepřímo z biomasy.



ČSN EN 15359 „Tuhá alternativní paliva - Specifikace a třídy (červen 2012) specifikuje klasifikační systém pro tuhá alternativní paliva (TAP) a vzory pro specifikaci jejich vlastností. TAP je definováno jako palivo připravené z odpadu neklasifikovaného jako nebezpečný, je použitelné pro energetické využití ve spalovacích nebo spalovacích zařízeních a splňuje požadavky na klasifikaci a specifikaci.

Povinnou specifikací TAP je mj. původ, obsah popela, obsah vody, výhřevnost a chemické složení. Obsah biomasy se stanovuje podle ČSN EN 15440 „Tuhá alternativní paliva - Metody stanovení obsahu biomasy“ (září 2011). Frakce biomasy mohou být vyjádřeny hmotností, obsahem energie nebo obsahem uhlíku. Obsah biomasy v procentech pomocí obsahu uhlíku je nezbytný v případě výpočtu emisí oxidu uhličitého fosilního nebo z biomasy na jednotku TAP.

### **II.3 Příklady termolýzních technologií pro zpracování zbytkové biomasy a spalitelných odpadů pro energeticko surovinové využití**

Cesty k výrobě syntézních paliv z fosilních surovin, především z uhlí a zemního plynu (CTL, GTL), jsou v principu již delší dobu známy. Pro zbytkovou biomasu ve formě tuhých biopaliv a organických odpadů (např. v podobě TAP) je třeba tuto cestu dokončit zavedením adekvátní průmyslové technologie. Současné výzkumné a vývojové práce jsou zaměřeny na chemická a inženýrská hlediska všech stupňů procesu výroby syntézního plynu, včetně jeho čištění a úpravy. Dnes je výroba syntézních paliv velmi žádaná, dá se říct, že je to jedna z nemnoha perspektivních řešení výroby biopaliv. Jako klíčový zprostředkovatel se jeví methanol, neboť ten může být dále přeměněn na kapalná paliva, jako je nafta a dimethylether, palivová aditiva, nebo může být přímo používán ve vysokoteplotních palivových člancích. Rovněž otevírá přístup k dalším důležitým chemickým produktům. Konečný krok, katalytická přeměna syntézního plynu na methanol nebo jiná paliva BTL a chemikálie, je komerčně vytvořený proces nevyžadující další zásadní vývoj.

#### **II.3.1 Technologické procesy, jednotlivé operace a kroky termolýzy biomasy**

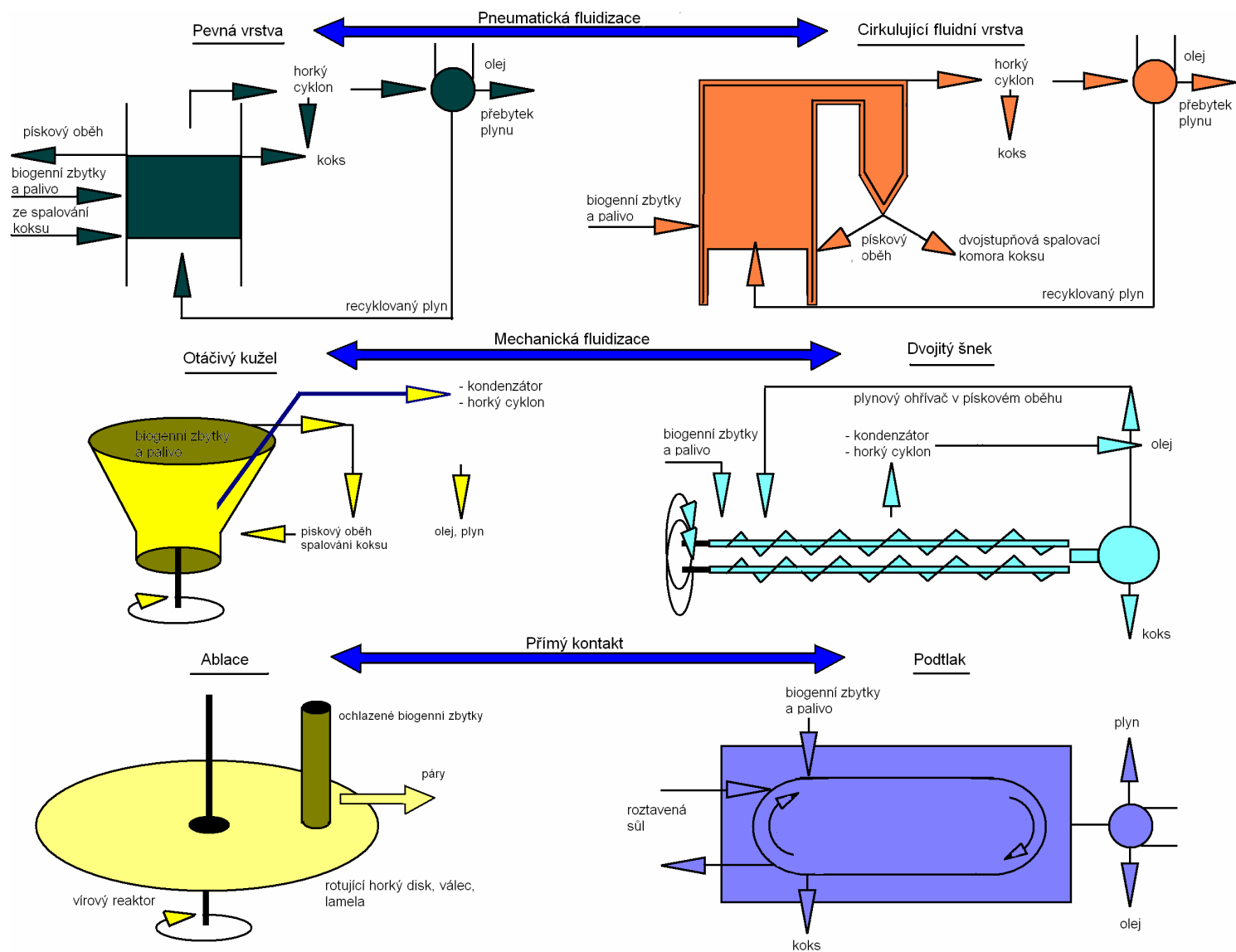
V současné době existuje principiálně šest různých technologických postupů při provádění pyrolýzy z biomasy. Schématický přehled ukazuje obr. 1.

Kvůli vysokým požadavkům na rychlou dopravu tepla a látek jsou často využívány reaktory používající k přenosu tepla horký písek. V případě stacionárních a oběhových fluidačních reaktorů se písek pneumaticky fluidizuje s plyny vznikajícími při spalování. Kromě toho jsou také v provozu reaktory, ve kterých se písek fluidizuje mechanicky buď pomocí otáčejícího se kuželu nebo dvojitým šnekem. Pro všechny reaktory, které používají písek, je společné, že potřebují rozemletí vstupní suroviny na velikost zrn 1 - 3 mm, aby se částice mohly ze všech stran rovnoměrně zahřát a byly zajištěny krátké cesty pro dopravu látek.

Další možnost, jak přivést teplo do biomasy, je přímý kontakt s horkým povrchem. Kvůli špatné tepelné vodivosti biomasy však často dochází jen k pyrolizaci kontaktní plochy a může pak dojít k ablaci.

Rychlá pyrolýza je charakteristická reakční teplotou okolo 500 °C s rozsahem 450 - 650 °C a retečným časem do 2 sekund. Zvláštní případ rychlé pyrolýzy představuje vakuová pyrolýza, při které jsou produkty velmi rychle odstraňovány z reakčního pásma. Výzkum je zaměřen ještě na kratší čas a podstatně vyšší teplotu.

Příkladem jsou následující demonstrační provozy, blíží se průmyslovému zařízení.



Obr. 1: Schéma základních principů technologického procesu rychlé pyrolýzy

*Dynamotive Energy Systems (zdroj: FNR - Biocrudeoil, 2008)*

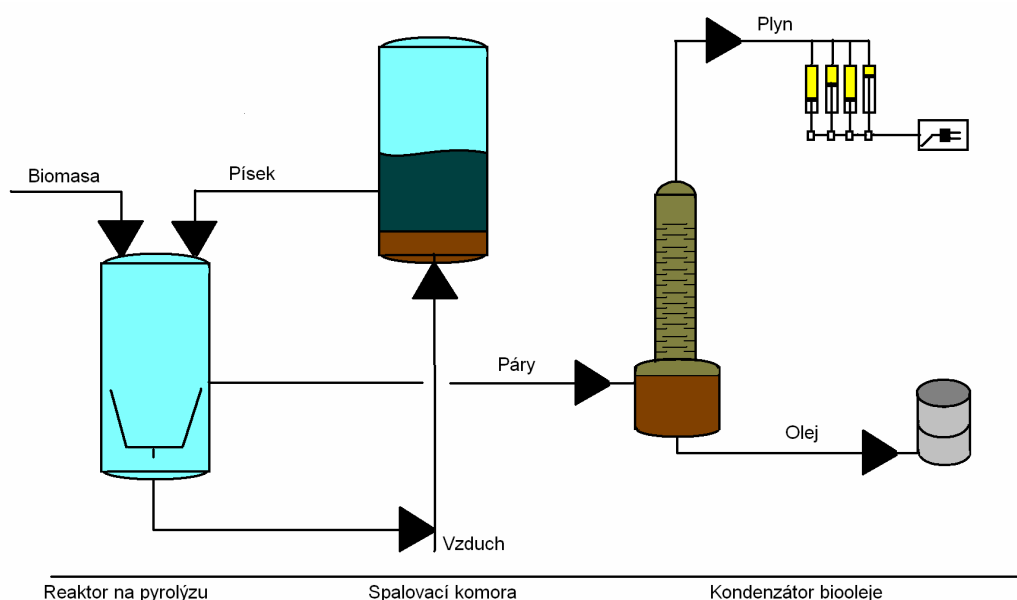
Firma Dynamotive Energy Systems ve Vancouveru vyvinula biotermální proces a staví zařízení se stacionárními fluidačními reaktory. První komerční zařízení stojí v blízkosti firmy vyrábějící parkety ve West Lorne (Ontario) a zpracovává 100 tun dřevěného odpadu za den na bioolej, plyn a koks. V současné době se zkouší využití těchto odpadních produktů k výrobě tepla a elektrické energie. K tomu se použije jak čistý bioolej, tak i směs biooleje a koksu v přebudované spalovně nebo v plynové turbíně firmy Orenda. Druhé zařízení provádějící pyrolýzu založenou na přeměně odpadního dřeva s kapacitou 200 t/den bylo uvedeno do zkušební provozu v roce 2007 v Guelphu blízko Toronta.

*Ensyn Corporation (zdroj: FNR - Biocrudeoil, 2008)*

Společnost Ensyn v Ottawě (Ontario, Kanada) vyvinula proces rychlého tepelného zpracování. V současné době má šest zařízení vybavených fluidačními reaktory. Bioolej se rozpadá na frakce a používá se částečně na výrobu aroma a chemických základních surovin. Zbývající část se využívá energeticky. Největší z těchto zařízení je v Renfrew (Ontario, Kanada), má kapacitu 200 t biomasy/den a zaměřuje se na výrobu pryskyřic, ko-polymerů a energie. Závod s kapacitou 70 t/den firmy Red Arrow, která je předním výrobcem kapalných kouřových aroma, je v provozu ve Wisconsinu.

*BTG-Genting Group (www.btg-btl.com)*

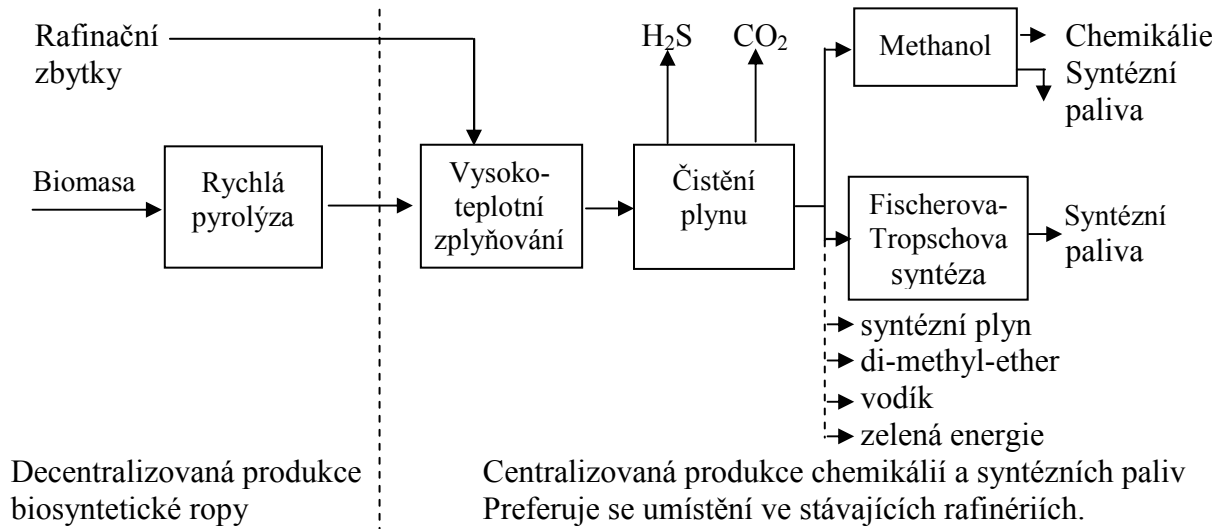
BTG (Technologická skupina pro biomasu) se sídlem v Enschede, Nizozemí (obr. 2) vyvinula společně s universitou Twente způsob rychlé pyrolýzy, který pracuje s pískem jako přenašečem energie, který se mechanicky fluidizuje s pomocí otáčivého kuželu. Písek se zároveň s uhlím odstraní z reakčního prostoru, znovu se spalováním koksu ohřeje na potřebnou teplotu a opět se přivede ke kuželu v reakčním prostoru. Společnost Genting postavila v Malajsii zařízení na pyrolýzu prázdných slupek z plodů olejnice (palmy olejné) o kapacitě 50 t/den. Olej získaný pyrolýzou se spaluje v olejovém hořáku k produkci tepla.



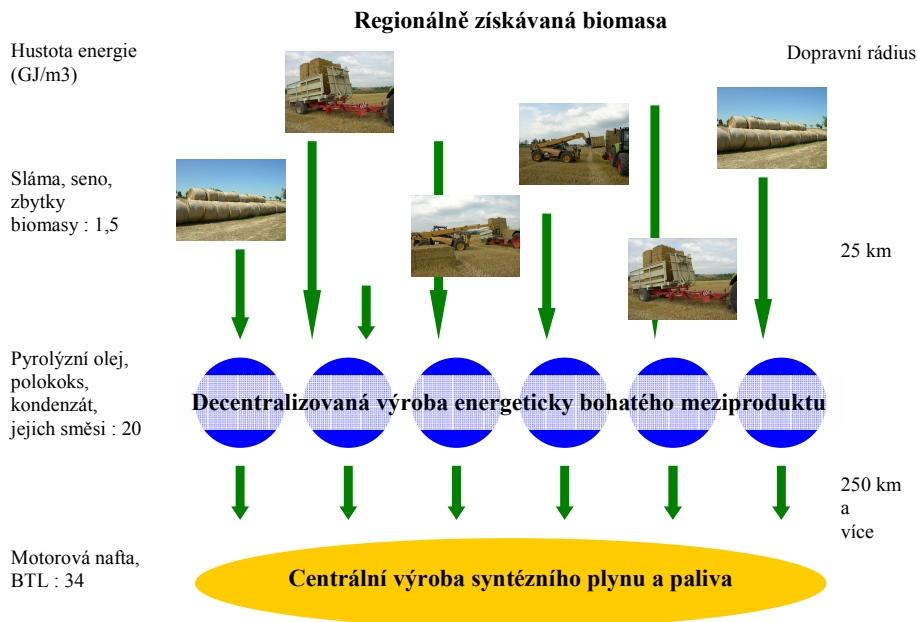
Obr. 2: Principiální schéma zařízení BTG - Biomass Technology Group (zdroj: www.btg-btl.com)

### Pyrolýzní proces LURGI/FZK

Syntézní biopaliva je možné také vyrábět vícestupňovým postupem BtL bioliq. Tento postup se rovněž vyvíjí ve Výzkumném centru Karlsruhe (Forschungszentrum Karlsruhe – FZK) ve spolupráci s firmou Lurgi. Blokové schéma tohoto postupu je uvedeno na obr. 3. Na obr. 4 je znázorněná použitelná koncepce decentralizované produkce biosyntetické ropy jako směsi pyrolýzního oleje a pyrolýzního koku a centralizovaného zpracování na chemická a syntetická paliva.



Obr. 3: Blokové schéma procesu bioliq s decentralizovanou koncepcí zpracování vhodných zbytků biomasy, energetických rostlin a bioodpadů (zdroj: LURGI AG)

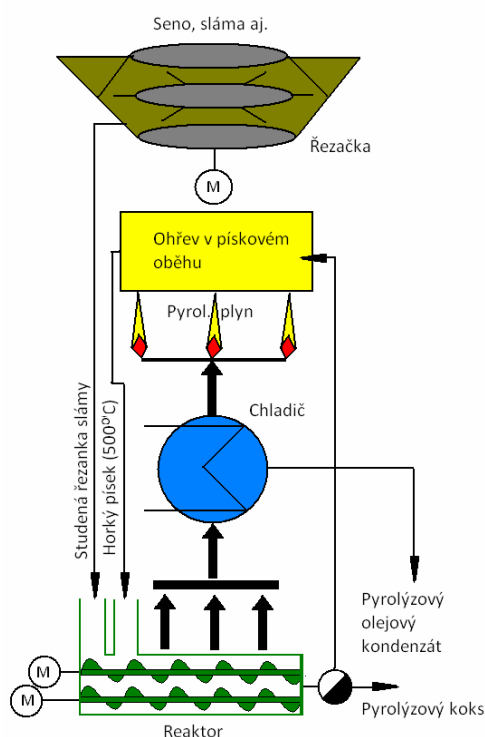


Obr. 4: Decentralizovaně-centralizovaná koncepce zplyňování „biokaše“ - koloidně smíšeného pyrolýzního oleje a pyrolýzního koku (zdroj: Dahmen, 2006)

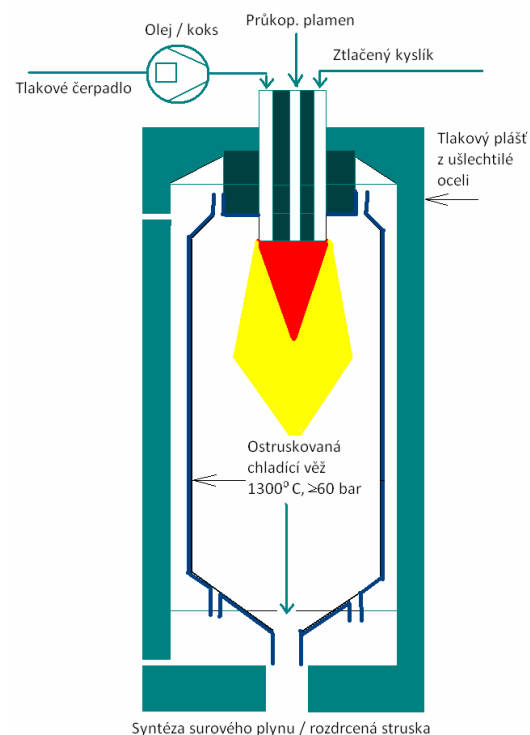
V prvním kroku se produkuje z decentralizovaně dodávané biomasy rychlou pyrolýzou olej a koks (viz obr. 5). Studené částice paliva jsou v pohyblivém, horkém písku rychle ohřáté na cca 500 °C a rovnoměrným tokem proháněny reaktorem, který pára z pyrolýzy v křížovém toku po krátké kontaktní době s pískovým povrchem uvnitř za několik

vteřin opustí. Přitom zde použitý reaktor LR (LURGI-RUHRGAS) - směšovací reaktor se již 40 let průmyslově využívá jako „Sand-Cracker“ k rychlé pyrolýze různých rafinérských produktů. Vznikající pyrolýzní plyn se může použít jako nosič energie k ohřevu. Vzniklý pyrolýzní koks a pyrolýzní kondenzát se směšují v koloidním mísíči na „biokaši“ (bioslurry) schopnou čerpání a dopravy s mnohonásobně vyšší hustotou energie.

Zvláštní na této biokaši je, že organický dehet a vodnatelný kondenzát s více než 30% hmotností koku existují ve stabilní směsi, aniž se fáze časem oddělují. Rychlopyrolýza je na tomto místě nutná, aby se pro produkci biokaše zachoval ideální směšovací poměr pyrolýzního kondenzátu k pyrolýznímu koku a umožnilo se trvalé využití obou komponentů. Mohou nastat signifikantní odchylky, které je třeba v dalším vývoji tohoto procesu brát v úvahu. Biokaše je rozprášena v ústředním vysokotlakém zplynovači s horkým kyslíkem a pod-stechiometricky (cca 1/3) při teplotách přes 1200 °C přeměněna na surový syntézní plyn prostý dehtu s nízkým obsahem methanu. Zplyňování přitom probíhá při vyšším tlaku než proces sériově zařazené syntézy, takže může odpadnout nákladná mezi-komprese. Zplyňovač proudu typu GSP (Gaskombinat „Schwarze Pumpe“) se hodí obzvláště ke zplyňování biomasy bohaté na popel, protože byl vyvinut v bývalé NDR Německým ústavem paliv (Deutsche Brennstoff Institut - DBI) ve Freibergu (Sasko) speciálně pro zplyňování německého slaneého hnědého uhlí. To umožnilo použití chladicí věže, ve které se popel jako tekutá struska sráží a odchází z reaktoru (obr. 6). Vhodnost tohoto typu zplyňovače byla v dosavadních testovacích kampaních s různými biokašemi a provozními parametry s průkopnickým zplyňovačem o výkonu 3 - 5 MW u FUTURE ENERGY Freiberg prokázána. Přitom byly použity biokaše s obsahem koku až do 40 % m/m hmotnosti, ze kterých byl vyroben syntézní plyn bez dehtu s nízkým obsahem methanu (<0,1 % V/V), obsahující 43 - 50 % V/V CO, 20 - 30 % V/V vodíku a 15 - 18 % V/V CO<sub>2</sub>.

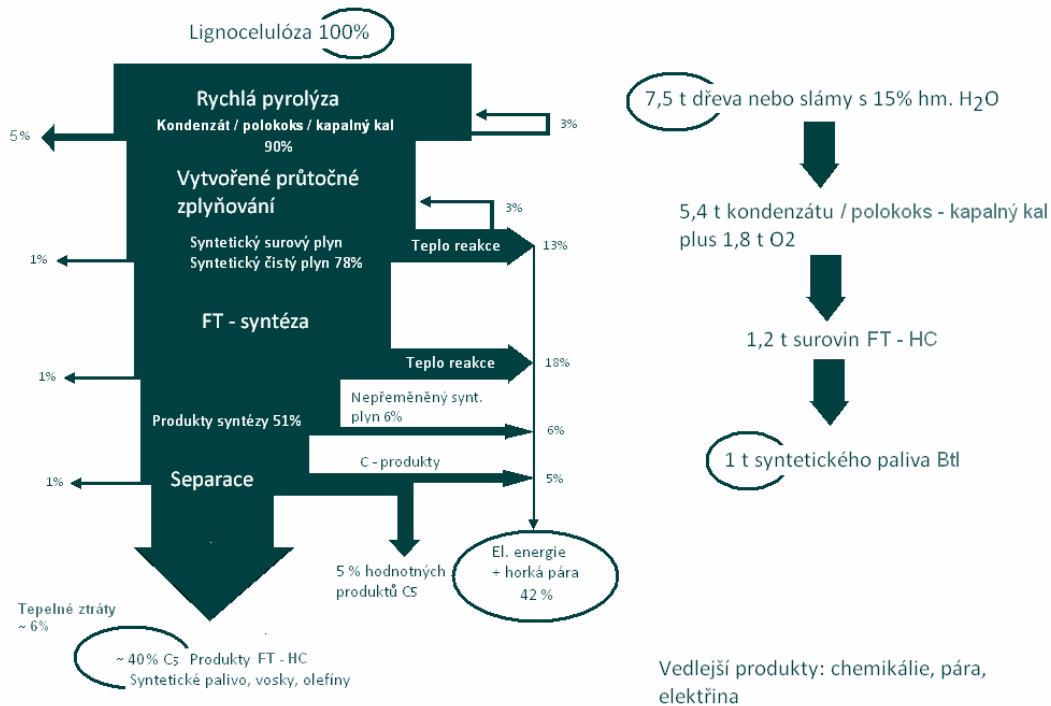


Obr. 5: Schéma principu rychlé pyrolýzy s dvoušnekovým mísícím reaktorem FZK (Forschungszentrum Karlsruhe) (zdroj: Dahmen, 2006)



Obr. 6: Schéma principu vysokotlakového zplyňovače v letícím proudu GSP – Gaskombinat „Schwarze Pumpe“ (zdroj: Dahmen, 2006)

Syntézní plyn je dále vyčištěn, kondicionován a přiveden již pod procesním tlakem k chemické syntéze. Produkce syntézních pohonných hmot ve velkém měřítku je již provozním stavem techniky. To ukazuje např. firma SASOL, která se svými zařízeními Coal-to liquid - CTL produkuje z kamenného uhlí více než 6 mil. t/rok Fischer-Tropsch (FT) produktů. Tímto způsobem může být z cca 7,5 t vzduchem sušené slámy vyrobeno cca 1,5 t syntézní pohonné hmoty. Přitom zůstává necelých 50 % energie původně obsažené v tekutém produktu. Jako vedlejší produkty jsou vyráběny teplo a proud, kterými se dá zcela pokrýt potřeba energie celého procesu. Energetickou a hmotnostní bilanci procesu bioliq uvádí obr. 7.



Obr. 7: Energetická a hmotnostní bilance procesu bioliq – Lurgi & FZK (2008)

Dosavadní práce ukazují, že také biokaše s vysokým obsahem koku z produktů pyrolýzy biomasy mohou být čistým kyslíkem ve zplyňovači s letícím proudem přeměněny při vysokých tlacích spolehlivě a úplně na syntézní plyn bez dehtu. Tento postup je prakticky vhodný pro všechny hmoty, které při rychlopyrolýze poskytují dostatečně stabilní kondenzát pro suspenzi koku v prášku: vedle slámy také ostatní stébelnatá zbytková biomasa, jako seno neupotřebitelné jako krmivo, ale také dřevo a papírové a lepenkové odpady. V současnosti se proces optimalizuje v rámci vývoje ověřovacího provozu s výkonností 500 kg.h<sup>-1</sup> vstupní biomasy.

#### Zařízení pro zplyňování biomasy s konfigurací vnitřně cirkulující fluidní vrstvou (FICFB) v Güssingu

Kompaktní konstrukce a nasazení páry jako zplyňovacího prostředku vedou k produkčnímu plynu bez inertů o střední výhřevnosti cca 13 MJ/m<sup>3</sup>. Proces byl vyvinut na TU Vídeň ve spolupráci s AE-Energetik. Na počátku existovalo testovací zařízení o výkonu 10 kW<sub>th</sub>, později ještě 2 zkušební zařízení po 100 kW<sub>th</sub>. V roce 2000 bylo v rámci projektu EU vybudováno zkušební zařízení o výkonu 500 kW<sub>th</sub>. V roce 2001 bylo v Güssingu úspěšně uvedeno do provozu demonstrační zařízení o výkonu 8 MW<sub>th</sub>. Toto zařízení slouží k získávání proudu a tepla a je napojeno na dálkovou tepelnou síť. S dílčím tokem

produkčního plynu tohoto zařízení byly provedeny experimenty za účelem syntézy methanu (spolupráce s PSI, Švýcarsko). Schéma průběhu postupu znázorňuje obr. 8.

Jako ložný materiál byl použit olivín (také dolomit, oxid hlinitý, Ni-katalyzátor), který musí být kontinuálně obnovován přídavkem 80 kg/hod. Tepelná kapacita demonstračního zařízení v Güssingu činí 8 MW<sub>th</sub>, což koresponduje s potřebou zbytkového dřeva cca 2 t/hod. Ve spalovacích motorech se získávají z vyrobeného plynu 2 MW<sub>el</sub> a 4,5 MW<sub>th</sub>, kterými se napájí dálková tepelná síť.

Produkční plyn je nejprve ochlazen ve výměníku tepla na cca 150 °C, vyčištěn ve tkaninovém filtru a návazně se dostává do pračky, provozované s methylestery mastných kyselin (FAME). Zbytky z praní FAME se separují do organických a kapalných frakcí. Spalitelné části jsou přiváděny ke spalování na koks, kapalných částí se využívá k výrobě páry. Účinnost studeného plynu (vztaženo na výhřevnost) demonstračního zařízení v Güssingu se udává 70 %.

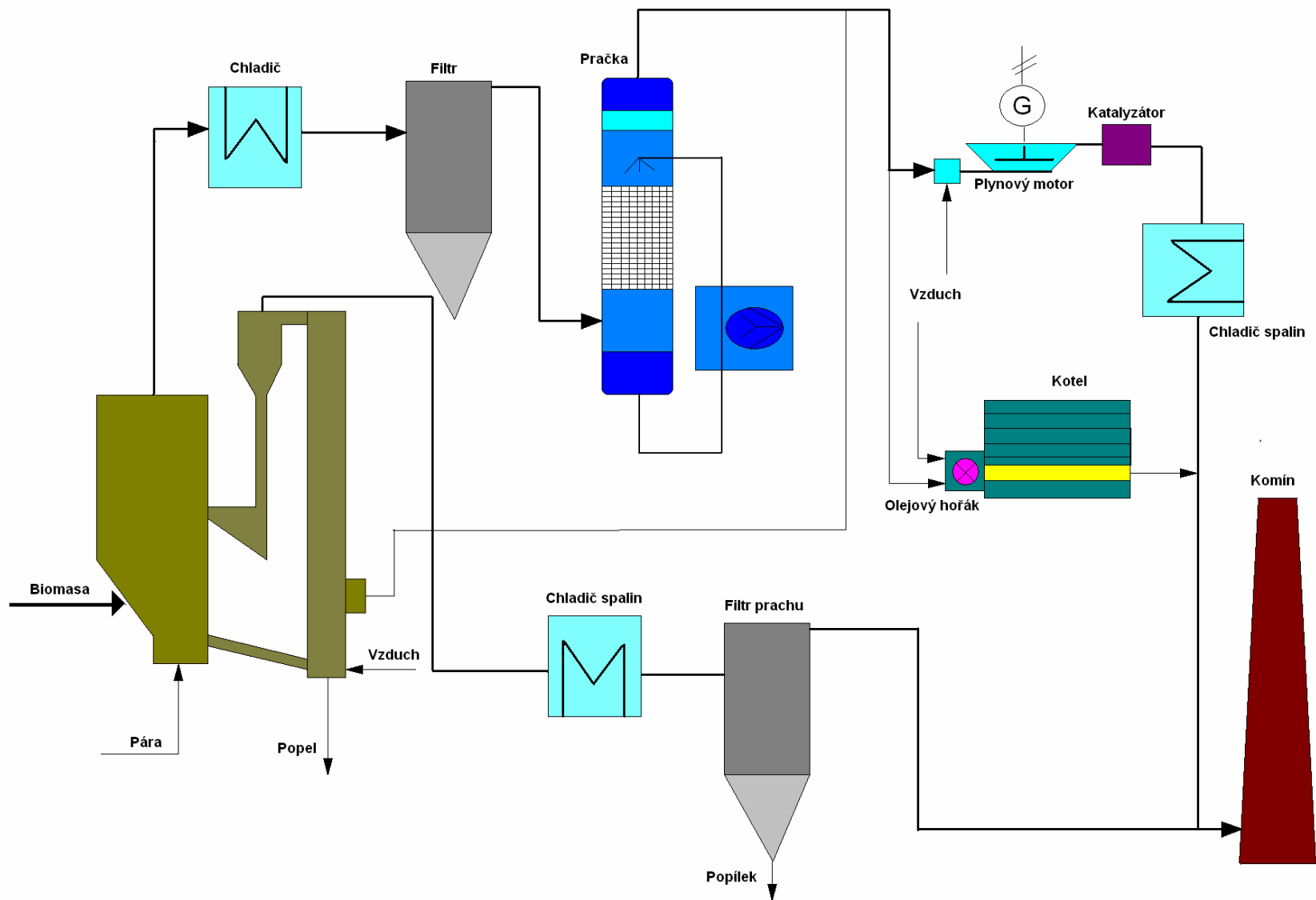
Demonstrační zařízení „Turn-Key“ v Güssingu s tříroční fází optimalizace může být odhadnuto na 10 mil. €. Nové zařízení tohoto velikostního řádu by stálo 8 - 9 mil. €. Zařízení v Güssingu bylo podpořeno 50 %, musí být ale provozováno se ziskem, aby uhradilo bankovní kredit. Provozní náklady činí ročně asi 10 - 15 % investičních nákladů. Hospodárný provoz zařízení je dosažitelný za 6 000 provozních hodin ročně. Demonstrační zařízení v Güssingu bylo od počátku roku 2002 provozováno kolem 7000 hodin, z toho asi 720 hodin v dlouhodobém provozu. Počáteční těžkosti existovaly s korozí a znečišťováním výměníku tepla a v jeho navazujících částech.

#### *CHOREN, postup Carbo-V<sup>®</sup> ve Freibergu*

V postupu Carbo-V<sup>®</sup> v CHOREN je autotermní (přímé) nízkoteplotní zplyňování spojeno s autotermním zplyňováním v letícím toku, ve kterém jsou transformovány pyrolýzní plyn a pyrolýzní koks vyrobené při nízké teplotě. Tento dvoustupňový postup potřebuje k provozu kyslík jako zplyňovací prostředek, aby mohl být vyroben syntézní plyn. Vyrobený produkční plyn, téměř bez dehtu a methanu, konvertuje (po odloučení CO<sub>2</sub>) v jednom syntézním kroku na methanol, případně na Fischerovy-Tropschovy uhlovodíky. Obr. 9 schématicky ukazuje průběh postupu. V prvním stupni je usušená biomasa (obsah vody 15 - 25 %) transformována ve zplyňovači o nízké teplotě částečnou oxidací s kyslíkem při 400 - 600 °C na dřevěné uhlí a plyn. V následně zařazeném vysokoteplotním zplyňovači je plyn spalován při teplotách 1400 - 1500 °C v horní části reaktoru s kyslíkem. Vyrobené plyny slouží jako zplyňovací prostředek pro zplyňování koksu ve spodní části reaktoru. Popel odpadá jako tekutá struska a je ve spodní části reaktoru ze systému odstraňován. Produkční plyn je ochlazován, zbavován prachu a čištěn v pračce. Po prátí a oddělení CO<sub>2</sub> jsou plyny přiváděny k syntéze methanolu.

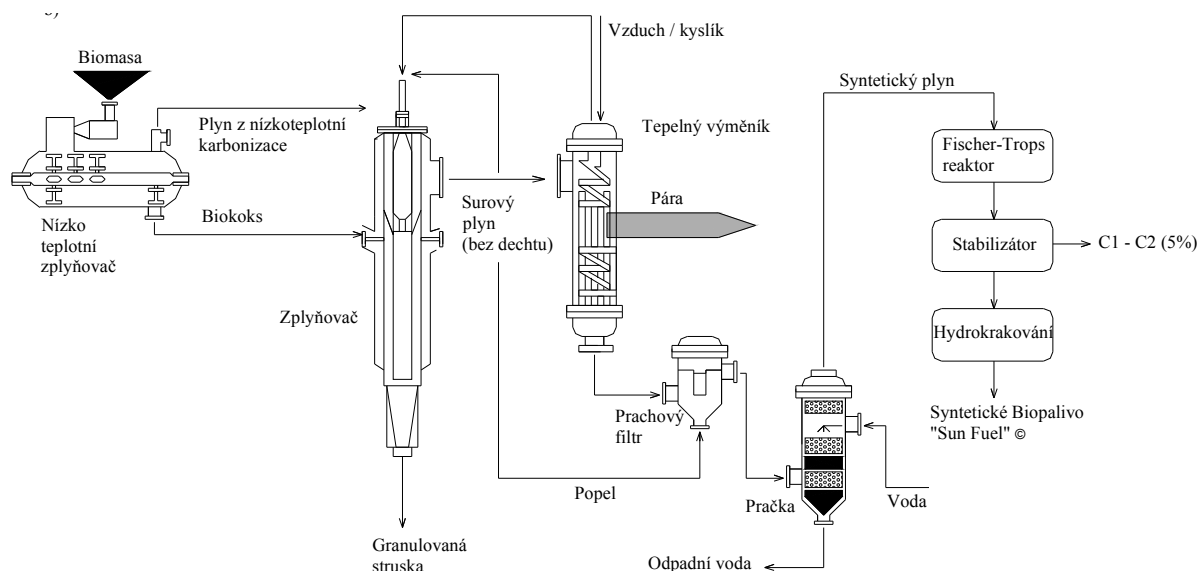
Podle údajů z CHOREN se pohybuje účinnost výroby BtL - methanolu vztaženo na výhřevnost methanolu  $H_u / (H_u \text{ výhřevnost vstupní biomasy} + \text{pomocná energie})$  kolem 50 %. Vypočtené náklady na produkci methanolu jsou pro zařízení velikostní třídy 500 MW<sub>th</sub> a ceně dřevních zbytků 70 €/t asi cca 400 €/t<sub>MeOH</sub>. V CHOREN provedená studie ukázala, že logistika biomasy a velikost zařízení silně ovlivňují výrobní náklady.

V roce 1998 bylo uvedeno do provozu průkopnické zařízení o kapacitě 1 MW<sub>th</sub> ve Freibergu. Za časové období přes 3 roky byly podle CHOREN vyzkoušeny různé nasazené hmoty. Vyrobený syntézní plyn byl použit k syntéze methanolu, případně k Fischer-Tropschově syntéze. V pololetí 2003 byla 1 tuna methanolu vyráběna o čistotě 99,95 % a dodávána firmě Daimler-Chrysler. Přestože jde z hlediska know-how o jednu z nejvyspělejších technologií pro výrobu BTL, další kroky k realizaci komerčního zařízení nebudou jednoduché, protože společnost CHOREN oznámila 8.7.2011 platební neschopnost a jako jeden z důvodů podcenění cen vstupů a jejich dostupnost.



Obr. 8: Technologické schéma zařízení s vnitřně cirkulujícím fluidním ložem – FICFB Güssing – TU Wien (zdroj: Bandi, A., 2007)





Obr. 9: Schéma výroby syntézního plynu a BTL (SunFuel<sup>®</sup>) společnosti CHOREN (zdroj: Bandí, A., 2007)

### II.3.2 Příklady technologií a zařízení určených k termolýze spalitelných odpadů a TAP

Uplatňují se především technologické procesy zplyňování a pyrolýzy a jejich kombinace. Hydrolýza byla použita pouze v pokusném měřítku u čistírenských kalů, ale nikoliv v případě tuhého komunálního odpadu a tříděného komunálního a průmyslového odpadu. Z tohoto důvodu není k dispozici žádný příklad složení vyrobeného plynu. Hydrolýza je endotermická reakce. Tam, kde hydrolýza vyžaduje vyšší teploty, například při zpracování tříděného komunálního a průmyslového odpadu, bude celý proces pravděpodobně méně efektivní, protože bude docházet k větším ztrátám tepla z reaktoru. Na druhé straně hydrolýza čistírenských kalů při teplotě 150 – 180 °C a tlaku 5 – 10 barů je zvláště efektivní při rozkládání komplexních organických látek, jako jsou bílkoviny, lipidy (tuky) a vlákna celulózy na snadno stravitelné látky. Hydrolýza kombinovaná s anaerobní digescí byla použita ke zpracování 70 tun kalů denně v Hamaru v Norsku. Hydrolýza probíhající za vysokého tlaku zničí všechny patogenní mikroorganismy v kalu a umožní, aby mohly být tuhé zbytky z anaerobní digesce rozmetány na půdu.

Kryogenní technologie, probíhající za velmi nízkých teplot, jsou používány jako jeden ze způsobů zacházení s nebezpečnými odpady, jako jsou např. barvy, pryskyřice, lepidla, tmely a kliš. Avšak tento způsob má omezené užití u smíšených odpadů a jen málo, popř. vůbec, se nepoužívá u tuhého komunálního odpadu.

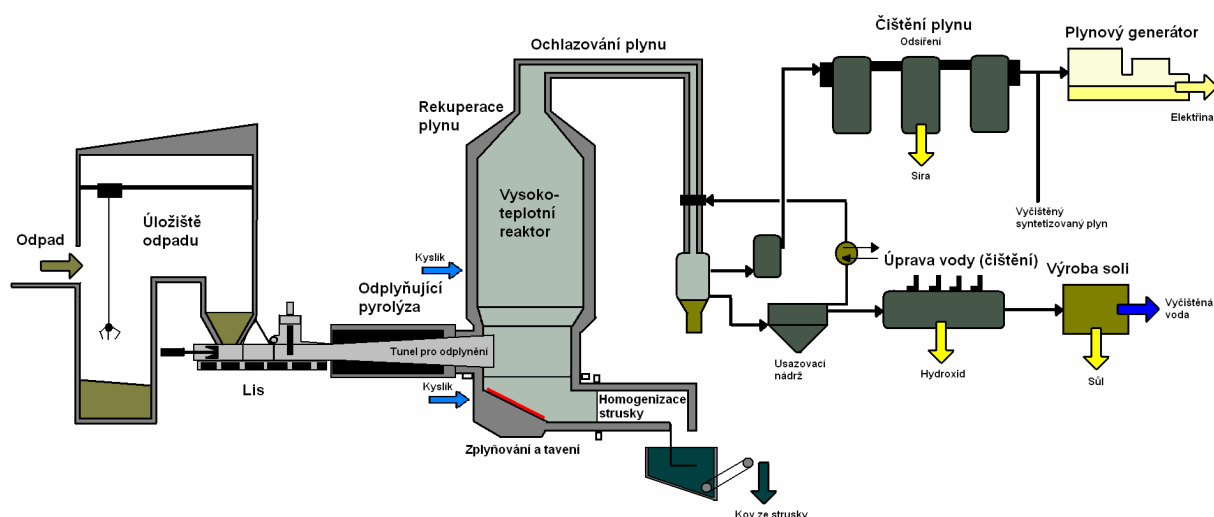
Procesy zplyňování a pyrolýzy vždy produkují plyn. Kromě toho mohou být optimalizovány tak, aby vyráběly hlavně syntézní plyn, který má vysokou výhřevnost. Zplyňovací reakce, probíhající nejčastěji při teplotách 600 - 1200 °C, jsou exotermické i endotermické. Uvolňovaná energie může být použita k ohřátí přiváděného odpadu nebo TAP do zplyňovacího reaktoru, čímž se zvyšuje tepelná účinnost. Pyrolýza je procesem endotermickým a provádí se za nepřístupu kyslíku (nebo vzduchu). Vedle již zmíněné rychlé pyrolýzy je její modifikace karbonizace (suchá destilace) a torefakce, rozvíjená u tuhých biopaliv. S ohledem na různé modifikace je typický rozsah teplot 250 - 1200 °C. Velkou výhodou pyrolýzy je získání užitečných vedlejších produktů, jako jsou kovy nebo chemické sloučeniny, přičemž rekuperace energie má doplňkový přínos. Dále se uvádí příklady zplyňovacích a pyrolýzních technologií.

*Bergau (Waste Gen UK Ltd, www.wastegen.com)*

V roce 1992 vybudovaný závod je založen na pyrolýze probíhající v rotační peci a splňující německé i evropské emisní požadavky. Vyrobený syntézní plyn je spalován v kotli. Skutečnost, že tento proces nebyl aplikován i někde jinde, vede k domněnce, že stavební a provozní náklady u tohoto závodu jsou vyšší než při hromadném spalování. Je pravděpodobné, že se tato ekonomická nevýhoda v budoucnu změní po zavedení účinných plynových turbín na spalování syntézního plynu.

*Thermoselect (www.thermoselect.ch)*

Standardní průběh zpracování při vysokoteplotním procesu je uveden na obr. 10. Odpady jsou slisovány bez předběžného zpracování, poté následuje sušení a pyrolýza nepřímým ohřevem v odplyněném tunelu. Odpad rozložený teplem je potom dávkován do reaktoru, kde dochází k jeho roztavení vysokou teplotou a reakcí s kyslíkem a vysokou teplotou uvolněným uhlíkem, přičemž vzniká plyn. Tento plyn prochází procesem rekuperace, ochlazování a čištění a výsledkem je čistý syntézní topný plyn. Přitom dojde k utlumení tvorby dioxinů na absolutní minimum.



Obr. 10: Schéma technologického procesu Thermoselect (zdroj: Yamada, S. et al., 2004)

Tento proces pyrolýzy a zplyňování se už blíží k obchodnímu využití. Tato technologie je však podle McKay Group LLC, 2009 drahá. Přednostní použití kyslíku místo vzduchu nezdůvodňuje mimořádné náklady, i když se vezme v úvahu přidaná hodnota vyrobeného syntézního plynu. Tento proces také používá značné množství energie k vitrifikaci popelu za velmi vysokých teplot (až 2000 °C). Takové použití energie je obtížné obhájit, když se uváží, že popel se může spékat již při 850 °C, aby tak vznikl poměrně stabilní zbytek pro bezrizikovou skládku odpadu. Vysoké investiční i provozní náklady jsou zřejmě hlavními důvody, proč její průmyslové využití není zatím komerčně úspěšné.

*Rowitec (Lurgi Energie, www.lurgi-lentjes.com)*

Tento systém s cirkulující fluidní vrstvou je založen na skloněné bublající fluidní vrstvě a nabízí ho společnost MG Engineering (Lurgi Energie). Systém údajně umožňuje, aby byly do fluidní vrstvy přiváděny velké částice (400 mm), což významně omezí předběžné zpracování a hodí se tak zvláště pro zpracování tuhého komunálního odpadu. Existuje několik úspěšných zařízení, největší z nich zpracovává 300 000 tun tuhého komunálního odpadu ročně s využitelností přes 91 %.

*Compact Power (Compact Power, [www.compactpower.co.uk](http://www.compactpower.co.uk))*

Tento proces používá pyrolýzu, po které následuje zplyňování. Úsek pyrolýzy je tvořen určitým počtem modulovaných trubek, z nichž každá je schopna zpracovat 500 kg/h na plyn, zuhelnatělé zbytky a inertní látky. Zplyňovač využívá reakci mezi vodou a plynem k produkci vodíku a oxidu uhelnatého, které jsou potom okysličený za vysokých teplot v tepelné sekci. Plyn prochází kotlem na regeneraci tepla, který vyrábí páru sloužící k pohonu turbíny a tak dochází k rekuperaci energie. Tento systém se zdá být přizpůsobivější ke změnám poptávky kvůli sekci modulové pyrolýzy. Je možné konstatovat, že takovéto provozy jsou vhodné pro menší lokality a mají více diverzifikovaný přístup k hospodaření s odpady.

*SWERF (Brett Group of Companies, [www.brett.co.uk](http://www.brett.co.uk))*

Jde o zařízení na zpracování tuhého odpadu a recyklaci. V tomto procesu jsou použity pyrolýza a zplyňování. Avšak generátor plynu v tomto provedení funguje jako parní reformátor, dodávající syntézní plyn zpět k pohonu sekce pyrolýzy. Tento plyn se potom používá přímo k pohonu turbíny.

*WasteGen (Waste Gen UK Ltd, [www.wastegen.com](http://www.wastegen.com))*

V tomto systému jsou materiály a energie získávány z toku přiváděných odpadů tradičním procesem třídění, po kterém následuje proces výroby plynu pyrolýzou. Tato pyrolýza se provádí v rotační peci zahřívané zvnějšku. Plyn je poté spalován v plynové turbíně, nebo je použit jako palivo ve spalovací komoře k získání páry sloužící k pohonu parní turbíny. Účelem procesu separace je odstranění nevhodných materiálů schopných kompostování nebo recyklace, v obou případech mechanicky, a je-li to nutné tak i ručním tříděním. Tento proces může být určen k maximalizaci požadovaného množství recyklovatelných a kompostování schopných materiálů a je zde i možnost jeho úpravy v závislosti na měnící se situaci na trhu. Proces pyrolýzy je schopný významných změn, pokud jde o přiváděné palivo a může nejen splnit, ale i překročit požadavky všech dosud platných i předpokládaných legislativních úprav.

*Energos (Energos, [www.energus.com](http://www.energus.com))*

Tento systém používá dvoukomorovou pyrolýzní spalovací pec pracující v semi-kontinuálním režimu. Spalovací pec má primární a sekundární komoru. Ke spalování tuhých frakcí paliva dochází v primární komoře, zatímco hořlavé plyny uvolňované v této komoře jsou spalovány v sekundární komoře. Kotel získávající energii z kouřových plynů je spojen se spalovací pecí. Tento kotel je spojen s kouřovým a vodovodním potrubím používaným k regulaci teploty vypouštěného kouřového plynu předehříváním napájecí vody. Kouřový plyn vstupuje do čistícího systému kouřových plynů z kotle. Čistící systém je vybaven filtrem zachycujícím prachové částice v plynu, zásobníkem na vápno, skladovací jednotkou na aktivní uhlí a prachovým filtrem se zásobníkem. Filtrační koláč se odstraňuje mechanicky ze dna filtru a je dopravován pneumaticky do zásobníku prachových částic.

### **II.3.3 Inženýrská chemie technologií termolýzního zpracování spalitelných odpadů a TAP**

Pro podrobné posouzení chemické reakce zplyňování, pyrolýzy a hydrolýzy je nutné znát chemický vzorec pro obsah uhlíku, vodíku a kyslíku v odpadu určeném k využití. Zplyňování, pyrolýza a hydrolýza obvykle probíhají za mírně nižších teplot, než jsou ty, které se používají při spalování. Rychlosti reakcí jsou nižší, a proto se běžně používají spíše tříděné frakce komunálního a průmyslového odpadu (TAP) než surový odpad.

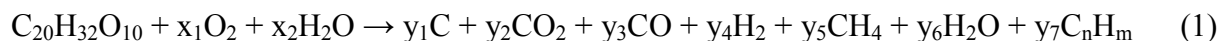
Williams et al., (1998) udává atomové složení hmoty úplně vysušené frakce tříděného komunálního a průmyslového odpadu takto: uhlík 55 %, vodík 7,3 % a kyslík 35,9 %. Konverzí hmotnostní frakce na množstevní frakci je možné zapsat stechiometrické složení modelového paliva takto:  $C_{20}H_{32}O_{10}$ . Tab. 1 ukazuje podobným způsobem atomové složení celé řady složek odpadů. Z tab. 1 je patrné, že vzorec  $C_{20}H_{32}O_{10}$  je vyhovující pro mnohé složky odpadů. V případě papíru by mohl být přesnější vzorec  $C_{20}H_{32}O_{13}$ .

Tabulka 1: Stechiometrické složení organických materiálů (zdroj: Williams et al., 1998)

Materiál	Uhlík	Vodík	Kyslík
Noviny	20,00	29,79	13,13
Časopisy	20,00	32,69	15,07
Směs novin a časopisů	20,00	32,18	15,31
Tetra Pak	20,00	37,51	7,64
Kartónové obaly vlnité	20,00	31,28	15,41
Ostatní kartóny	20,00	31,28	15,41
Čalounění	20,00	31,08	13,89
Kožené boty	20,00	30,39	8,15
Nečistoty z vysavačů	20,00	31,81	8,44
Odpad z konzumní zeleniny	20,00	32,38	11,48
Zbytky vařeného masa	20,00	38,14	6,20
Smažené tuky	20,00	37,87	3,04
Travní zeleň	20,00	30,97	11,83
Listy	20,00	28,12	8,73
Stromová zeleň	20,00	30,65	12,65
Stále zelené keře	20,00	32,36	12,50
Kvetoucí rostliny	20,00	34,01	12,92
Dřevo	20,00	28,39	12,60
TAP (tříděný průmyslový a komunální odpad)	20,00	31,85	9,79

### Zobecněné chemické reakce a energetické bilance

Jestliže se použije příslušný chemický vzorec pro odpad tak, jak je výše odvozen, potom může být obecná chemická rovnice, zahrnující zplyňování, pyrolýzu, hydrolýzu a spalování, zapsána následujícím způsobem v souladu s McKay Group LLC, 2009:



Koeficienty  $x$  a  $y$  jsou vybrány k vyvážení sloučenin na obou stranách rovnice.  $C_nH_m$  obvykle zahrnuje  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_4H_{10}$ ,  $C_5H_{12}$  a  $C_6H_6$ . Voda je zahrnuta do obou částí rovnice – pro hydrolýzu je to vstup a pro spalování výstup. Přesná kombinace plynů na pravé straně rovnice závisí na teplotě, při které reakce probíhá, a také na tom, jak rychle se plyny ochlazují. Správný ukazatel výroby plynu může být často určen z chemické rovnováhy atomových sloučenin při teplotě reakce.

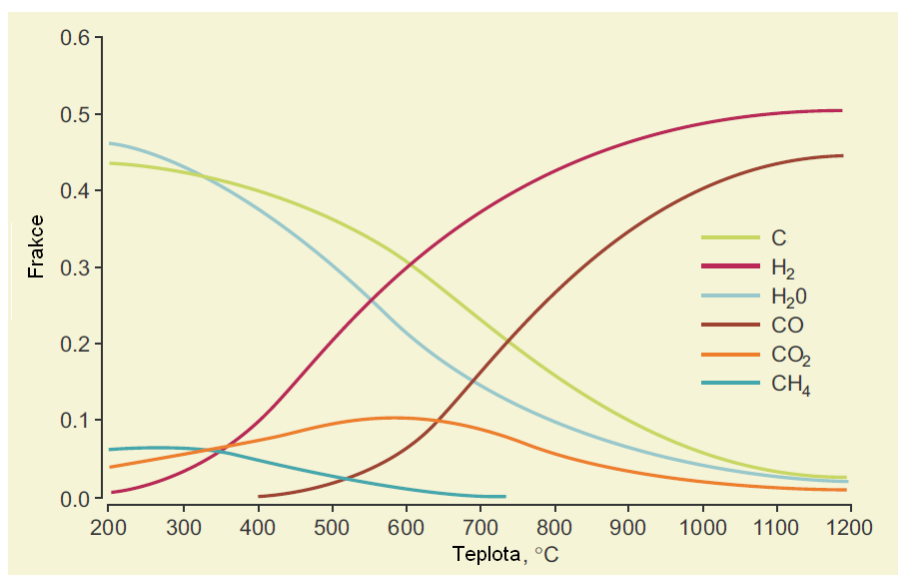
Obr. 11 ukazuje diagramy rovnováhy (stavové diagramy) pro zplyňování  $C_{20}H_{32}O_{10}$  se šesti molekulami vody a dvěma molekulami kyslíku ( $x_1 = 2$  a  $x_2 = 6$  v zobecněné rovnici). Jsou definovány specifické reakce, které by mohly probíhat za různých teplot. Tato specifická reakce je definována hodnotami  $y_n$  v obecné rovnici pro reakci.

Při teplotě 600 °C může být reakce zapsána takto:  

$$\text{C}_{20}\text{H}_{32}\text{O}_{10} + 2\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 12,90\text{C} + 4,27\text{CO}_2 + 2,32\text{CO} + 11,85\text{H}_2 + 0,51\text{CH}_4 + 9,14\text{H}_2\text{O}$$
-1,9 kJ energie (2)

Při teplotě 1200 °C může být reakce zapsána takto:  

$$\text{C}_{20}\text{H}_{32}\text{O}_{10} + 2\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 1,35\text{C} + 0,36\text{CO}_2 + 18,30\text{CO} + 21,00\text{H}_2 + 0,001\text{CH}_4 + 0,99\text{H}_2\text{O}$$
+1781 kJ energie (3)



Obr. 11: Rovnovázný diagram pro zplyňování tříděné frakce komunálního a průmyslového odpadu (TAP) s jedním dílem kyslíku na tři díly páry (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

Rovnice také udávají energii spojenou s reakcí. Udávaná hodnota je množství energie přičtené nebo odečtené od vzniklých sloučenin na pravé straně tak, jako by vznikaly za stejné teploty a tlaku jako vstupní sloučeniny na levé straně. Jestliže je výsledná hodnota záporná, reakce je exotermická (teplo vydávající) a jestliže je výsledná hodnota kladná, reakce je endotermická (teplo pohlcující).

Energetická bilance v podmínkách pokojové teploty a tlaku může být stanovena jednoduše vyrovnáním tvorby energie pro každou složku. Příslušné hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.

Tabulka 2: Tvorba energie (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

Molekula	Tvorba energie KJ/mol	Molekula	Tvorba energie KJ/mol	Molekula	Tvorba energie KJ/mol
C	0,0	H <sub>2</sub> O (kapalina)	-285,8	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-146,4
CO	-110,5	O <sub>2</sub>	0,0	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	226,7
CO <sub>2</sub>	-393,5	CH <sub>4</sub>	-74,8	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	52,3
H <sub>2</sub>	0,0	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-84,7	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (plyn)	82,9
H	218,0	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-103,8	C <sub>20</sub> H <sub>32</sub> O <sub>10</sub>	-2731,8
H <sub>2</sub> O (plyn)	-241,8	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-126,1	C <sub>20</sub> H <sub>30</sub> O <sub>13</sub>	-1921,0

Vytvořená energie z modelové tříděné frakce komunálního a průmyslového odpadu (TAP) C<sub>20</sub>H<sub>32</sub>O<sub>10</sub> byla založena na předpokladu, že výhřevnost tohoto suchého odpadu bez popela je 20,85 MJ/kg. Vytvořené teplo z novinového papíru označeném jako C<sub>20</sub>H<sub>30</sub>O<sub>13</sub>

bylo založeno na předpokladu, že výhřevnost suchého odpadu TAP bez popela je 20,03 MJ/kg. Další hodnoty byly převzaty - Kay and Laby, 1986.

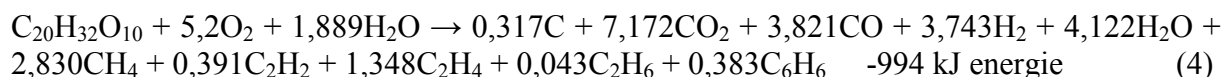
### Podstata chemické rovnováhy pro zplyňování

Z obr. 11, který se zabývá zplyňováním komunálního a průmyslového odpadu s použitím kyslíku a páry a také podrobnými údaji o reakcích při teplotách 600 a 1200 °C, je možné se dozvědět více o povaze těchto reakcí. Reakce při teplotě 600 °C je mírně exotermická, a proto nevyžaduje přidání energie. Reakce při teplotě 1200 °C je charakteristická značným stupněm hydrolyzy. Tato reakce je silně endotermická a je nezbytné dodat velké množství tepla, aby se mohla uskutečnit. Energie potřebná pro proces hydrolyzy není ztracena, protože je zachycena v syntézním plynu a dodává mu takto vyšší výhřevnost. Pro účinný proces zplyňování, který používá vysoký stupeň hydrolyzy, je potřeba efektivní využití tepla spalováním syntézního plynu, který podporuje endotermickou hydrolyzu.

Obr. 11 neukazuje rovnováhu molekulárních frakcí vyšších uhlovodíků označovaných jako  $C_nH_m$  s  $n > 1$ , protože jsou obvykle malé. Ve skutečnosti se produkce methanu i vyšších uhlovodíků zvýšila a produkce zuhelnatělých zbytků snížila ve srovnání s tím, co ukazuje obr. 11. Je tomu tak proto, že konečné složení je určeno spíše rychlostmi reakce, než chemickou rovnováhou po neurčité době. Přestože výpočty rovnováhy neudávají přesná složení, ukazují významné trendy. Z obr. 11 je patrné, že:

- za nízkých teplot vytváří uhlík a kyslík přednostně oxid uhličitý a zuhelnatělé zbytky;
- za vysokých teplot, jestliže je přebytek uhlíku, se oxid uhličitý rozkládá a tvoří se oxid uhelnatý (Ačkoliv na obrázku není uvedeno, že oxid uhelnatý může být odstraněn za všech teplot s dostatkem kyslíku.);
- za nízké teploty by kyslík spíše reagoval s vodíkem a vznikala by voda, než s uhlíkem nebo oxidem uhelnatým, aby vznikl oxid uhličitý;
- za vysokých teplot by kyslík spíše reagoval s uhlíkem a vznikal by oxid uhelnatý nebo oxid uhličitý, než vodíkem, aby vznikla voda. (Tzn., že vodík je produkován za vysokých teplot, kdy je nedostatek kyslíku.);
- metan a jiné uhlovodíky se začínají rozkládat při teplotách nad 500 °C;
- tvorba zuhelnatělých zbytků je téměř nevyhnutelná i za vyšších teplot. (Vytváření těchto zuhelnatělých zbytků a jejich ztráta s nepotřebným popelem mohou představovat významnou ztrátu účinnosti mnoha procesů zplyňování.).

Současné technologie zplyňování obvykle využívají zpracovaný odpad nebo tříděný komunální a průmyslový odpad TAP, které obsahují 6 - 20 % vlhkosti. Teploty používané pro zplyňování se pohybují v rozmezí 600 – 1200 °C. Chemická reakce je v souladu s McKay Group LLC, 2009 následující:



Tyto údaje se týkají zplyňovacího závodu společnosti TPS v Grčve. Teplota zplyňování byla 850 °C a za normálních okolností by bylo více uhlíku na pravé straně. Avšak v tomto závodě se množství zuhelnatělých zbytků snižuje katalytickým krakováním, které následuje po zplyňování. Voda jako složka uvedená na levé straně odpovídá 6,5 % vlhkosti v tříděném komunálním a průmyslovém odpadu použitím jako palivo, které obsahuje rovněž 11 % popela. Energie uvolňovaná zplyňováním se může použít k zahřívání těchto vstupujících odpadů. Energetická bilance v rovnici 4 se vztahuje na teplotu 25 °C. Tudiž k tomu, aby se zjistilo, kolik tepla je třeba ke zvýšení teploty pravé strany na teplotu zplyňování, je nezbytné znát její tepelnou kapacitu. Tepelné kapacity plynů uvedených v rovnici 4 při teplotě 25 °C jsou uvedeny v tab. 3.

Tabulka 3: Tepelná kapacita plynů při konstantním tlaku a při teplotě 25 °C (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

Molekula	C	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>
C <sub>p</sub> , JK <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>	8,5	29,1	37,1	28,8	29,4	33,6	35,3	43,9	43,6	81,7

Když se použijí hodnoty uvedené v tab. 8, tak je tepelná kapacita pravé strany 1408 JK<sup>-1</sup>. Přidá-li se k tomu přípustná odchylka pro ohřívání popela, která představuje 11 % m/m mokrého paliva, zvýší se tato hodnota na 1451 JK<sup>-1</sup>. Tato hodnota mírně poroste s teplotou. Avšak použitím této hodnoty je možné konstatovat, že přebytek energie 994 kJ v rovnici 4 povede ke zvýšení teploty na 685 °C. To znamená, že je potřeba určitého dalšího ohřátí k dosažení teploty zplyňování, což je 850 °C.

Produkováný syntézní plyn v sobě zahrnuje prakticky veškerou energii obsaženou v původním palivu. V zásadě by tak mohl být syntézní plyn spalován při teplotě 850 °C k získání co největší energie původního paliva.

Plyn vyrobený z tříděného komunálního a průmyslového odpadu (TAP) by pak měl značnou koncentraci chlorovodíku, který působí velmi silně na korozi plynových turbín opatřených kovovými lopatkami. Proto je nezbytné neustále syntézní plyn po jeho vyrobení čistit, a to se musí provádět při teplotě nižší než 850 °C. Aby se zajistilo, že dojde pouze k velmi malé ztrátě původní energie, je žádoucí chladit plyn v kotli a získat tak páru pro parní turbínu (nebo někdy horkou vodu pro systém vytápění). Za účelem zvýšení hospodárnosti parní turbíny by měly být kotelní trubky chladící syntézní plyn na tom samém parním okruhu jako kotelní trubky získávající teplo z výfuku plynové turbíny.

Když se syntézní plyn z 1 molekuly C<sub>20</sub>H<sub>32</sub>O<sub>10</sub> ochladí na 25 °C, má energetický obsah 7805 kJ.m<sup>-3</sup>. To je dostatečné množství energie pro pohon motoru nebo plynové turbíny k výrobě elektřiny. Obsah energie z 1 molekuly C<sub>20</sub>H<sub>32</sub>O<sub>10</sub>, který se uvolní při spalování, je 8924 kJ.m<sup>-3</sup>. Rozdíl se rovná energii odebrané ze syntézního plynu při jeho ochlazení bez tepla dodaného k dosažení teploty zplyňování. V tomto případě je účinnost přeměny paliva z tříděného komunálního a průmyslového odpadu na syntézní plyn používaný jako palivo 87,5 %.

### Technologické procesy zplyňování

Zplyňování je zavedená a dobře propracovaná technologie používaná pro uhlí, lignit a dřevo. V odborných publikacích, týkajících se průmyslové chemie, je k dispozici množství údajů o konstrukci zplyňovacích generátorů a jejich výkonnosti. Použití technologie zplyňování pro tepelné zpracování odpadu se dostalo do popředí zájmu koncem sedmdesátých let minulého století, kdy vědci předložili fakta o tom, jak by mohly emise ze spaloven odpadů poškozovat naše zdraví a životní prostředí. V té době také rostly obavy ze zvyšujícího se množství dioxinů v tomto prostředí.

Počáteční výzkumné práce o zplyňování komunálního odpadu byly podporovány na základě předpokladu, že by tato technologie mohla omezit emise a snížit jejich dopad na životní prostředí ve srovnání s jeho hromadným spalováním. Tvzení, že by zplyňování mohlo být čistší technologií než hromadné spalování, už nyní neodpovídá zcela pravdě, protože obě tyto technologie mohou splňovat i nejpřísnější nařízení o emisích, jestliže se použijí vhodné technologické postupy k čištění kouřového plynu (spalin) a odpadní vody.

Většina prací, týkajících se zplyňování tuhého komunálního odpadu, byla zveřejněna do roku 1999 a mnoho obchodních společností, které se zabývaly těmito technologiemi, obrátilo svůj zájem ke zplyňování biopaliv, nebo se touto problematikou úplně přestaly zabývat. Různé typy reaktorů, které se používaly ke zplyňování, popsal Bridgewater, 2002. Tyto technologie zahrnují reaktory s výstupným proudem, se sestupným proudem,

s bublinkovou fluidní vrstvou, s cirkulující fluidní vrstvou a s rotační pecí. Tyto reaktory využívají třech následujících procesů:

- částečné oxidace vzduchem;
- částečné oxidace kyslíkem;
- zplyňování pomocí páry.

Částečná oxidace vzduchem produkuje plyn, který je zředěný atmosférickým dusíkem a má nízkou výhřevnost v rozmezí 4 - 10 MJ/m<sup>3</sup>. V minulosti byla tato energetická hodnota příliš nízká pro efektivní využití v plynových turbínách. Společnost Alstom nyní předvedla a dále vyvíjí novou generaci plynových turbín pro účinné spalování syntézního plynu s nízkou výhřevností.

Částečná oxidace kyslíkem produkuje syntézní plyn, který neobsahuje dusík, výhřevnost v rozmezí 8 - 14 MJ/m<sup>3</sup>. Je ale obtížné odůvodnit dodatečné náklady na výrobu kyslíku pro reakci zvýšenou hodnotou paliva.

Proces zplyňování pomocí páry vyrábí plyn, který neobsahuje dusík a může mít výhřevnost v rozmezí 14 - 20 MJ/m<sup>3</sup>.

Příklady různých způsobů provozu jsou reaktor s cirkulující fluidní vrstvou společnosti TPS Termiska (částečná oxidace vzduchem), rotační pec společnosti Proler (částečná oxidace kyslíkem) a reaktory SilvaGas s cirkulující fluidní vrstvou od společnosti Future Energy Resources (FERCO), používající páru. Tab. 4 stručně shrnuje tyto tři příklady.

Tabulka 4: Vybrané příklady zplyňování pro analýzu hmotnostní a energetické bilance (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

Společnost	Plyn v reaktoru	Typ reaktoru	Základní článek	Energetická hodnota plynu (MJ.Nm <sup>-3</sup> )	Zápalná teplota (°C)
TPS Termiska	vzduch	cirkulující fluidní vrstva	krakovací zařízení	7,2	1723
Proler	kyslík	rotační pec	zařízení na vitifikaci	10,6	1775
FERCO	pára	cirkulující fluidní vrstva	spalovací komora	18,5	1965

Ačkoliv je pára používána v procesu SilvaGas jako fluidní plyn, teploty jsou příliš nízké a doby zdržení příliš krátké, než aby došlo k reakcím hydrolýzy páry. Proces je skutečně pyrolýzou. V odborné literatuře týkající se zplyňování tuhého komunálního a tříděného průmyslového (TAP) odpadu se nevyskytují žádné příklady hydrolýzy páry za vysokých teplot v pokusném měřítku. Pravděpodobným důvodem je, že takové procesy mohou být neekonomické, a proto nebyly podrobně studovány.

Další způsob provozu použitelný u reaktorů je tlakové zplyňování ve fluidní vrstvě. Generátory plynu s uměle zvýšeným tlakem se běžně používají v chemickém průmyslu, ale dosud nejsou k dispozici žádné experimentální údaje pro jejich použití u tuhého komunálního odpadu.

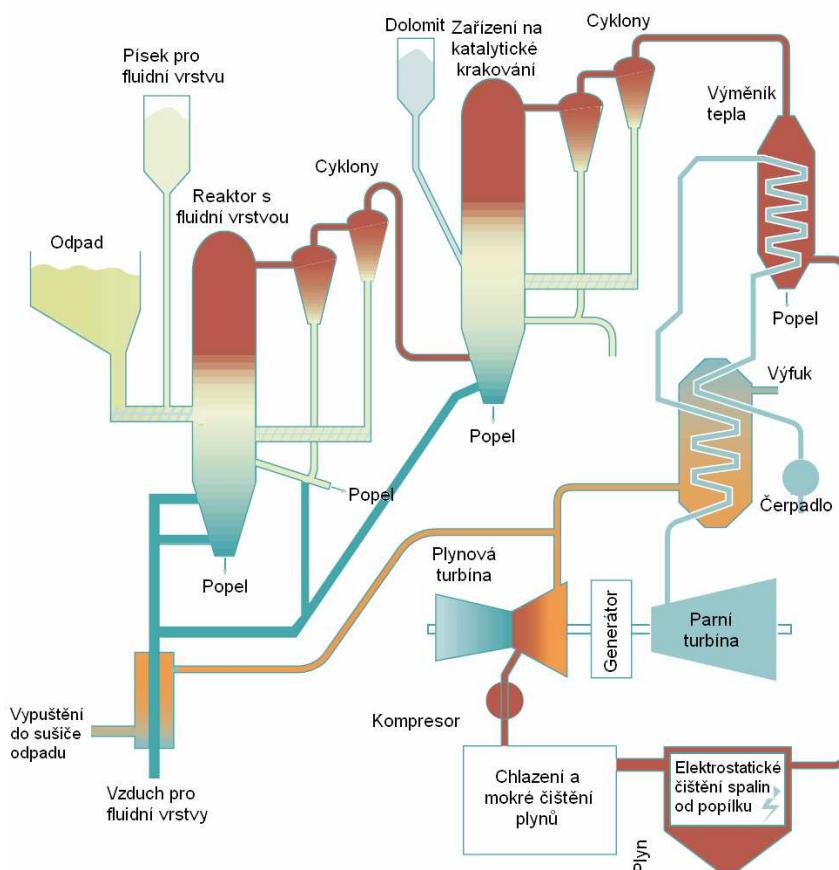
Bridgewater, 2002 porovnával různé technologie podle jejich technologického potenciálu a možnosti uplatnění na trhu. Reaktor se zplyňováním v cirkulující fluidní vrstvě (fluidní zplyňování, při kterém tuhé částice spalin cirkulují) je hodnocen nejlépe podle obou těchto kritérií. Reaktor s bublající fluidní vrstvou a rotační pec jsou vysoce hodnoceny pouze, pokud jde o technologický potenciál. Všechny tři výše uvedené technologie jsou použitelné pro velká množství hmoty, což se vyžaduje při tepelném zpracování komunálního odpadu.

Základní technologie vyvinutá společností TPS Termiska Processer může být použita pro zplyňování se vzduchem, kyslíkem nebo párou. Společnost se zaměřuje na vzduchové



zplyňování. V roce 1984 začala vyvíjet zplyňování s cirkulující fluidní vrstvou. Pokusný závod založený na této technologii byl uveden do provozu v Grčve v oblasti Chianti v Itálii v roce 1988 a byl určen pro zpracování tříděného komunálního a průmyslového odpadu (TAP). Nekvalitní syntézní plyn z tohoto závodu se spaluje přímo, a to buď v parním kotli nebo cementových pecích. Obsah dehtu v syntézním plynu z cirkulující fluidní vrstvy se obvykle pohybuje v rozmezí 2 - 100 g/m<sup>3</sup> ekvivalentního objemu plynu při 20 °C/Nm<sup>3</sup>. Maximální ještě přijatelný obsah dehtu v plynových motorech se pohybuje v rozmezí 20 - 500 mg/Nm<sup>3</sup>.

Společnost TPS pochopila, že budoucnost procesu představuje integrovaný kombinovaný cyklus zplyňování (IGCC). Aby zvýšila kvalitu syntézního plynu, zlepšila svůj proces zplyňování přidáním druhého reaktoru s fluidní vrstvou zapojeného v řadě s prvním. V tomto reaktoru se dehty štěpí na nízkomolekulární uhlovodíky (rozštěpené) použitím dolomitu jako katalyzátoru. Dolomit je minerál obsahující uhličitany hořčíku a vápníku a podílí se na tvorbě oxidu vápenatého za vysokých teplot. Dolomity pocházející z různých zdrojů mají odlišné katalytické působení. Dolomit také reaguje s chlorovodíkem v kouřovém plynu a vznikají chloridy hořečnatý a vápenatý. Tato reakce usnadňuje následující čištění plynu. Schéma integrovaného kombinovaného cyklu zplyňování (IGCC) používaného společností TPS je uvedeno na obr. 12.



Obr. 12: Zplyňovací a čistící zařízení s cirkulující fluidní vrstvou vyráběné společností TPS (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

Odpad je dopraven k prvnímu generátoru plynu s fluidní vrstvou šnekovým podavačem. To umožňuje, aby tento generátor pracoval při tlaku mírně vyšším, než je tlak atmosférický. Částice odpadu se ve fluidní vrstvě rychle zahřejí. V závislosti na velikosti přiváděného odpadu se doba zdržení ve fluidní vrstvě může pohybovat od několika sekund až po několik minut. První generátor plynu pracuje při teplotách 830 a 900 °C. Tyto teploty mají

proces výroby plynu optimalizovat. Většina tepla potřebného k udržení teploty fluidní vrstvy pochází z exotermické reakce zplyňování. Dodatečné teplo se dodává tak, že se předeheje vzduch používaný ke zplyňování. Obvykle se tento vzduch ohřeje přibližně na 400 °C. Teplo je dodáváno z výfuku plynové turbíny.

Rychle proudící vzduch v reaktoru s cirkulující fluidní vrstvou vynáší částice písku a popela ven z reaktoru zároveň s vyrobeným plynem. Popel a písek musí být odděleny od syntézního plynu. Písek se vrací do reaktoru a popel je vyloučen. Tento proces se provádí ve dvou cyklonech. První cyklon odstraňuje hrubší částice, které jsou potom oddělovány proudem vzduchu, a to tak, že většina hrubého písku se vrací zpět, ale velkým, kompaktním a spečeným částicím popela se v tom zabrání. Druhý cyklón zachytí všechny jemné částice písku a popela a vrací je zpět do generátoru plynu, z jehož dna pak vypadávají velmi těžké částice odpadu.

Vyrobený syntézní plyn obvykle obsahuje několik procent dehtu a zuhelnatělých zbytků. Dehet a tyto zbytky jsou pak přeměněny na plyn v druhém reaktoru s cirkulující fluidní vrstvou nazývaném kraker (krakovací reaktor). Z něho při teplotě kolem 900 °C odchází syntézní plyn. Při této teplotě má tento plyn přibližně 15 - 25 % své celkové energie ve formě tepla. Rekuperace tohoto tepla je velmi důležitá pro celkovou účinnost. Pokud má syntézní plyn velmi nízkou koncentraci chlorovodíku a těžkých kovů, pak je možné tento plyn ochlazovat ve výměníku tepla na 120 °C nebo ještě méně a získat zpět 80 % tepelné energie. Plyn se potom obvykle čistí pomocí filtračního zařízení a potom následuje jeho závěrečné dočištění.

Jestliže plyn obsahuje značné množství chlorovodíku, kyslíku a těžkých kovů, bude zde riziko tvorby dioxinů syntézou jednoduchých molekul v složité molekulární komplexu (de novo syntéza). Tyto dioxiny nemohou uniknout do ovzduší, protože jsou zničeny v plynové turbíně. Avšak mohly by kontaminovat vodu použitou pro závěrečné dočištění. V této chvíli může operátor zchladit plyn na 400 °C, opětovně získat přes 50 % tepelné energie, odstranit částice v elektrostatickém zařízení na čištění od spalin a popílku a potom plyn prudce ochladit před závěrečným dočištěním, při kterém bude třeba odstranit oxid siřičitý, sirovodík, čpavek a možná i chlorovodík. Čpavek je nutno odstranit, protože se v plynové turbíně přeměňuje na oxidy dusíku.

Předtím, než je možné vstříknout syntézní plyn do plynové turbíny, je třeba ho stlačit. Protože plyn má nízkou výhřevnost, musí být do turbíny injektován mnohem větší objem plynu, než je tomu u jiných paliv. Proto je také plynový kompresor důležitou součástí celého procesu a spotřebovává značné množství energie. Je obvykle nezbytné plyn při stlačování ochladit.

Jestliže syntézní plyn obsahuje uhlovodíky s vysokou molekulární hmotností, u kterých by mohlo dojít ke zkapalnění v kompresoru, pak je nezbytné tyto sloučeniny předem odstranit s výjimkou případu, kdy je kompresor vybaven zařízením pro manipulaci s kondenzátem.

Oběh páry uvedený na obr. 12 je zjednodušený, protože je jinak obvyklé mít několik vstupních otvorů do turbíny a opětovně ohřívat páru mezi nimi.

Společnost TPS zveřejnila hmotnostní, energetické a nákladové analýzy týkající se provozu, jaký je uveden na obr. 12 pro surové dřevo, trávu a odpad z domácností. Tab. 5 uvádí výrobní data pro 1 kg vstupujícího paliva.

Tabulka 5: Údaje o hmotnostní bilanci pro závod společnosti TPS Termiska zplyňující organická paliva (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

		Zelené dřeviny	Travní plochy u komunikací	Organický odpad z domácností
Údaje o palivu	Vlhkost, % m/m	50	60	54
	Popel, % m/m	1,3	8,4	18,9
	Výhřevnost, MJ/kg	7,7	5,4	6,4
Složení, palivo bez popele	Uhlík, % m/m	49,10	48,70	51,90
	Vodík, % m/m	6,00	6,40	6,7
	Kyslík, % m/m	44,30	42,50	38,70
	Dusík, % m/m	0,48	1,90	2,20
	Síra, % m/m	0,01	0,14	0,50
	Chlór, % m/m	0,10	0,39	0,30
Vzduch jako médium při zplyňování	Průtok, kg/kg vlhké palivo	1,4	1,48	1,6
	Teplota, °C	400	400	400
Dolomit	Průtok, kg/kg vlhké palivo	0,0268	0,0279	0,0279
Syntézní plyn	Průtok, kg/kg vlhké palivo	2,37	2,40	2,42
	Teplota, °C	900	900	900
Složení syntézního plynu	CO, % V/V vlhký plyn	17,22	14,94	13,98
	H <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	13,25	12,42	11,27
	CH <sub>4</sub> , % V/V vlhký plyn	2,82	2,61	2,81
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , % V/V vlhký plyn	0,94	0,87	0,77
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , % V/V vlhký plyn	0,02	0,02	0,02
	CO <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	12,22	12,09	11,80
	H <sub>2</sub> O, % V/V vlhký plyn	13,55	14,49	13,71
	N <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	39,20	41,64	44,59
	NH <sub>3</sub> , % V/V vlhký plynu	0,27	0,33	1,00
	H <sub>2</sub> S, % V/V vlhký plyn	0,00	0,03	0,03
	HCl, % V/V vlhký plyn	0,03	0,07	0,00
	Zbytek dehtu, g/kg vlhký plyn	12	11	10
	Popel zachycený filtrem, kg/kg vlhký plyn	0,036	0,083	0,152
	Složení popela zachyceného filtrem, % m/m popílek	65	87	95
	Výhřevnost (vlhký plyn), MJ/Nm <sup>3</sup>	5,22	4,74	4,39
	Výhřevnost (30 °C), MJ/Nm <sup>3</sup>	5,77	5,31	4,86
Popel vzniklý při zplyňování	Průtok, kg/kg vlhké palivo	0,0158	0,0158	0,0357
	Poměr popel : písek, %	90	90	90

Údaje hmotnostní bilance týkající se zplyňování tříděného komunálního a průmyslového odpadu (TAP) je možné odvodit ze znalosti syntézního plynu vyráběného v závodě v Grčve. Složení syntézního plynu a rovněž tříděného komunálního a průmyslového odpadu (TAP) bylo zveřejněno ve zprávě Národní laboratoře pro obnovitelné zdroje. Údaje uvádí bilanci 4,88 % uhlovodíků jiných než methan (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, x > 1). Výpočet předpokládal, že složení této frakce bude 0,1 % C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 0,90 % C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, 3,10 % C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> a 0,88 % C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>. Tento poměr je v souladu s údaji z jiných procesů zplyňování. Hladina oxidu uhličitého ve výstupním plynu se zvýšila z 15,65% v údajích z pokusů na 16,50 % a zjištěný zbytek dehtu byl 7,3 gm/kg TAP odpadu. Vypočítané údaje pro model TAP se velmi blíží údajům z pokusů. Údaje hmotnostní bilance u TAP jsou uvedeny v tab. 6.

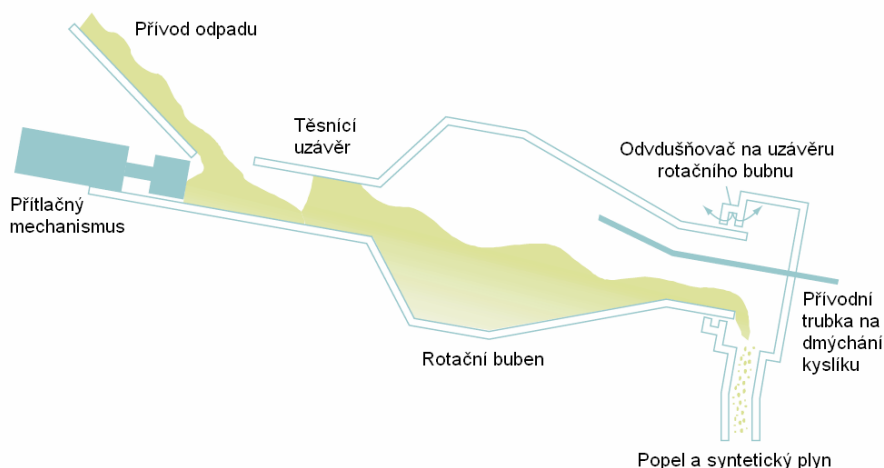
Tabulka 6: Vypočítané údaje hmotnostní bilance pro modelové zplyňování tříděného komunálního a průmyslového odpadu (TAP) používaného společností TPS Termiska (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

		Peletizovaný TAP
Údaje o palivu	Vlhkost, % m/m	6,49
	Těkavé látky, % m/m	71,1
	Vázaný uhlík, % m/m	11,4
	Popel, % m/m	11,0
	Síra, % m/m	0,5
	Chlór, % m/m	0,5
	Výhřevnost, MJ/kg	17,04
	Vzduch při zplyňování	Průtok, kg/kg TAP
Syntézní plyn (vlhký)	Průtok, kg/kg TAP	2,248
	Teplota, °C	850 - 900
Složení syntézního plynu	CO, % V/V vlhký plyn	8,79
	H <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	8,61
	CH <sub>4</sub> , % V/V vlhký plyn	6,51
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	0,90
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , % V/V vlhký plyn	3,10
	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , % V/V vlhký plyn	0,88
	CO <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	16,50
	H <sub>2</sub> O, % V/V vlhký plyn	9,48
	N <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	45,13
	Zbytek dehtu, gm/kg TAP	7,3
	Výhřevnost (vlhký plyn), MJ/kg	6,626
Výhřevnost (vlhký plyn), MJ/Nm <sup>3</sup>	7,46	

Syntézní plyn vyrobený z TAP má velmi odlišné složení od plynu, který byl získán z paliv uvedených v tab. 5. Má vysoký obsah uhlovodíků a nižší obsah oxidu uhelnatého a vodíku. Tento rozdíl je možné částečně vysvětlit nižší teplotou při zplyňování. Zbýlý rozdíl vzniká proto, že je třeba méně tepla k zahřátí sušícího zařízení TAP odpadu na potřebnou teplotu. Z toho důvodu se dodává méně kyslíku na podporu exotermické oxidace a produkci oxidu uhelnatého. Použití syntézního plynu pro pohon plynové turbíny by pravděpodobně vyžadovalo zplyňování za vyšší teploty. Celková účinnost výroby elektřiny procesem zplyňování komunálního a průmyslového odpadu (TAP) bude záviset na energii potřebné ke zpracování tohoto odpadu.

Mezinárodní společnost Proler začala vyvíjet proces zplyňování odpadu z vyřazených motorových vozidel v roce 1989 a pracovala rovněž na zplyňování TAP. Dva odlišné charakteristické rysy procesu aplikovaného touto společností jsou použití rotační pece a také kyslíku místo vzduchu. Společnost v současné době už nepoužívá tento proces ke zplyňování TAP. Zveřejněné údaje umožňují analýzu hmotnostní bilance pro zplyňování s použitím kyslíku. Rotační pec je vidět na obr. 13. Odpad prochází dlouhým úzkým tunelem. Ke stlačení odpadu do tohoto tunelu se používá pýchovací zařízení a odpad je zde neprodyšně uzavřen. Otáčivý uzávěr na výstupu z bubny je spojený s filtrem zachycujícím nežádoucí emise plynů. Byly prováděny pokusy s tříděným komunálním a průmyslovým odpadem (TAP) o velikosti 6 cm s obsahem vlhkosti 15 %. Při sešrotování většího množství odpadu by stačilo snížit jeho maximální velikost přibližně na 15 cm.

Zemní plyn a kyslík se přivádějí do zplyňovací nádoby pomocí přívodní trubky. Přiváděné množství energie spojené se zemním plynem je přibližně 14 % energie v palivu. Pozitivní přínos přidání malého množství zemního plynu do reaktoru nebyl zcela prokázán.



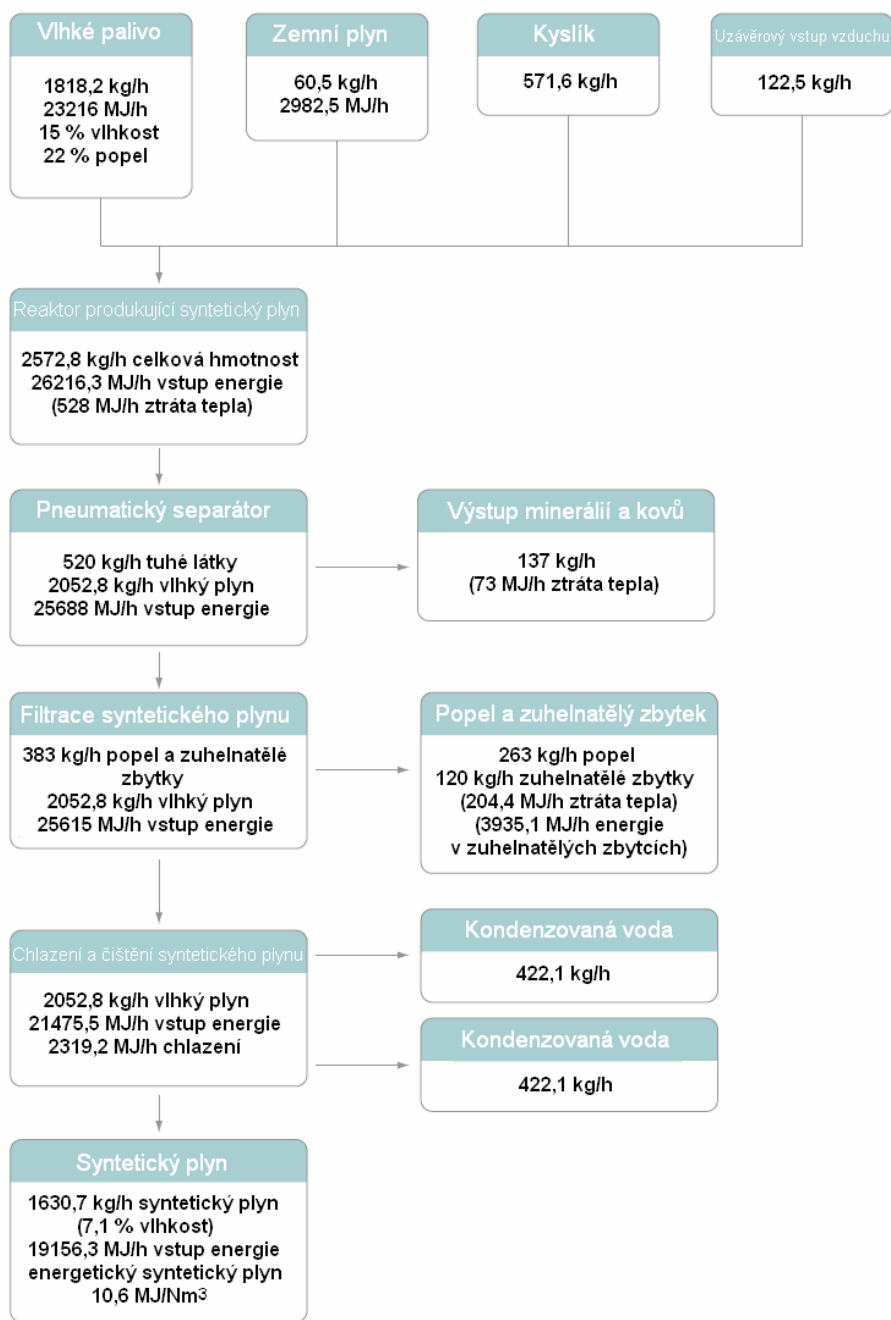
Obr. 13: Rotační pec pro zplyňování od společnosti Proler (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

Hmotnostní bilance pro proces zplyňování používaný společností Proler byla vypočítána pro tříděný komunální a průmyslový odpad (TAP) s vlhkostí 15 %, 22 % popela a nominálním palivem založeným na  $C_{20}H_{32}O_{10}$ . Tabulkový kalkulátor - proler.xls - je nastavený tak, aby prováděl výpočet na webové stránce. Vypočítaná hmotnostní a energetická bilance je uvedena na obr. 14.

Vlhkost paliva, vstup zemního plynu, výstup minerálií a kovů, poměr zuhelnatělých zbytků k popelu a stanovení obsahu popelovin byly převzaty z práce Niessen et. al., 1996. Tento zdroj je také použit při stanovení množství vzduchu potřebného k odvodušnění pro stanovení koncentrace dusíku v syntézním plynu.

Tříděný komunální a průmyslový odpad použitý při výpočtu odpovídá toku rozdrčeného odpadu po recyklaci 10 - 12 % a sušení z vlhkosti 35 až 38 % na vlhkost 15 %. Požadovaná energie pro tento proces sušení je asi 1140 MJ a tudíž mohla být vyjmuta z energie určené na chlazení syntézního plynu. Celková efektivnost přeměny energie z odpadu s nízkou výhřevností na energii v palivu, které je možné spalovat v plynové turbíně je 66 %. Bilance na obr. 14 neuvádí energii potřebnou k produkci 572 kg kyslíku za hodinu. Pokud má mít tento proces nějakou šanci konkurovat hromadnému spalování odpadu pro výrobu elektřiny, potom plynová turbína s kombinovaným cyklem spalujícím syntetický plyn bude muset mít účinnost nejméně 38 % ještě dříve, než se vezmou v úvahu náklady na kyslík.

Tab. 7 vyjadřuje hmotnostní bilanci vstup:výstup pro proces používaný společností Proler na stejném základě jako u společnosti TPS v tab. 6. Zjišťování složení syntézního plynu byla prováděna po ochlazení plynu na 75 °C. Při ochlazení kondenzuje velká část vody obsažené v původním syntézním plynu.



Obr. 14: Energetická a hmotnostní bilance pro proces zplyňování použitý společností Proler (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

Tabulka 7: Vypočítané údaje hmotnostní bilance pro rotační zplyňovač společnosti Proler (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

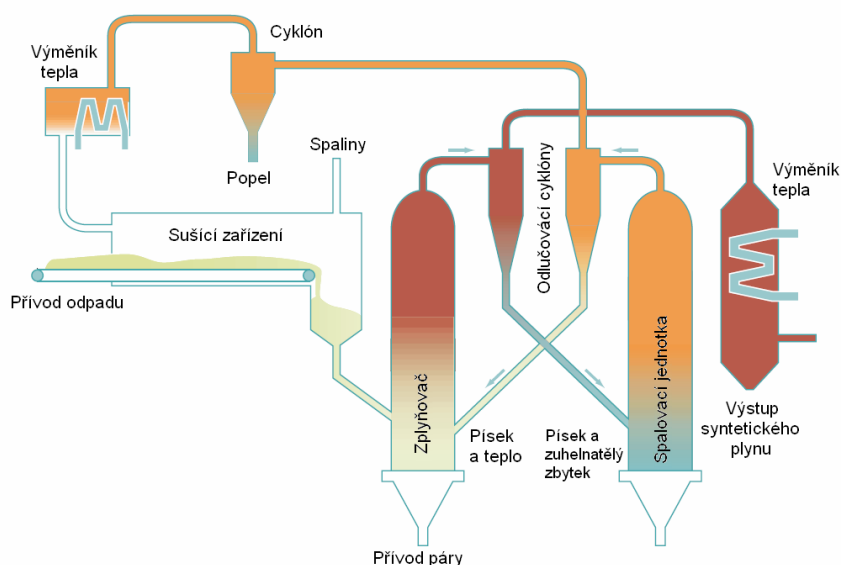
		Vlhký TAP
Údaje o palivu	Vlhkost, % m/m	15,0
	Těkavé látky/uhlík, % m/m	63,0
	Popel, % m/m	22,0
	Výhřevnost, MJ/kg	12,77
Vstup plynu/kyslíku	Průtok kyslíku, kg/kg TAP	0,3092
	Průtok vzduchu, kg/kg TAP	0,0642
	Průtok zemního plynu, kg/kg TAP	0,0333

Syntézní plyn (vlhký)	Průtok, kg/kg TAP	0,8547
Složení syntézního plynu při 75 °C (po kondenzaci)	CO, % V/V vlhký plyn	31,8
	H <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	30,8
	CH <sub>4</sub> , % V/V vlhký plyn	5,7
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	0,5
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , % V/V vlhký plyn	1,7
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , % V/V vlhký plyn	0,1
	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , % V/V vlhký plyn	0,5
	CO <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	17,8
	H <sub>2</sub> O, % V/V vlhký plyn	7,10
	N <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	4,6
	Zbytek dehtu, gm/kg TAP	80,3
	Výhřevnost (vlhký plyn), MJ/Nm <sup>3</sup>	10,6

Mezinárodní vědecko-technická organizace Battelle začala vyvíjet proces zplyňování páry SilvaGas v roce 1977 a v roce 1989 provedla zkoušky s vysoce upraveným TAP odpadem s použitím procesní výzkumné jednotky o kapacitě 30 kg/h. Společnost FERCO podle McKay Group LLC, 2009 získala proces SilvaGas od Battelle a vyvinula technologii pro zplyňování dřevní štěpky v komerčním měřítku.

Konfigurace u procesu je uvedena na obr. 15. Stejně jako v případě systému zplyňování společnosti TPS, jsou i zde použity dvě fluidní vrstvy. V první fluidní vrstvě provádí systém SilvaGas zplyňování s párou. V druhé fluidní vrstvě systém spaluje zuhelnatělé zbytky po spalování se vzduchem a syntézní plyn je odčerpán po první fluidní vrstvě. Systém SilvaGas recykluje písek jako fluidní medium z druhé fluidní vrstvy zpět do první.

Systém SilvaGas má dva toky plynu, které je nutné čistit. Je to syntézní plyn z generátoru plynu a výfukový plyn ze spalovací komory. Protože kyselé plyny a chloridy těžkých kovů odcházejí se syntézním plynem, je plyn vystupující ze spalovací komory poměrně čistý a obvykle je třeba z něho odstranit pouze drobné částice filtrací.



Obr. 15: Proces SilvaGas pro zplyňování parou (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

Obr. 15 ukazuje, že se výfukový plyn ze spalovací komory používá k sušení hrubého odpadu. Ten bude potřebovat vyčištění a také dezodoraci po výstupu ze sušícího zařízení. Syntézní plyn je nezbytné zbavit kyselých plynů a nechat ho projít krakovacím katalyzátorem, aby se odstranily zbytky dehtu předtím, než se spálí v plynové turbíně. V předváděcím

provozu v Burlingtonu ve státě Vermont v USA je syntézní plyn spalován přímo v kotli a krakování dehtu není potřebné.

Společnost Battelle zveřejnila údaje o zplyňování tříděného komunálního a průmyslového odpadu (TAP) a dřevní štěpky. Avšak údaje o zplyňování TAP neposkytují dostatek informací k tomu, abychom z nich mohli sestavit hmotnostní bilanci. Složení TAP bylo přibližně  $C_{20}H_{30,3}O_{12,5}$ , z toho pak vyplývá složení syntetického plynu 15,7 %  $H_2$ , 43,9 %  $CO$ , 11,1 %  $CO_2$ , 16,3 %  $CH_4$  a 11,2 %  $C_2H_4$ . Složení TAP odpadů společnosti Battelle je tudíž značně odlišné od modelového vzorce TAP  $C_{20}H_{32}O_{10}$ .

Hmotnostní a energetická bilance byla vypočítána pro analyzování procesu parního zplyňování na podobném základě jako v případě použitém u systémů společností TPS a Proler. Tabulkový kalkulátor - Battelle\_wood.xls5 - analyzuje proces zplyňování pro standardní vlhkost 15 % a obsah popelovin 22 %. Složení syntézního plynu pro dřevní štěpku jako palivo bylo převzato z Niessena a kol. Použitý palivový model byl  $C_{20}H_{28,4}O_{12,6}$ , protože toto bylo naměřené složení syntézního plynu po úpravě vstupu páry. Analytické údaje jsou uvedeny v tab. 8.

Spalovací komora pracuje při teplotě 970 °C; z toho důvodu je maximální teplota, na kterou mohou výfukové plyny ohřát páru, přibližně 900 °C. (Teplotu páry 900 °C by bylo možné dosáhnout pouze při nízkých tlacích. Ve skutečnosti to znamená, že je nepravděpodobné, aby se pára ohřála nad 500 °C). Pára je přidávána v poměru 0,3026 kg na 1 kg dřevní štěpky. Jestliže výfukový plyn vzniklý spalováním zuhelnatělých látek zvýší teplotu páry na 900 °C, potom disponibilní teplo nad 20 °C z 0,3026 kg páry je přibližně 0,5 MJ. Toto není dostatečné množství tepla ke zvýšení teploty zplyňování na 800 °C.

Proces zplyňování páry SilvaGas je novátorský ve způsobu, jakým je teplo převáděno ze spalovací komory do generátoru plynu. Většina tepla požadovaného pro zplyňování je přenášena fluidním médiem (pískem), který cirkuluje spalovací komorou zpět do generátoru. Důležitým parametrem pro kontrolu teploty je rychlost, kterou je písek do generátoru recyklován.

Výhřevnost u dřevní štěpky byla 13,44 MJ/kg. Reakce zplyňování je mírně exotermická s 1 kg dřevní štěpky vyrábějícím 0,293 MJ energie. Toto zahřeje dřevní štěpku a přidanou páru o 150 °C. Teplota zplyňování je 800 °C. Energie, která je k dispozici spálením všech zuhelnatělých látek, představuje 4,38 MJ/kg a to poskytuje teplo potřebné k dosažení teploty zplyňování. Část tepla vzniklého spalováním zuhelnatělých látek ve spalovací komoře se použije k produkci páry pro generátor plynu. Tato pára v sobě zahrnuje určitou část z dodatečného tepla 1,23 MJ/kg požadovaného generátorem.

K porovnání procesu zplyňování páry SilvaGas s procesy zplyňování používanými společnostmi TPS a Proler je nezbytné posoudit hmotnostní a energetické bilance pro stejné vstupní suroviny. To je obtížné provést, protože konečné složení syntézního plynu v generátoru Silva Gas není možné určit v případě, že se bude jednat o odpad používaný společnostmi TPS a Proler.

Jednoduchou metodou odhadu bychom mohli předpokládat, že tříděný komunální a průmyslový odpad (TAP)  $C_{20}H_{32}O_{10}$  vytváří stejné složení syntézního plynu jako dřevní štěpka  $C_{20}H_{28}O_{12,6}$ . Toto ovšem není možné, protože atomová čísla uhlíku, vodíku a kyslíku musí být před a po reakci v rovnováze. Abychom dosáhli rovnováhy, je nutné změnit dvě složky syntézního plynu, tj. produkci vodní páry a vodík, přičemž ostatní složky zůstanou nezměněny.

Jakmile se dosáhne elementární rovnováhy, je zřejmé, že proces zplyňování je silně endotermický. Aby reakce pokračovala je třeba dodat 1,944 MJ energie na 1 kg tříděného komunálního a průmyslového odpadu (TAP). Tato energie se přidá k energii potřebné k ohřátí odpadu. Energetická bilance pro 12,77 MJ energie na 1 kg TAP je 10,31 MJ pro syntézní plyn, 4,40 MJ pro zuhelnatělé zbytky a 1,944 MJ pro endotermickou reakci. Objem



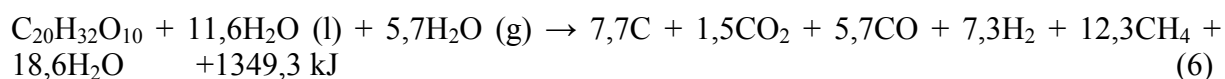
syntézního plynu se zvětšuje z 0,479 kg na 1 kg TAP na 0,502 kg na 1 kg TAP. Kompenzací za to je snižená výhřevnost – ze 17,17 na 15,0 MJ/Nm<sup>3</sup>. Aby tento proces zplyňování fungoval, musí písek přenášet téměř 3,5 MJ energie ze spalovací komory do generátoru plynu na každý kilogram TAP.

Tabulka 8: Tepelná a hmotnostní bilance pro proces Battelle zplyňování parou (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

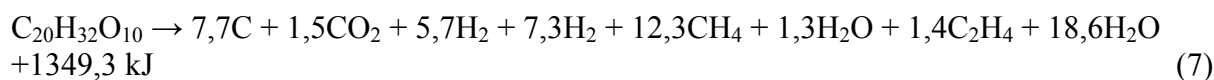
		Výchozí surovina		
		dřevěné zbytky	TAP	TAP v upraveném provozu
Údaje o palivu	Vlhkost, % m/m	15,0	15,0	15,0
	Těkavé látky/uhlík, % m/m	63,0	63,0	63,0
	Popel, % m/m	22,0	22,0	22,0
	Model (vzorec)	C <sub>20</sub> H <sub>28,4</sub> O <sub>12,6</sub>	C <sub>20</sub> H <sub>32</sub> O <sub>10</sub>	C <sub>20</sub> H <sub>32</sub> O <sub>10</sub>
	Výhřevnost, MJ/kg	13,44	12,77	12,77
Vstup páry	Průtok páry, kg/kg TAP	0,3026	0,3026	0,3026
	Profukující vzduch, kg/kg TAP	0,0072	0,0072	0,0072
Výstup syntézního plynu	Průtok páry (7,5 % vlhkost), kg/kg TAP	0,479	0,502	0,861
	Energie uvolněná při reakci, MJ/kg TAP	0,293	-1,944	-3,494
	Výhřevnost (7,5 % vlhkost), MJ/Nm <sup>3</sup>	17,17	15,07	8,93
	Celková energie syntézního plynu, MJ/kg TAP	8,77	10,31	13,51
Složení syntézního plynu při 75 °C (po kondenzaci)	CO, % V/V vlhký plyn	16,2	16,2	21,41
	H <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	7,2	20,26	46,80
	CH <sub>4</sub> , % V/V vlhký plyn	6,5	6,5	0,09
	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	0,0	0,0	0,00
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , % V/V vlhký plyn	4,1	4,1	0,00
	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , % V/V vlhký plyn	0,0	0,0	0,00
	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , % V/V vlhký plyn	0,2	0,2	0,00
	CO <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	4,2	4,2	7,13
	H <sub>2</sub> O, % V/V vlhký plyn	61,2	53,24	15,62
N <sub>2</sub> , % V/V vlhký plyn	0,4	0,4	0,00	
Dehet/ zuhelnatělý zbytek	Zbytek dehtu/zuhelnatělý zbytek, gm/kg TAP	133,4	133,4	83,9
	Přeměna uhlíku, %	61,9	61,9	76,0
	Energie spalování, MJ/kg TAP	4,38	4,40	2,75

### Technologické procesy pyrolýzy

Obvyklými produkty procesu pyrolýzy jsou zuhelnatělé zbytky, olej, pára a syntézní plyn. Podíváme-li se na proces SilvaGas zpracovávající tříděný komunální a průmyslový odpad (TAP), je vidět, že je to proces pyrolýzy. Chemická rovnice pro proces SilvaGas (Battelle) odvozený z tab. 8 je následující v souladu s McKay Group LLC, 2009:



Více molekul vody se nachází na pravé straně rovnice než na levé. Z toho důvodu nebyla produkce páry významná pro hmotnostní a energetickou bilanci a může být odečtena od obou stran. Výsledkem je takto definovaná reakce pyrolýzy:



Procesy pyrolýzy jsou vždy endotermické. Obvykle probíhají v zhuštěných vrstvách, fluidních vrstvách nebo rotačních pecích. Tam, kde je použita fluidní vrstva, je nezbytný fluidní plyn. V mnoha experimentálních studiích se používá dusík, avšak v normálním výrobním provozu by to nebylo ekonomické. Pro takový výrobní závod je možné použít páru nebo výfukové plyny ze spalovací komory (může to být i plynová turbína). Výfukové plyny obsahují především páru a oxid uhličitý, ale rovněž určité množství kyslíku. Použití výfukových plynů by celý proces změnilo, takže už by to nebyla čistá pyrolýza, ale částečně i zplyňování vzduchem.

K příkladům potenciálních komerčních procesů pyrolýzy tuhého komunálního odpadu patří technologie Nexus a Thide Environnement (McKay Group LLC, 2009). Proces Nexus provádí pyrolýzu netříděného tuhého komunálního odpadu v uzavřených zásobnících při 500 °C. To by se mělo rovnat způsobu pyrolýzy se zhuštěnou vrstvou. Ohřívání může trvat několik hodin. Produkce plynu je 64 %, včetně páry a olejových výparů. Zbytek tvoří tuhé částice. Tyto částice obsahují zuhelnatělé zbytky biomasy, kovy sklo a popel. Vytvořený plyn se spaluje v kotli bez jakékoliv úpravy nebo chlazení. Výfukové plyny z kotle se filtrují a čistí, aby se odstranily kyselé plyny. Kvůli vysokému obsahu oleje se prakticky neprovádí chlazení a čištění syntézního plynu pro použití v plynové turbíně. V procesu Thide Environnement se provádí pyrolýza rovněž při 500 °C. Pyrolýza se provádí v otáčejícím se bubnu zahříváném zvnějšku. Údaje o tepelné a hmotnostní bilanci tohoto procesu nebyly zveřejněny.

Pyrolýza se již komerčně používá v kovoprůmyslu k úpravě kontaminovaného nezelezného odpadu. Příkladem může být proces Alcan používaný k odstranění nátěrů z hliníkových nádob (McKay Group LLC, 2009). Existují tudíž dvě možnosti, jak regenerovat kontaminované kovy – nejdříve separace, potom pyrolýza, nebo nejprve pyrolýza a potom separace. První způsob je pravděpodobně levnější, ale druhý může opětovně získat více kovu.

Byly prováděny rozsáhlé výzkumy pyrolýzy s ohledem na konverzi polymerů zpět na petrochemické suroviny. Polyetylén a polypropylén se rychle rozkládají při teplotách mezi 400 až 600 °C a vzniká komplexní směs olefinů a alkanů. Při teplotě 400 °C jsou hlavním produktem vosky. Podíl plynu se zvyšuje s rostoucí teplotou. Polystyrén se zpočátku rozkládá při teplotě 290 °C na styrén, difenylbuten a trifenylbuten. Při dlouhodobém zahřívání nebo při vyšších teplotách tvoří tyto složky zejména toluen, etylbenzen, kumen (isopropylbenzen) a trifenylbenzen.

Polyvinylchlorid PVC se začíná rychle rozkládat při teplotě nad 250 °C a přitom se uvolňuje plynný chlorovodík. Kromě chlorovodíku se uvolňují ještě malá množství benzenu a jiných uhlovodíků. Při vyšších teplotách dehydrochlorovaný polyen byl podroben dalšímu krakování za vzniku směsi alifatických a aromatických sloučenin a zuhelnatělých zbytků.

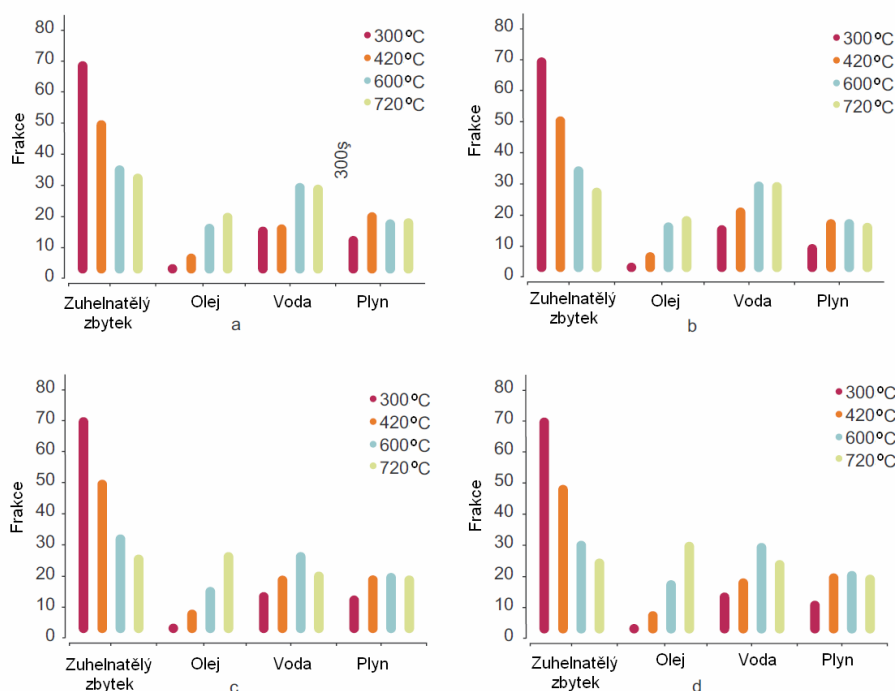
Polyetylén PET se rozkládá přibližně při 300 °C na směs tvořenou monomery tereftalové kyseliny (kyselina 1,4 benzendekarboxylová) a vinylesterových oligomérů. Delší doby reakce a vyšší teploty dávají vznik těkavým látkám zahrnujících kyselinu mravenčí, acetaldehyd, oxidy uhlíku etylén a vodu.

Pyrolýza plastů s vysokým obsahem PVC vyžaduje zvláštní metody. Jednou z možností je přidání vápna. Vápno reaguje s PVC a vytváří chlorid vápenatý. Ve fluidní vrstvě tvoří chlorid vápenatý nežádoucí shluky částic.

Chlorovodík se uvolňuje z PVC za podstatně nižších teplot, než jsou ty, které se používají při pyrolýze, kdy se vytváří převážná část uhlovodíkových plynů. Je tudíž možné odštěpit většinu chlóru z PVC při teplotě nad 300 °C a odděleně ho shromažďovat. Protože tímto způsobem nemůže být odstraněn všechny chlór, je potřeba další úprava. Může se přidat čpavek místo vápna za vzniku chloridu amonného. Chlorid amonný představuje menší problém ve fluidní vrstvě.

Pyrolýza směsí plastů produkuje oleje, které obvykle obsahují 50 až 500 ppm organicky vázaného chlóru. Naštěstí nebyly zjištěny žádné chlorované dibenzo-dioxiny v organických chloridech. Jestliže jsou dioxiny obsaženy již ve výchozí surovině, potom se jejich hladina sníží fluidní pyrolýzou o 75 %. Aby bylo možné použít vyrobené oleje v petrochemickém průmyslu, měl by být obsah organických chloridů nižší než 10 ppm. Toho je možné dosáhnout přidáním sodíkové páry k syntéznímu plynu při teplotě 500 °C.

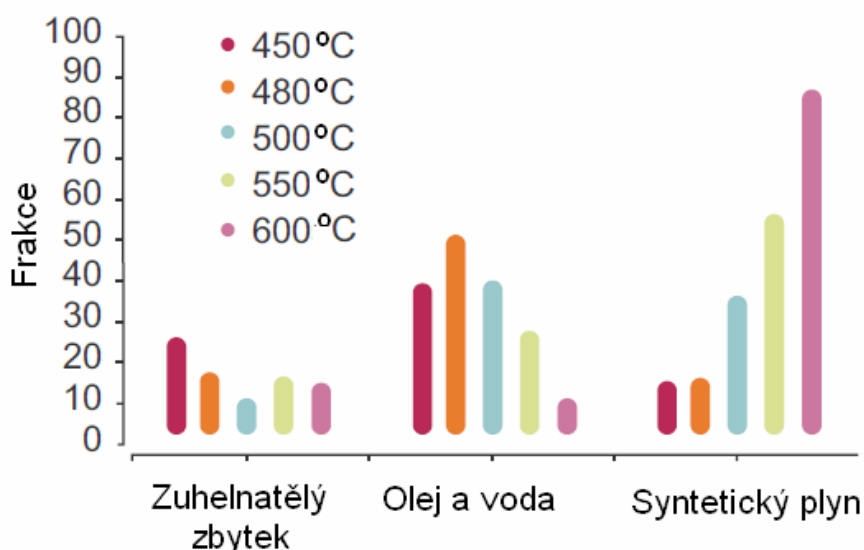
Analýza konečného produktu z procesů tepelného rozkladu ukazuje závislost na teplotě a rychlosti ohřevu. Williams and Besler, 1992 provedli systematickou analýzu výtěžnosti produktu, tj. tříděného komunálního a průmyslového odpadu (TAP), použitím pyrolýzy při teplotách 300 a 720 °C a při různých rychlostech ohřevu. Výsledky jsou zobrazeny na obr. 16.



Obr. 16: Výtěžnost produktu v % m/m z pyrolýzy TAP na zhuštěné vrstvě při různých rychlostech ohřívání: 5 °C/min (červená), 20 °C/min (oranžová), 40 °C/min (modrá), 80 °C/min (zelená) (zdroj: Williams and Besler, 1992)

Obr. 16 ukazuje, že rostoucí teplota při pyrolýze snižuje produkci zuhelnatělého odpadu a zvyšuje produkci oleje a vody. Produkce plynu se zvyšuje při teplotách mezi 300 až 420 °C, ale dále už zůstává konstantní. Rozdíly ve výtěžnosti při rostoucí rychlosti ohřevu byly mnohem menší, než rozdíly při různých teplotách. Když se zvyšovaly rychlosti ohřevu, produkce zuhelnatělých zbytků mírně klesala a produkce oleje naopak rostla. Rychlosti ohřevu použité v tomto pokusu byly velmi malé. Změny ve výtěžnosti jsou významné při velmi rychlém ohřevu 700 °C za sekundu. Ohřev se při těchto rychlostech nazývá rychlá pyrolýza. Při rychlé pyrolýze při teplotách nižších než 600 °C je produkce oleje velmi vysoká. Při teplotách nad 700 °C je zase velmi vysoká produkce plynu.

Uvolňování plynu v průběhu pyrolýzy je rovněž závislé na způsobu zpracování. Ve své studii uvádí Williams and Besler, 1992, že dochází k mnohem většímu uvolňování plynu z TAP, jestliže je tento odpad zpracován ve fluidní vrstvě, než je tomu při zpracování v zhuštěné vrstvě. Obr. 17 uvádí výtěžnost produktu u TAP zpracovaného s použitím reaktoru s fluidní vrstvou, kdy se výtěžnost syntézního plynu zvyšuje až na 75 %. Tříděný komunální a průmyslový odpad (TAP) použitý v této studii se lišil od odpadu použitého pro studii na obr. 16, jehož pyrolýzou v zhuštěné vrstvě při 700 °C bylo získáno 48,6 % kondenzátů a pouze 16,6 % plynu.



Obr. 17: Výtěžnost produktu v % m/m z pyrolýzy TAP ve fluidní vrstvě (zdroj: Williams and Besler, 1992)

Tab. 9 uvádí kvantitativní analýzu produktů pyrolýzy výše uvedených plastů ve fluidní vrstvě při 550 °C. Složení plynu je pak uvedeno v tab. 10. Jestliže jsou plastické hmoty smíchány a společně projdou pyrolýzou, jejich složky na sebe vzájemně působí. Z tohoto důvodu není možné z údajů o pyrolýze těchto jednotlivých plastických hmot předpovědět, jaké bude složení syntézního plynu. Tab. 11 ukazuje, že smíchané plastické hmoty v poměrech zjištěných v komunálním odpadu vytváří taková složení plynů, která jsou funkcí teploty, za které probíhá pyrolýza. Produkce plynů roste s teplotou.

Universita v Hamburгу podle McKay Group LLC, 2009 prováděla rozsáhlé studie pyrolýzy smíšeného a tříděného odpadu z plastických hmot v teplotním rozmezí 600 až 900 °C s použitím laboratorního provozu. V procesu byla využívána fluidní vrstva s čistým plynem z pyrolýzy jako fluidním plynem. Údaje zjištěné na této universitě ukazují, že pyrolýza smíšeného plastického odpadu při teplotě 735 °C podává úplnější přehled o organických plynech a kapalině vzniklých tímto procesem (tab. 12). Produkce plynu uvedená v tab. 12 je podobná produkci plynu v tab. 11, ale je třeba říci, že neexistuje konečná hmotnostní bilance pro pyrolýzu plastových odpadů. V údajích v tab. 12 není uvedena koncentrace chlorovodíku.

Tabulka 9: Výtěžnosti (% m/m) pro pyrolýzu s fluidní vrstvou u jednotlivých plastických hmot při teplotě 550 °C (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

Výrobek	Polyetylén s vysokou hustotou (HDPE)	Polyetylén s nízkou hustotou (LDPE)	Polypropylén (PP)	Polystyrén (PS)	Polyvinylchlorid (PVC)	Polyetylén (PET)
Plyn	11,4	21,4	6,5	0,7	3,9	49,1
Olej	36,8	17,8	31,5	59,0	22,1	23,5
Vosk	29,9	35,4	38,3	12,4	0,0	15,9
Zuhelnatělý zbytek	0,0	0,0	0,0	0,0	13,5	12,8
HCl	0,0	0,0	0,0	0,0	31,7	0,0

Tabulka 10: Výtěžnost plynu (% m/m) pro pyrolýzu s fluidní vrstvou u jednotlivých plastických hmot při teplotě 550 °C (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

Plyn	Polyetylén s vysokou hustotou (HDPE)	Polyetylén s nízkou hustotou (LDPE)	Polypropylén (PP)	Polystyrén (PS)	Polyvinylchlorid (PVC)	Polyetylén (PET)
Vodík	0,13	0,23	0,24	0,01	0,20	0,06
Methan	0,86	1,52	0,44	0,08	0,79	0,41
Ethan	0,90	1,71	0,45	<0,01	0,55	0,20
Etylén	3,01	5,33	1,48	0,09	0,51	1,27
Propan	0,79	0,84	0,67	<0,01	0,28	0,00
Propylén	2,26	4,80	1,08	0,02	0,54	1,60
Butan	0,35	0,55	0,26	0,00	0,11	0,00
Butylen	2,34	6,40	1,95	0,02	0,92	0,00
CO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,28
CO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,49
HCl	0,00	0,00	0,00	0,00	31,70	0,00

Tabulka 11: Výtěžnost plynu (% m/m) pro pyrolýzu s fluidní vrstvou směsi plastických hmot (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

Teplota	500 °C	550 °C	600 °C	650 °C	700 °C
Vodík	0,35	0,22	0,32	0,75	0,62
Methan	0,70	2,87	4,09	12,56	11,09
Ethan	0,97	2,39	4,44	8,93	5,66
Etylén	1,56	5,65	8,98	25,11	26,67
Propan	0,72	1,26	1,47	1,18	0,98
Propylén	9,35	5,53	9,65	22,92	16,46
Butan	0,22	0,24	0,34	0,18	0,06
Butylen	1,43	6,35	6,46	13,64	4,68
CO <sub>2</sub>	-	-	5,00	3,47	1,93
CO	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
HCl	1,76	1,42	4,13	0,80	0,51
CELKEM	17,06	25,93	44,88	89,54	68,66

Tabulka 12: Výrobky z pyrolýzy odpadních plastických hmot ve fluidní vrstvě při teplotě 735 °C \*) (% m/m) (zdroj: McKay Group LLC, 2009)

Výchozí surovina	Směs plastických hmot (7,39 % Cl)	Směs plastických hmot bez PVC	Odpad ze sešrotovaných aut
Vodík	0,2	0,5	0,7
Methan	7,8	15,8	12,1
Ethan	2,5	4,2	2,4
Etylén	7,1	10,8	3,7
Propan	0,2	0,3	0,3
Propylén	2,7	3,5	1,8
Jiné alifatické sloučeniny	0,3	3,0	0,8
Benzen	5,8	9,1	5,5
Toluen	2,4	7,4	5,1
Xyleny, ethyl benzen	1,4	0,4	0,9
Styren	4,4	6,9	0,6
Indan	0,7	1,2	0,1
Naftalen	1,0	2,1	1,2
Methyl naftalen	0,4	0,9	0,4
Difenyl	0,1	0,4	0,3
Fluoren	0,1	0,2	0,1
Fenanthrén/antracén	0,3	0,5	0,3
Pyren	-	0,1	0,1
Jiné aromatické sloučeniny	12,3	11,0	11,8
Oxid uhelnatý	4,9	2,7	4,8
Oxid uhličitý	7,2	1,0	1,8
Voda	3,0	3,0	1,8
Sirovodík	-	-	0,01
Thiofen	-	-	0,02
Saze	5,2	8,4	27,6
Tmelý/kovy	28,4	4,9	14,0

\*) Směs odpadních plastických hmot byla vyříděna z odpadu z domácností. Sloupec 3 obsahuje stejný odpad jako sloupec 2, ale bez PVC. Snížený obsah tmelů a kovů u odpadu bez PVC zahrnuje dodatečné vyřídění neplastických hmot.

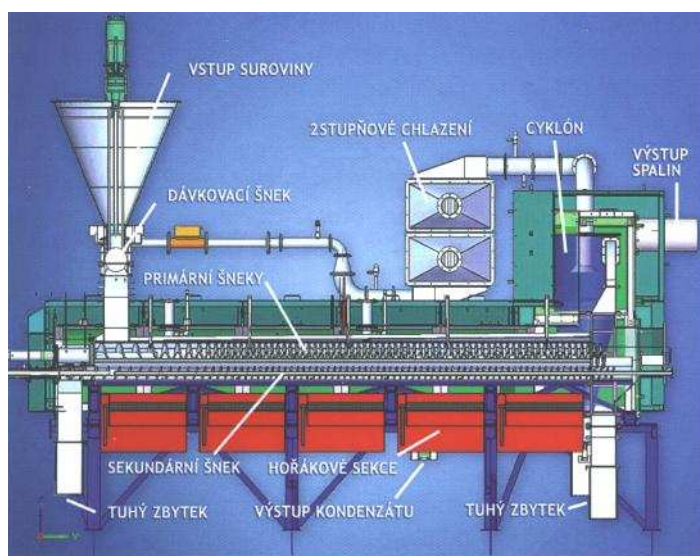
#### II.3.4 Termolýzní procesy ověřené a vyvíjené v ČR

V ČR se termolýzním procesům věnují některé výzkumné ústavy a vývojové organizace v rámci řešení souvisejících projektů (Šejvl, 2012). Ústav fyziky plazmatu AV ČR se zaměřoval v letech 2008 - 2010 na pyrolýzu organických látek a biomasy v plazmatu oblouku s kombinovanou stabilizací vodou a plynem ([www.isvav.cz](http://www.isvav.cz)).

V tlakové plynárně Vřesová, která patří Sokolovské uhelné, a.s. se zatím zplyňuje hnědé uhlí a vyrobený energoplyn se po vyčištění využívá na výrobu elektřiny v elektrárně Vřesová. V minulých letech zde proběhlo úspěšné ověření spoluzplyňování certifikovaného TAP v množství do 10 % m/m vsázky hnědého uhlí. Pro komerční využívání tohoto způsobu však zatím nebylo z důvodu legislativních překážek vydáno integrované povolení ([www.odpadoveforum.cz](http://www.odpadoveforum.cz)).

V roce 2000 (Aldorf, Z., 2003) byl na VUT v Brně postaven experimentální fluidní atmosférický generátor, který mohl pracovat ve zplyňovacím režimu pro zpracování zejména zbytkových dřevin. Strojní zařízení bylo vyrobeno v ATEKO, a.s. Hradec Králové pod názvem Biofluid s tepelným výkonem produkovaného plynu 100 kW. Výsledky jeho ověřování byly použity k realizaci provozní jednotky v Prachovicích s tepelným výkonem 2,5 MW pro zplyňování TAP. Vyrobený plyn sloužil jako zdroj energie při výrobě vápna. Po změně vlastníka firmy byl spolu s koncem výroby vápna ukončen i provoz zplyňování, a tím došlo i ke zrušení tohoto zařízení.

Na problematice pyrolýzy tříděných odpadů v prototypové lince Pyromatic (obr. 18) navržené odborníky organizace Envicrack se intenzivně pracuje na VŠB v Ostravě. Záměrem je realizace demonstračního provozu s výkonností  $500 \text{ kg.h}^{-1}$  tříděných odpadů a její využívání jako testovací jednotka (Šejvl, 2012).



Obr. 18: Schéma pyrolýzního zařízení Pyromatic pro zpracování tříděných odpadů (zdroj: Šejvl, 2012)

V rámci plnění hlavního cíle projektu MPO v programu „TIP“ ev. č. FR-TIZ/365 „Výzkum technologie umožňující materiálové a energetické využití nerecyklovatelných plastových, celulózových a jiných obdobných odpadů“, jehož řešitelem byl PolyComp, a.s. Poděbrady a spoluřešitel VÚZT, v.v.i. Praha, byly v roce 2010 - 2011 realizovány v kontejnerovém provedení dvě zkušební linky pro termolýzu separovaných spalitelných odpadů standardizovaných do podoby TAP a tuhých biopaliv s velikostí částic do 40 mm. Vývojová zkušební linka je dimenzována pro výkonnost do  $2 \text{ kg.h}^{-1}$  (obr. 19 a 20) a technologická zkušební linka pro výkonnost do  $20 \text{ kg.h}^{-1}$  vstupní suroviny (obr. 21 - 24). Obě zařízení jsou elektricky vytápěné, což umožňuje pohodlné nastavování teplot s monitorováním všech důležitých teplotních parametrů, měřením spotřeby elektrické energie, bezpečnostní inertizací a operací praní, čištění a kondenzací syntézního plynu.

Technologický proces obou linek je totožný. Vývojová zkušební linka je určena pro základní zkoušky a stanovení parametrů jednotlivých operací. Technologická zkušební linka slouží pro ověřování zvolených technologických procesů a operací v režimu ověřovacího pilotního provozu po určité časové období ke stanovení nezbytných bilancí. Technologická zkušební linka je rozdělena na provozní soubory: PS 01 - Karbonizace, PS 02 - Zplyňování, PS 03 - Praní surového syntézního plynu, PS 04 - Chlazení čistého syntézního plynu, PS 05 - Spalování syntézního plynu a PS 06 - Tlakování a inertizace zařízení.



Obr. 19: Pohled na řešení vývojové zkušební linky dvoustupňové termolýzy s výkonností do  $2 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  vstupní suroviny v PolyComp, a.s. Poděbrady



Obr. 20: Pohled na vytápěné sekce trubkového reaktoru se šnekovnicí vývojové zkušební linky dvoustupňové termolýzy s výkonností do  $2 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  vstupní suroviny v PolyComp, a.s. Poděbrady

Uplatňuje se zde dvoustupňový technologický proces, a to v prvním pyrolýzním stupni karbonizace zpracovávané suroviny při teplotách  $500 - 650 \text{ }^\circ\text{C}$  a ve druhém stupni zplyňování všech výstupů z karbonizace v rozsahu teplot  $800 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Výstupem z karbonizačního reaktoru je jednak výhřevný surový syntézní plyn, obsahující řadu kapalných uhlovodíků, které jsou s ohledem na teplotu v této části ještě v plynném stavu, jednak tuhý karbonizační zbytek. Surový syntézní plyn je vypírán v lehkých uhlovodících - pro technologickou zkušební linku byl zvolen xylen a potom dále ochlazován, kde jsou kondenzací odstraňovány lehké uhlovodíky a voda. Vzniklé výstupy, tj. odkal a úsady z pracího procesu, vodní kondenzát a přebytek lehkých kapalných uhlovodíků, jsou zaváděny zpět do zplyňovacího procesu.



Obr. 21: Pohled na část PS01 Karbonizace technologické zkušební linky s výkonností do  $20 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  vstupní suroviny v PolyComp, a.s. Poděbrady - dávkování do trubkového pyrolýzního reaktoru



Obr. 22: Pohled na část PS02 Zplyňování technologické zkušební linky s výkonností do  $20 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  vstupní suroviny v PolyComp, a.s. Poděbrady





Obr. 23: Hydraulické zařízení pro pohon pístů trubkových reaktorů pro karbonizaci a zplyňování technologické zkušební linky s výkonností do 20 kg.h<sup>-1</sup> vstupní suroviny v PolyComp, a.s. Poděbrady



Obr. 24: Pohled na část PS03 Praní surového syntézního plynu technologické zkušební linky s výkonností do 20 kg.h<sup>-1</sup> vstupní suroviny v PolyComp, a.s. Poděbrady

Ověřování těchto zařízení proběhlo při zpracování TAP - MEVO ve formě „fluff“ (obr. 25), jehož palivářské vlastnosti uvádí tab. 13. V ČSN EN 15357 (2011) je fluff definován jako sypký materiál o nízké hustotě, který má schopnost být unášen vzduchem. Proto bylo s ohledem na řešení termolýzních trubkových reaktorů nutné ověřit jeho schopnosti a navrhnout způsoby dopravy a lisování (obr. 26).

Tabulka 13: Palivářské vlastnosti vzorku MEVO obsahující cca 15 % m/m biomasy, 30 % m/m celulózy, 5 % m/m textilu, 5 % m/m pryže a 45 % m/m plastů

		Jednotka	Vzorek původní r	Vzorek bezvodý d	Hořlavina daf
Voda	W	% m/m	8,18	-	-
Popel	A	% m/m	11,00	11,98	-
Hořlavina (100-W-A)		% m/m	80,82	88,02	100,00
Spalné teplo	Q <sub>s</sub>	MJ/kg	26,97	29,37	33,37
Výhřevnost	Q <sub>i</sub>	MJ/kg	25,14	27,59	31,35
Vodík	H	% m/m	7,48	8,18	9,26
Uhlík	C	% m/m	57,08	62,17	70,63
Dusík	N	% m/m	0,95	1,04	1,18
Kyslík	O	% m/m	15,17	16,51	18,76
Síra veškerá	S <sub>t</sub>	% m/m	0,14	0,15	0,17
Chlór	Cl	mg/kg		33 637	



Obr. 25: Smíchané šarže fluff pro zkoušky v rámci projektu MEVO



Obr. 26: Zkoušky schopnosti dopravy a lisování TAP - MEVO ve formě fluff

V rámci výzkumu bylo provedeno 25 termolýzních zkoušek tohoto TAP - MEVO v kombinaci teplot 320 - 600 °C v prvním stupni karbonizace a 440 - 900 °C ve druhém zplyňovacím stupni. Jako nástřik do druhého zplyňovacího stupně byla použita voda. Rozbory vzorků syntézních plynů a související zpracování provedla analytická laboratoř TESO® Praha 2. Stanovení bylo provedeno metodou plynové chromatografie na náplňových kolonách s tepelně-vodivostní a plamenoionizační detekcí. Nejlepší výsledky energetických parametrů získaných syntézních plynů uvádí tab. 14. Při optimálních teplotních parametrech bylo dosaženo výhřevnosti syntézního plynu ze zkoušeného TAP - MEVO v rozsahu 19,8 - 28,5 MJ.m<sup>-3</sup><sub>N</sub>. To při přepočtu výsledků rozborů po odečtení ředícího vzduchu, tj. na nulovou koncentraci kyslíku, představuje hodnotu výhřevnosti mezi 36,5 - 42 MJ.m<sup>-3</sup><sub>N</sub>. Tyto parametry jsou plně srovnatelné s výhřevností zemního plynu. Výsledky potvrzují správnost navrženého a ve zkušebním provozu ověřeného dvoustupňového procesu. Získané výsledky jsou určeny ke zpracování návrhu demonstrační provozní jednotky s výkonností 250 kg.h<sup>-1</sup> vstupní suroviny. Zařazením dvou, ev. více reaktorů lze výkonnost příslušně zvýšit. Tím lze zajistit roční provozní kapacitu zpracování kolem 5000 t TAP a standardizované zbytkové biomasy na syntézní plyn a jeho energetické využití v rámci decentralizovaných provozů. Dále lze minimalizovat ekologickou zátěž nevhodným nakládáním s komunálním a průmyslovým odpadem a také dopravní náklady.

Ukazuje se, že při budoucím projektování výstavby provozních jednotek pro termolýzu tříděných komunálních a průmyslových odpadů nejčastěji ve formě TAP je vhodné tato zařízení umísťovat v blízkosti linek na dotřídování vyseparovaných složek, kterými jsou některá města již vybavena. Při přípravě výstavby tohoto zařízení je proto nutné provést podrobný průzkum území z hlediska současných a výhledových možností nakládání s odpady a zbytky biomasy jako součást podnikatelského záměru. K-STIMA, spol. s r.o., Praha v rámci základní studie projektu MPO č. FR-TIZ/365 vytipoval, že je možné za předpokladu úspěšného dokončení vývoje a ověření prototypu postavit na území ČR 16 - 20 obdobných zařízení.

Realizovaná vývojová a zkušební technologická linka bude dále sloužit jako testovací jednotka pro optimalizaci procesu pyrolýzy, karbonizace a zplyňování různých tříděných frakcí průmyslových a komunálních odpadů, TAP, biogenních zbytků a biomasy upravených do formy tuhých biopaliv a pro stanovení kvality získaných produktů.

Tabulka 14: Nejlepší výsledky energetických parametrů syntézních plynů získaných dvoustupňovým technologickým procesem zpracování TAP - MEVO ve zkušebním zařízení v PolyComp, a.s. Poděbrady

Parametr	Jednotky	Teplota karbonizace <b>550 °C</b> Teplota zplyňování <b>600 °C</b>		Teplota karbonizace <b>600 °C</b> Teplota zplyňování <b>750 °C</b>		Teplota karbonizace <b>550 °C</b> Teplota zplyňování <b>850 °C</b>	
		Výsledky rozboru <sup>1)</sup>	Přepočtené výsledky na nulovou koncentraci kyslíku	Výsledky rozboru <sup>1)</sup>	Přepočtené výsledky na nulovou koncentraci kyslíku	Výsledky rozboru <sup>1)</sup>	Přepočtené výsledky na nulovou koncentraci kyslíku
		Vodík H <sub>2</sub>	%V/V	3,8	5,71	4,09	6,93
Kyslík O <sub>2</sub> + (Argon) (Ar)	10,08	-		8,97	-	6,02	-
Dusík N <sub>2</sub>	43,03	13,11		36,90	8,28	35,36	19,15
Methan CH <sub>4</sub>	9,59	17,76		10,72	18,17	11,83	16,32
Oxid uhelnatý CO	4,66	8,64		4,82	8,17	4,54	6,26
Oxid uhličitý CO <sub>2</sub>	5,00	9,26		4,72	8,00	7,61	10,50
Ethylen C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	5,14	9,52		6,09	10,31	5,67	7,82
Ethan C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5,89	10,91		7,61	12,89	3,91	5,40
Suma C <sub>3</sub>	6,22	11,53		7,98	13,52	6,72	9,27
Suma C <sub>4</sub>	2,41	4,46		3,27	5,54	5,67	7,82
Suma C <sub>5</sub>	0,57	1,06		0,80	1,35	3,91	5,40
Hustota syntézního plynu za normálních podmínek	kg.m <sup>-3</sup> <sub>N</sub>	1,280		1,273	1,287	1,286	1,355
Spalné teplo syntézního plynu	MJ.m <sup>-3</sup> <sub>N</sub>	21,33	39,52	26,62	45,11	30,63	42,24
<b>Výhřevnost syntézního plynu</b>		<b>19,78</b>	<b>36,65</b>	<b>24,49</b>	<b>41,84</b>	<b>28,48</b>	<b>39,28</b>

<sup>1)</sup> Analytická laboratoř TESO<sup>®</sup> odhadla nejistoty jednotlivého stanovení O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub> na 6 %; H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> na 10 %; Σ C<sub>3</sub>, Σ C<sub>5</sub> na 15 %. Není možné zcela vyloučit, že koncentrace vodíku byly v době odběru vzorků poněkud vyšší a koncentrace ostatních složek nižší.

### II.3.5 Orientační ekonomická a environmentální hlediska

Nejen z technického, ale i ekonomického a environmentálního hlediska je velmi důležité podrobně sledovat celý řetězec termolýzního zpracování počínaje získáním zbytkového a odpadového materiálu, až po způsob jeho konečného energeticko surovinového využití. Jak biomasa, tak průmyslové a komunální odpady jsou regionálně rozptýlené, tzn. musí být velkoplošně soustředěny a dopravovány příslušně dlouhými cestami. Také zde se proto klade otázka ekonomicky obhájitelných dopravních tras. Zvyšováním hustoty energie je možné podstatně snížit dopravu, skladované množství a náklady. Při zpracování biomasy

pyrolýzou a karbonizací je velkou výhodou možnost časového a prostorového oddělení výroby meziprojektu biooleje a biokoksu, energeticky bohatších než vstupní materiál. Zplyňování, kondicionování a další zpracování syntézního plynu (např. methanol, BTL) může probíhat centrálně v ekonomicky účelném velkokapacitním zařízení.

V roce 2007 zpracovali Bandi a Specht expertízu nákladovosti výroby methanolu ze syntézního plynu v demonstračních zařízeních, z nichž některé jsou popsány v části II.3.1 této metodiky. Výsledky uvádí tab. 15. Pokud zohledníme současnou burzovní cenu methanolu ze zemního plynu (konec července 2012) ve výši 290 - 305 EUR.t<sup>-1</sup>, přičemž výrobní náklady nepřevyšují 110 EUR.t<sup>-1</sup>, jsou výrobní náklady z biomasy zatím nekonkurenceschopné. S tím souvisí i současná insolvence společnosti CHOREN ve Freibergu (viz str. 13).

Tabulka 15: Souhrn orientačních technicko-ekonomických údajů sledovaných zařízení pro výrobu methanolu (zdroj: Bandi and Specht, 2007)

	CHOREN (biomasa)	SVZ Schwarze Pumpe (odpady + uhlí)	Güssing (biomasa)	CHEMREC Švédsko (černý výluh z výroby celulózy)	LPMEOH™ Air Products (uhlí)
Velikost zařízení	400 000 t <sub>MeOH</sub> /rok <sup>1</sup>	120 000 t <sub>MeOH</sub> /rok	300	410 000 t <sub>MeOH</sub> /rok (střední velikost produkce buničiny)	160 000 t <sub>MeOH</sub> /rok
Použitelnost komerčního zařízení	85 %	85 – 95 %	90 %	90 %	-
Energetická účinnost <sup>5</sup>	54 % (60 %) <sub>2</sub> 80 % <sup>4</sup>	50 % (celková účinnost)	70 – 75 % <sup>3</sup>	-	71 %
Náklady na zařízení	45 mil. €	-	9 mil € <sup>6</sup> 70 - 100 mil. € <sup>7</sup>	150 mil. € (jen zařízení pro methanol)	30 mil. €
Provozní náklady	-	cca 10 % investičních nákladů/rok	10 % investičních nákladů/rok	-	10 % investičních nákladů/rok
Výrobní náklady	400 €/t <sup>8</sup>	150 – 180 €/t <sub>9,10</sub>		180 €/t	110 – 120 €/t <sub>9</sub>

<sup>1</sup> pro zařízení o výkonu 500 MW<sub>th</sub>

<sup>2</sup> 60 % pro větší zařízení

<sup>3</sup> účinnost ochlazeného plynu zplyňovacího zařízení

<sup>4</sup> účinnost zplyňování (ochlazený plyn)

<sup>5</sup> účinnost = výhřevnost produktu/výhřevnost vstupující biomasy

<sup>6</sup> zplyňovací zařízení 8 MW<sub>th</sub>

<sup>7</sup> zplyňovací zařízení 300 MW<sub>th</sub>

<sup>8</sup> s cenou biomasy 70 €/t; údaje z CHOREN, červen 2007 (z nákladů připadá 1/3 na biomasu, 1/3 na personál a 1/3 na provoz, údržbu a opravy)

<sup>9</sup> kombinovaná výroba el. energie a tepla

<sup>10</sup> současné náklady, údaje SVZ (červen 2007)

Nejdůležitější metoda hodnocení vybraných environmentálních účinků je hodnocení životních cyklů, např. podle ČSN ISO 14040-43, přičemž ekvivalent  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  je míra používaná pro emise skleníkového plynu, založená na jeho potenciálu pro globální oteplování. Protože biosyntézní plyny vykazují výsledky mezi 13 - 40 g  $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$ , měly by dosáhnout úspory  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  60 %, jak požaduje směrnice RED. Přitom se považují emise  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  u zbytků a odpadů využívané pro energeticko surovinové využití za nulové jen do okamžiku sběru.

Vedle ročního využití a kapitálových nákladů jsou ekonomické výsledky vysoce citlivé na změnu cen a dostupnost zbytkových a odpadových surovin, včetně dopravy, neboť ty představují 30 - 50 % ceny konečného produktu. Günter, 2008 ze společnosti Lurgi, AG kalkuluje výrobní náklady na BTL při ceně vstupní suché zbytkové biomasy 70  $\text{EUR.t}^{-1}$  v rozsahu 1,05 - 1,1  $\text{EUR.kg}^{-1}$ . Při současné ceně motorové nafty bez spotřební daně 0,7 - 0,8  $\text{EUR.kg}^{-1}$  jsou to ceny o 30 - 40 % vyšší a konkurenceschopné by byly pouze s cenou motorové nafty včetně spotřební daně. Proto musí rozhodování o investicích předcházet důkladná analýza a hodnocení rizik. Úspěšný provoz demonstračních zařízení je důkazem praktičnosti uplatněných postupů, zdrojem podkladů k dalšímu vývoji do obchodně významné velikosti a spolehlivého stanovení výrobních nákladů.

## II.4 Závěr

Termolýza je tepelný rozklad, ke kterému dochází za nepřítomnosti kyslíku. Je to vždy také první fáze při spalování a zplyňování. Avšak po těchto procesech následuje úplná nebo částečná oxidace hlavních produktů. Nižší teploty během procesu a delší doby zdržení v reaktorech umožňují výrobu pyrolýzního koksu. Vysoké teploty a delší doby zdržení urychlují přeměnu na plyn, zatímco střední teploty a krátká doba zdržení jsou optimální pro výrobu kapalin.

Pyrolýzní postup má schopnost konvertovat téměř veškerou energii obsaženou ve vstupní surovině. Protože jde o proces endotermní, část získané energie (především koksu a plynu) v množství 15 - 20 % slouží ke krytí energetických potřeb technologického procesu. Modifikace pyrolýzy, jako je rychlá pyrolýza, karbonizace, torefakce (torrefaction), hydrolýza a rozvíjející se tepelná depolymerace a hydrotermální karbonizace, jsou velmi vhodné i pro decentralizované provozy. Získané meziproducty s výrazně vyšší energetickou hodnotou než vstupní surovina lze poté dopravovat do centrálních rafinérských závodů k dalšímu zpracování na syntézní plyn, kapalná paliva a chemické suroviny. Konverze primární energie ze vstupní suroviny při zplyňování u velmi dobře řízených procesů může dosahovat i něco málo přes 95 %. Výslednou účinnost ovšem ovlivňují energetické nároky vlastní technologie. Je-li získaný plyn použit pro výrobu elektrické energie a tepla, konverzní účinnost se mění v závislosti na typu generátoru a v případě nepřímého zplyňování (alotermního) může být až 87 %.

Zplyňování se potýká s obdobnými problémy jako spalování odpadů. Od obou těchto procesů se požaduje, aby zpracovávaly podobné toky odpadů s přesně stanoveným množstvím těžkých kovů, chlórů, síry a dusičnanů. V obou případech mohou těžké kovy vytvářet chloridy, které mohou procházet jednoduchými filtry ve formě páry. Podobně se ve srovnatelných množstvích tvoří plyny, jako chlorovodík a oxid siřičitý. Při zplyňování je pravděpodobnější, že dusík vázaný v palivu vytvoří čpavek, než oxidy dusíku. To znamená, že pro úpravu syntézního plynu by bylo třeba použít katalytické krakování.

V obou případech existuje možnost tvorby dioxinů de-novo syntézou (syntéza větší molekuly z velmi malých molekul). Avšak existuje vzájemný vztah mezi produkcí dioxinů a koncentrací kyslíku. Při zplyňování, kdy jsou koncentrace kyslíku v chlazených plynech velmi nízké, vzniká rovněž velmi malé množství dioxinů. Bylo prokázáno, že emise dioxinů

ve výfukových plynech a jejich koncentrace ve zbytcích po zplyňování jsou v případě závodů popisovaných v metodice pod zjistitelnou hranicí.

Demonstrační provozy vyrábějící plyn využívají spíše tříděný komunální a průmyslový odpad (TAP) než surový odpad. Avšak v zájmu objektivního srovnání by měla být produkce plynů vztažena zpětně na množství surového odpadu přijatého závodem zpracovávajícím TAP.

V důsledku sníženého objemu plynu s podobnými koncentracemi částic na bázi křemičitanů, ale s 5x vyšší koncentrací chloridů kovů a kyselých plynů, dojde k určitým úsporám nákladů na zařízení na čištění plynu. Významných úspor je však možné dosáhnout, jestliže se přidá k odpadu před pyrolýzou vápenec (dolomit) za účelem odstranění vznikajícího chlorovodíku a oxidu siřičitého a není pak třeba syntézní plyn složitě vypírat.

Velká výhoda zplyňování ve srovnání se spalováním odpadu spočívá v možnosti velmi efektivní výroby elektřiny. Čím více elektřiny může být vyrobeno z odpadu, tím méně se jí musí vyrobit z fosilních paliv, což má za následek nižší emise skleníkového plynu. Zvýšená efektivnost výroby elektřiny může také snížit provozní náklady.

Efektivnost výroby elektřiny spalováním odpadu se obvykle pohybuje v rozmezí 20 - 27 %. To je velmi málo ve srovnání s její výrobou ve velkých elektrárnách spalujících uhlí (= 36 %), nebo ze zemního plynu v kombinovaném cyklu s použitím plynových turbín (50 - 55 %). Důležitým argumentem ve prospěch zplyňování je proto vyšší účinnost tohoto způsobu výroby.

Jestliže je cílem zplyňování výroba elektřiny s co nejvyšší možnou efektivností, pak musí být plyn spalován především v turbíně. Zařízeními použitými ke spalování syntézního plynu jsou upravené plynové turbíny, které byly původně zkonstruovány ke spalování zemního plynu. Značné efektivnosti by se mělo dosáhnout s pomocí turbín konstruovaných výhradně ke spalování nízko výhřevného syntézního plynu. Je nezbytné vyrobený syntézní plyn vždy vyčistit, aby se snížila hladina chlorovodíku. To se musí provést při teplotě pod 850 °C. Aby se zajistilo, že dojde jen k velmi malé ztrátě původní energie v palivu, měl by být plyn chlazen regeneračně.

Při srovnání procesu výroby plynu reakcí s kyslíkem používaným společností PROLER, s procesem výroby plynu reakcí se vzduchem používaným společností TPS, je jasné, že výhřevnost syntézního plynu souvisí s koncentrací methanu a vyšších uhlovodíků. Plyn z plynového generátoru TPS má vyšší koncentraci methanu a jiných uhlovodíků. Tato skutečnost může být závislá na povaze použitého odpadu. Avšak při objektivním srovnání obou procesů, kdy jsou použity stejné vstupní odpadní suroviny, by byla téměř jistě zaznamenána nižší výhřevnost syntézního plynu v případě výroby plynu reakcí se vzduchem, avšak při výrobě plynu (zplyňování) reakcí s kyslíkem je nevýhodou především vysoká nákladnost. To se týká i použití vodní páry nebo CO<sub>2</sub>. Proces výroby plynu reakcí s párou (SilvaGas) nabízí zajímavou inovaci ve způsobu, kterým je teplo přiváděno ze spalovací komory do plynového generátoru. Většina tepla potřebného pro výrobu plynu je vedena fluidním médiem (písek) tak, že prochází spalovací komorou zpět do plynového generátoru.

Pyrolýza, zplyňování, jejich kombinace a další vyvíjené postupy jsou pro zpracování upravených zbytků biomasy a organických odpadů (TAP) velmi perspektivní. U popsáných technologických procesů není možné z hlediska současného poznání jednoznačně preferovat některou z nich. Řada popsáných demonstračních provozů s velmi dobrou konverzí se však potýká nejčastěji s logistickými a ekonomickými problémy. Komerční uplatnění těchto technologií není jednoduché a často je i neúspěšné (např. CHOREN Industry a některé provozy Termoselectu), což komplikuje jejich rychlejší prosazování jako standardní technologii dodávanou na klíč. Výzkum a zejména vývoj perspektivních technologických systémů a zařízení však intenzivně pokračuje a měl by v nepříliš vzdálené budoucnosti vyústit v ekonomicky a ekologicky nejvhodnější varianty splňující kritéria udržitelnosti. S tím souvisí

i smysluplné realizace decentralizovaného zpracování vstupních surovin nebo koncepce decentralizovaného předzpracování a centrální zpracování na paliva a suroviny nové generace a související legislativní podpora.

Realizace zkušebních a pilotních technologických jednotek nebo strojů, zajišťující dílčí operace v rámci řešení souvisejících projektů v ČR, by měla urychlit vývoj a výrobu některých aparátů a zařízení celého řetězce zpracování. Kontejnerová vývojová a zkušební technologická linka vybudovaná v PolyComp, a.s. v rámci řešení projektu „TIP“ MPO, odzkoušená na vstupních TAP - MEVO, je určena pro testování a optimalizaci procesu pyrolýzy, karbonizace a zplyňování různých tříděných frakcí odpadů, TAP, biogenních zbytků a biomasy s definovanou granulometrií a stanovení kvality získaných výstupů. Jen úspěšný provoz kompletního demonstračního zařízení je zdrojem podkladů pro realizaci efektivního průmyslového zařízení od dlouhodobého zajištění a logistiky vstupní suroviny až po udržitelné využití všech výstupních produktů.

### **III. SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPU**

V současné době představuje odpadové hospodářství ve většině států světa a i v ČR jeden z nejzávažnějších a nejobtížněji řešitelných problémů. Řešení problematiky využívání odpadů může být pouze technicky a ekonomicky úspěšné, pokud obsahuje nejen vlastní termolýzní zařízení. To samo o sobě většinou nesplňuje podmínky provozní ekonomiky, a proto musí zahrnovat celý odpadový systém v zájmové oblasti zákazníka ve formě komplexního řešení a dodávek celých technologických systémů od svozu, třídění, separace, přes termolýzu, až po využití výstupu z technologie.

Novost předložené metodiky spočívá v komplexním zaměření na problematiku pyrolýzy, karbonizace, zplyňování biomasy, spalitelných částí průmyslového a komunálního odpadu ve formě standardizované vstupní suroviny pro energeticko surovinové využití získaných produktů v souladu se související unijní a národní legislativou a technickými normami. Na základě objasnění inženýrské chemie daných procesů a podrobně uvedené hmotnostní a energetické bilance, kvality energetických nosičů a surovin se uvádí významné trendy v této oblasti, jako jsou integrované kombinované cykly zplyňování (IGCC) a vícestupňové zpracování kombinující výše uvedené termolýzní procesy. Metodika tak reaguje na aktuální potřebu společnosti částečně a udržitelným způsobem nahradit fosilní paliva alternativními a na požadavek snižování emisí skleníkového plynu.

### **IV. POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY**

Metodika uvádí podklady k podpoře rozhodovacích procesů, prognóze směřování dalšího vývoje sledovaných technologií a zpracování záměrů, konstrukčních a vývojových prací v oblasti tepelného zpracování biomasy a organických odpadů. Je určena managementu zemědělských podniků a podniků odpadového hospodářství, výrobcům biopaliv a alternativních paliv. Využití ale především najde u projektantů, vývojových pracovníků a dodavatelů technologických systémů, strojů a zařízení, služeb a výrobků v daném oboru, v neposlední řadě pak u pracovníků zemědělského a odpadového poradenství, studentů a odborné veřejnosti se zájmem o danou problematiku.

## V. SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY

- DAHMEN, N., DINJUS, E., HENRICH, E. BTL – Kraftstoffe mittels dezentraler Schnellpyrolyse – das bioliq – Verfahren des Forschungszentrums Karlsruhe. In. „Kraftstoffe der Zukunft 2006“. 4. Internationaler Fachkongress des BBE und der UFOP, 27./28. November 2006, ICC Berlin, 10 s.
- GÜNTHER, A. Status und Entwicklung von Biokraftstoffen der 1. und 2. Generation für internationale Märkte. In. „Kraftstoffe der Zukunft 2007“. 5. Internationaler Fachkongress des BBE und der UFOP, 26./27. November 2007, ICC Berlin, 11 s.
- GÜNTHER, A. BTL – Biomass to Liquid Technology and Renewable Products – the Thermochemical Route. In. 6. Internationaler Fachkongress des BBE und der UFOP, 1./2. Dezember 2008, ICC Berlin, 12 s.
- REINHARDT, G., ZEMANEK, G. Ökobilanz Bioenergieträger, Basis Daten, Ergebnisse, Bewertung. 1. ed. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin, 2000, 163 s.
- KOTRBA, R. Defining the Alternatives. Biodiesel Magazine, BBI international, USA, March 2008, s. 41 – 47
- EBERT, J. Breakthroughs in Green gasoline production. Biodiesel Magazine, BBI international, USA, July 2008, s. 22 – 27
- BOERRIGTER, H., DRIFT, B. Large-scale production of Fischer-Tropsch diesel from biomass. In. Synthetische Biokraftstoffe, Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V., Münster, 2004, s. 285 – 299
- Inter Engineering: Budgetary proposal processing and proposal of unsorted, unsegregated municipal solid waste according to Biotech BIO2DI process, Villingen, 14. March 2008
- GRUNDMANN, P., HELLEBRAND, J., HEIERMANN, M., LUCKHAUS, CH. Economic analysis of biomass conversion via gasification and fermentation – results from a feasibility study in Northeast Europe. In Development of agricultural technologies and technical means in ecological and energetic aspect, Institute of Agricultural Engineering, LUA, Raudondvaris, 14 – 15 September 2006, s. 211 - 213
- LUO, Z., WANG, S., LIAO, Y., ZHOU, J., GU, Y, CEN, K. Research on biomass fast pyrolysis for liquid fuels. Biomass & Bioenergy 26 (2004), s. 455 - 462
- WALDHEIM, L. et. al. Chrisgas project - manufacture of a clean hydrogen-rich gas through biomass gasification and hat gas upgrading. In Synthetische Biokraftstoffe - Techniken - Potenziale - Perspektiven. Kongress am 03. und 04. November 2005, Autovision Wolsburg, Münster, s. 194 - 209
- MEIER, D. Stand der Pyrolyse und „Biocrude Oil“ (BCO) Erzeugung zur energetischen Nutzung. In Kraftstoffe der Zukunft 2008. 6. Internationaler Fachkongress für Biokraftstoffe des BBE und der UFOP, 1/2 Dezember 2008, ICC Berlin, 10 s.
- KESSLER, M. Xyn-Diesel - High Quality fuel from low quality wood with pyrolysis. In Kraftstoffe der Zukunft 2009. 7. Internationaler Fachkongress für Biokraftstoffe des BBE und der UFOP, 30 November/1 Dezember 2009, ICC Berlin, 15 s.
- BANDI, A., SPECHT, M. Gewinnung von Methanol aus Biomasse. Expertise im Auftrag der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V., UFOP. UFOP Berlin 2007, s. 20
- YAMADA, S., SHIMIZU, M., MIYOSHI, F. Termowaste gasification and reforming process. JFE TECHNICAL REPORT, No. 3 (July 2004), s. 21 - 26
- BERGMAN, P.C.A., BOERSMA, A.R., ZWART, R.W.R., KIEL, J.H.A. (2005) ECN-report ECN-C-05-013 Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations „BIOCOAL“



- ENGLISH, M., WILD, M. (2009) Pellets mit höherem Energieinhalt durch selektive Karbonisierung des Rohmaterials, FFG project report 819023
- JEVIČ, P., ŠEDIVÁ, Z., DUBROVIN, V.O. Sovremennoe sostojanie i perspektivy karbonizacii biomassy metodom torrefakcii (torrefaction). In Trudy 8-j Meždunarodnoj naučno-techničeskoj konferencii - Čast 4 „Vozobnovljajemye istočniki energii, mestnye energoresursy, ekologija“. Moskva, VIESH 2012. s. 273 - 278 (ISBN 978-5903413-22-5)
- McKay Group LLC. Thermal methods of municipal waste treatment. Programme on sustainable resource use. 7803 Blue Spring Drive, Land O'Lakes, FL 34637, 2009, USA. s. 45
- WILLIAMS, P.T. Waste Treatment and Disposal, Wiley, 1998
- Warwickshire Waste Management Forum, [www.warwickshire.gov.uk](http://www.warwickshire.gov.uk)
- Department of the Environment, National Household Waste Analysis Project, Report No. CWM/087/94, HMSO, 1994
- C-Tech Innovation Ltd, [www.capenhurst.com](http://www.capenhurst.com)
- KAYE, G. and LABY, T. Tables of Physical and Chemical Constants, 15th edition, Longman, 1986
- Brandrup, Bittner, Menges and Michaeli, Recycling and Recovery of Plastics, Hanser, 1996
- WasteGen UK Ltd, [www.wastegen.com](http://www.wastegen.com)
- Thermoselect, [www.thermoselect.ch](http://www.thermoselect.ch)
- Niessen, WR., Marks, Ch. and Sommerlad, RE. Evaluation of Gasification and Novel Thermal Processes for the Treatment of Municipal Solid Waste, NREL/TP-430-21612, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, August 1996
- Lurgi Energie, [www.lurgi-lentjes.com](http://www.lurgi-lentjes.com)
- Compact Power, [www.compactpower.co.uk](http://www.compactpower.co.uk)
- Brett Group of Companies, [www.brett.co.uk](http://www.brett.co.uk)
- Energos, [www.energos.com](http://www.energos.com)
- Leibold, H. et al. Hot Gas Cleaning Using Advanced Ceramic Filter Technology, Proceedings TRAWMAR Workshop, Berlin, Germany, ISBN 1 872440 20 7, October 2000
- Gossett, J. and McCarty, P. Heat Treatment of Refuse for Increasing Anaerobic Degradability, 65<sup>th</sup> Annual Meeting American Institute of Chemical Engineers, November 1975
- Diaz, L., Savage, G., Eggerth, L. and Golueke, C. Composition and Recycling of Municipal Solid Waste, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1993
- Steinmüller Valorga, [www.steinmuller-valorga.fr](http://www.steinmuller-valorga.fr)
- Caddet, Thermal Hydrolysis of Sewage Sludge, Caddet Technical Brochure No. 111, [www.caddet.co.uk/brochures/display.phd?id=1939&adv=1](http://www.caddet.co.uk/brochures/display.phd?id=1939&adv=1)
- Chandler, A.J. et al. Municipal Solid Waste Incinerator Residues, Elsevier, 1997
- EU, Directive 2000/76/EC of the European Parliament and Council of 4 December 2000 on the Incineration of Waste, [http://europa.eu.int/comm/environment/wasteinc/newdir/2000-76\\_en.pdf](http://europa.eu.int/comm/environment/wasteinc/newdir/2000-76_en.pdf)
- Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5<sup>th</sup> edition, volume A12, pp214-234
- Bridgewater, A.V. Thermal Conversion of Biomass and Waste: The Status, Conference. Proceedings Gasification, Noordwijk, the Netherlands, IChemE, April 2002
- Alstom, [www.alstom.com](http://www.alstom.com)
- TPS Termiska Processer, [ww.tps.se](http://ww.tps.se)
- Future Energy Resources Corporation, [www.futura-energy.com](http://www.futura-energy.com)

- Rensfelt, E. Atmospheric CFB Gasification: The Gröve Plant and Beyond, International Conference on Gasification and Pyrolysis of Biomass, Stuttgart, Germany, April 1997
- Morris, M. Electricity Production from Solid Waste Fuels Using Advanced Gasification Technology. Swana's Wastecon 1998/ISWA World Congress, North Carolina, USA, 1998
- Piret, Norbet. Advances of Pyrolysis in the Recycling of Organicbearing Non-ferrous metal Scrap Materials, Proceedings of TMS Fall 2002 Extraction and Process Division Meeting, Lulea University, Sweden, edited by Bjorkman, Samuelsson & Wilkstöm, June 2002
- Thide Environnement, [www.thide.com](http://www.thide.com)
- McAvoy, B. and McWeish, J. The Alcan Decoater for UBC Decoating, Proceedings 2<sup>nd</sup> International Symposium - Recycling of Metals and Engineering Materials, TMS, pp203-214, edited by Van Linden, H. L. et al. 1990
- Williams, P.T. and Besler, S. The Pyrolysis of Municipal Solid Waste, Journal of the Institute of Energy No. 65, pp192-200, 1992
- Williams, P.T. and Williams, E.A. The Pyrolysis of Municipal Solid Waste in a Fluidised Bed Reactor, Biomass for Energy and the Environment, Pergamon Press, 1996
- Williams, P.T. and Williams, E.A. Recycling Plastic Waste by Pyrolysis, Journal of the Institute of Energy No. 71, pp81-93, 1998
- Swithenbank, J. et al. Developments in Incinerator Bed Modelling, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies, Brussels, 2001
- HM Inspectorate of Pollution. Determination of Polychlorinated Biphenyls, Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Polychlorinated Dibenzofurans in UK Soils, 1995
- VTT, [www.vtt.fi](http://www.vtt.fi)
- Accentus plc, [www.accentus.co.uk/html/indexenv\\_mset1](http://www.accentus.co.uk/html/indexenv_mset1)
- Environment Agency, Integrated Pollution Prevention and Control & Integrated Pollution Control, Interim Sector Guidance for the Incineration of Waste and Fuel Manufactured from or Including Waste, Scientific and Technical Information Service, Almondsbury, Bristol, 2001
- Warmer Bulletin 18, Journal of the World Resource Foundation, Tonbridge, June 1988
- Chase, H. and Ludlow-Palafox, C. Microwave Pyrolysis for Waste Minimisation: Recovery of Aluminium and Hydrocarbons from packaging Laminates, Cambridge University, UK
- Smith, A., Brown, K., Ogilvie, S., Rushton, K. and Bates, J. Waste Management Options and Climate Change AEA Technology Report ED21158R4, 1, July 2001

## VI. SOUHRN PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE

- PASTOREK, Z., KÁRA, J., JEVIČ, P. Biomasa obnovitelný zdroj energie. 1. vyd. Praha, FCC Public, 2004. 288 s. ISBN 80-86534-06-5
- ANDERT, D., SLADKÝ, V., ABRHAM, Z. Energetické využití pevné biomasy. 1. vyd., VÚZT Praha, VÚZT 2006. 59 s. ISBN 80-86884-19-8
- JEVIČ, P., HUTLA, P., ŠEDIVÁ, Z: Udržitelná výroba a řízení jakosti tuhých paliv na bázi agrárních bioproduktů. Certifikovaná metodika. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2008. 133 s. ISBN 978-80-86884-42-4
- KÁRA, J., HUTLA, P., PATOREK, Z. Využití organických odpadů ze zemědělské výroby a venkovských sídel. Certifikovaná metodika. 1. vyd. Praha, VÚZT, 2008. 84 s. ISBN 978-80-86884-40-0
- JEVIČ, P. Biogenní pohonné hmoty. In Kolektiv: Obnovitelné zdroje energie. Red. H. Gruntorádová, 1. vyd. Praha, Profi Press 2012, s. 62-80. ISBN 978-80-86726-48-9
- ŠEJVL, R. Energie z komunálních odpadů. In Kolektiv: Obnovitelné zdroje energie. Red. H. Gruntorádová, 1. vyd. Praha, Profi Press 2012, s. 190-200. ISBN 978-80-86726-48-9

**Autoři:** Ing. Petr Jevič, CSc., prof. h.c. a kolektiv

**Název:** TERMOLÝZNÍ ZPRACOVÁNÍ ZBYTKOVÉ BIOMASY,  
SEPAROVANÝCH PLASTOVÝCH A CELULÓZOVÝCH PODÍLŮ  
TUHÉHO KOMUNÁLNÍHO ODPADU PRO ENERGETICKÉ A  
SUROVINOVÉ VYUŽITÍ

**Vydal:** Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i., 161 01 Praha 6 Ruzyně

**Náklad:** 75 ks

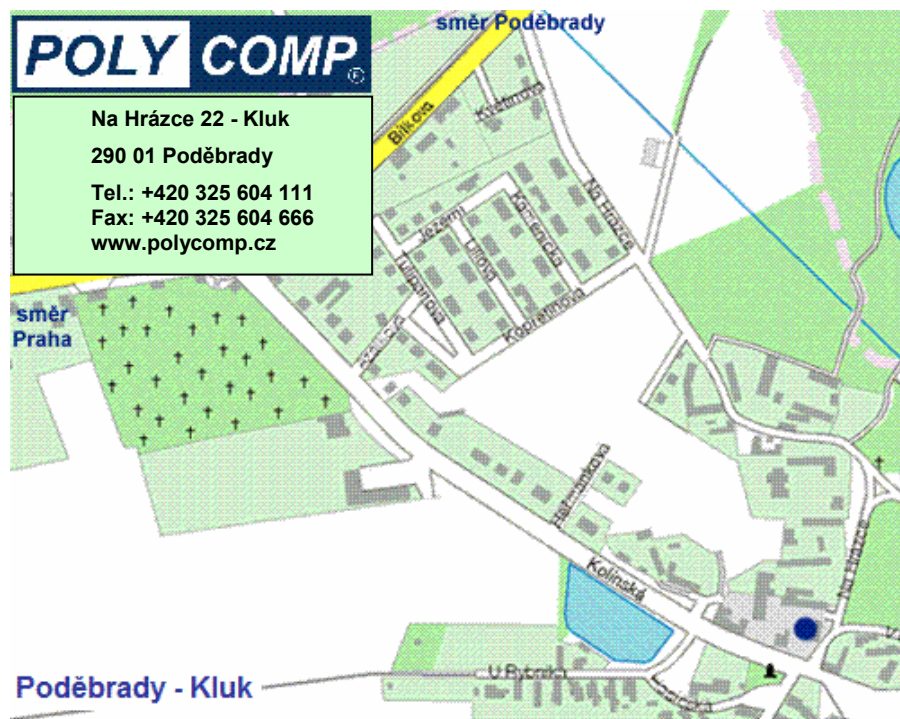
**ISBN:** 978-80-86884-67-7

Vydáno bez jazykové úpravy.

Metodika byla zpracována v rámci řešení projektu Ministerstva průmyslu a obchodu v programu „TIP“ ev. č. FR TI2/365 „Výzkum technologie umožňující materiálové a energetické využití nerecyklovatelných plastových, celulóзовých a jiných obdobných odpadů (MEVO)“ a věcné etapy 5 „Technologické postupy udržitelné výroby a užití biosurovin a energetických nosičů nové generace se zřetelem na potravinovou bezpečnost a globální trhy souvisejících produktů“ výzkumného záměru Ministerstva zemědělství MZe 0002703102“.



Základní a aplikovaný výzkum a vývoj v oborech zemědělská technika, technologie, energetika a výstavba a v hraničních vědních oborech živé a neživé přírody k těmto oborům se vztahujících, zejména ve vědách zemědělských, technických, ekonomických a ekologických, zaměřený na řešení problémů zemědělství, venkova a komunální sféry



Středotlaké kotle, kontejnerové kotelny, parní motory, zařízení pro občasnou kontrolu provozu kotlů, odvaděče kondenzátu