

**České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta strojní**

**Czech Technical University in Prague  
Faculty of Mechanical Engineering**

**Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.**

**Technologie a zařízení pro hydrotermické  
zpracování odpadů**

**Technologies and equipment for hydrothermal  
waste processing**

## **Summary**

Waste biomass represents one of the most energy-rich and unused renewable raw materials for the production of alternative energy sources or for the production of chemicals with high added value. One possible way of waste biomass usage is its biochemical conversion (anaerobic fermentation, alcoholic fermentation) to valuable bioproducts. However, these methods have very low efficiency for waste processing being in natural state. Pretreatment belongs among crucial steps to achieve maximum conversion efficiency for waste transformation to bioproducts and biofuels. Habilitation dossier presents the current state of knowledge in hydrothermal processing of lignocellulosic wastes. Information about principles, design of suitable process parameters, technologies and equipment for individual pretreatment techniques is summarized.

## Souhrn

Odpadní biomasa představuje jeden z nejvíce energeticky bohatých a nevyužitých obnovitelných surovin pro výrobu alternativních zdrojů energií nebo pro přípravu cenných chemických látek. Jednou z možných cest zpracování těchto odpadů je jejich anaerobní fermentace nebo alkoholové zkvašení. Tyto metody biochemické transformace odpadů v přirozeném stavu však vykazují díky jejich kompozitní struktuře velmi nízké účinnosti. Předúprava odpadů proto patří mezi klíčové kroky k dosažení maximální účinnosti transformace odpadních materiálů na bioprodukty a biopaliva. Habilitační spis prezentuje současný stav poznání v oblasti technologií a zařízení pro hydrotermickou předúpravu odpadů s lignocelulózovým základem. Sumarizovány jsou informace o principech, návrhu vhodných procesních parametrů předúpravy, jsou uvedeny ukázky současných technologií a diskutovány zásady konstrukce klíčových zařízení.

## **Klíčová slova**

lignocelulózové odpady; hydrotermické zpracování; parní expanze; termická předúprava; termicko-expanzní předúprava; konstrukce hydrolyzéro

## **Keywords**

lignocellulosic wastes; hydrothermal pretreatment; steam expansion; thermal pretreatment; thermal-expansionary pretreatment; design of hydrolyser

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Technologie a zařízení pro hydrotermické zpracování ligno- celulózových odpadů .....</b>	<b>9</b>
2.1	Parní expanze .....	9
2.2	Termická předúprava .....	11
2.3	Termicko-expanzní předúprava.....	15
<b>3</b>	<b>Termicko-expanzní předúprava v konceptu biorafinerie. ....</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>Zásady konstrukce klíčových zařízení.....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>30</b>
	<i>Seznam symbolů a značení.....</i>	<i>31</i>
	<i>Seznam použité literatury .....</i>	<i>32</i>
	<b>Odborný životopis autora .....</b>	<b>34</b>

# 1 Úvod

Jednou z největších vědecko-technických výzev jedenadvacátého století v oblasti energetiky, průmyslové sféry a infrastruktury je uspokojit rostoucí poptávku energií pro dopravu, vytápění, průmyslové procesy, a zajistit udržitelnost suroviny pro chemický průmysl. Odpadní biomasa představuje jeden z nejvíce energeticky bohatých a nevyužitých obnovitelných surovin nejen pro výrobu alternativních zdrojů energií (biometan, biovodík, bioetanol, pyrolýzní olej, syntézní plyn), ale také i pro přípravu cenných chemických látek (oligosacharidy, furany, vícesytné alkoholy, organické kyseliny, celulózová vlákna, přírodní antioxidanty, esenciální látky, oleje), které naleznou své uplatnění např. při výrobě ekoinovativních materiálů (bioplasty, kompozity s biosložkou). Perspektivní technologie účinné termochemické (zplyňování, pyrolýza) či biochemické (anaerobní fermentace, alkoholové kvašení) transformace odpadů na biopaliva či cenné chemické látky jsou však stále ve vývoji. Celosvětově již byly provedeny tisíce studií výroby bioproduktů z různých odpadů a to jak v laboratorním, tak i v poloprodučním měřítku. V současné době však stále existuje velká propast mezi projektovanými a skutečnými průmyslovými výrobami biopaliv a to především z ekonomických důvodů. Doposud nebyly vyvinuty takové technologie zpracování, které by zaručily možnost energeticky efektivního, ekonomicky rentabilního a ekologicky šetrného komplexního velkoobjemového zpracování odpadů na kapalná a energeticky hodnotná biopaliva a bioprodukty. Biopaliva a bioprodukty proto nejsou schopny konkurovat konvenčním palivům či petrochemickým produktům zejména z hlediska výrobních nákladů. Hlavním úkolem pro odbornou veřejnost je proto nalézt slibné bioprodukty, které budou produkovány současně s alternativními zdroji energií. Jedině tak je možné výrazně zlepšit ekonomiku provozu a snížit i zátěž na životní prostředí. Při projektování technologií je proto velmi důležité nalézt taková řešení, která zajistí efektivní, energeticky nenáročnou, ekonomicky přívětivou a ekologicky šetrnou transformaci odpadní suroviny na alternativní zdroje energií a chemické látky.

Odpadní biomasa představuje jeden z nejvíce energeticky bohatých a nevyužitých obnovitelných surovin na Zemi, a proto je také vnímána jako perspektivní zdroj nejen pro výrobu paliv, ale i jako zdroj suroviny pro řadu průmyslových procesů. Jedná se totiž o obnovitelný zdroj suroviny, je jí obrovské množství, je snadno dostupná a její cena je v porovnání se zemědělskými surovinami a cíleně pěstovanými plodinami velmi nízká. Odpady ze zpracování cukrové třtiny, kukuřičné, slamnaté a rýžové zbytky jsou, se svojí produkcí až  $5,4 \cdot 10^9$  t<sub>TS</sub> ročně, nejdostupnější odpadní surovinou

(Chandra, 2012), viz tab. 1.1. Tyto odpady jsou zpravidla využívány přímo ke zkrmování. Častěji však zůstávají na polích ke hnojení, jsou spalovány nebo zcela nevyužity.

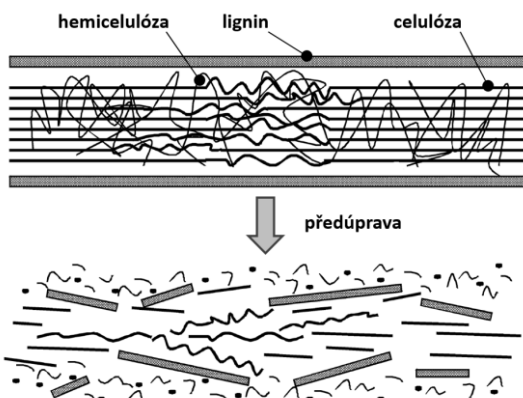
**Tab. 1.1** Charakteristika perspektivní odpadní biomasy (Krátký a Jirout, 2015a)

typ biomasy		odpady z kukuřice	pšeničná sláma	rýžová sláma	odpady z cukrové třtiny	dřevní odpady	BRKO
světová produkce v roce ( $10^6$ t <sub>TS</sub> )	2011	2714	1056	1084	502	574	13000
	2025	2725	1111	1267	666	6000	26000
celková sušina (hm. %)		86	70	25–50	85–90	20–80	40–60
organická sušina (hm. %)		72	90	70–95	85–89	95	40–95
hemicelulóza (hm. %)		28	26–32	23–28	19–24	20–38	5,6–10,8
celulóza (hm. %)		38–40	33–38	28–36	32–48	22–40	3,2–8,2
lignin (hm. %)		7–21	17–19	12–14	23–32	30–60	7,9–19,5

Jen v Evropě vzniká každý rok více než  $1,8 \cdot 10^9$  t<sub>TS</sub> odpadů (Biom, 2015), v čemž jsou zahrnuty zemědělské odpady z rostlinných a živočišných výrob, odpady z potravinářského a zpracovatelského průmyslu, komunální odpady, odpady z údržby zeleně, kaly z čistíren odpadních vod, odděleně sbíraný komunální biologicky rozložitelný odpad z domácností a zahrad, nebo odpady z restaurací a jídelen, z důlní a povrchové těžby a z výroby energie. Cílem politiky EU je zásadně zredukovat objem vznikajících odpadů a minimalizovat tak jejich škodlivost pro životní prostředí a lidské zdraví. Tříděný komunální odpad se proto také řadí mezi perspektivní obnovitelné suroviny pro výrobu paliv. V současné době končí na skládkách až 80 obj. % biologicky rozložitelného odpadu, nicméně dle legislativy EU 99/31/ES "o skládkování odpadů" musí být do roku 2020 ukládáno o 65 obj. % méně biologicky rozložitelných odpadů než v roce 1995. Hlavními složkami komunálního odpadu jsou papír, bavlna, zahradní a kuchyňské odpady (Kurian, 2013). Jelikož se jedná o odpady rostlinného a živočišného původu, nalézají proto také potenciál svého využití při výrobě paliv a jiných průmyslových komodit.

Tyto materiály jsou složeny z celulózy, hemicelulózy, ligninu a dalších organických a anorganických sloučenin, viz tab. 1.1. A právě celulóza a hemicelulóza představují potenciální zdroje sacharidů, které lze transformovat na monosacharidy a následně na biopalivo. Pro tyto odpady je typická tzv. lignocelulózová struktura, na kterou lze nahlížet jako na kompozitní

materiál, viz obr. 1.1. Vlákna, zajišťující nosnost materiálu, jsou tvořena celulózą. Tato vlákna jsou po celé délce obtáčena rozvětvenými řetězci hemicelulózy a zbytek struktury je vyplněn ligninem, který zde působí jako pojivo, respektive jako jakési „lepídko“. Nicméně přirozené vlastnosti ligno-celulózových odpadů je však limitují vůči intenzivnímu termochemickému, nebo biochemickému zpracování. Termochemické zpracování odpadů v přirozeném stavu je pomalé a hrozí komplikace s klenbováním vrstvy. Proto jsou při termochemických procesech zpracování z důvodu maximální účinnosti procesu na vstupu do technologie vyžadovány jemné (s velikostí 1–100 mm) a nejlépe suché (s vlhkostí do 40 hm. %) částice (Pohořelý et al., 2012). Také i biochemický rozklad odpadní rostlinné biomasy v přirozeném stavu je velmi pomalý a konverze celkového množství organických látek v biopaliva často nepřesahuje 10–20 % (Alvira et al., 2013).



**Obr. 1.1** Vliv předúpravy na strukturu suroviny (Alvira et al., 2010)

Předúprava biomasy, jejímž primárním cílem je narušení kompozitní struktury suroviny s nejvyšší možnou mírou zpřístupnění celulózy a hemicelulózy, je tedy nezbytný krok k tomu, aby došlo k maximálnímu využití suroviny, zvýšení účinnosti procesu zpracování, zvýšení množství produktů a k minimální tvorbě odpadů.



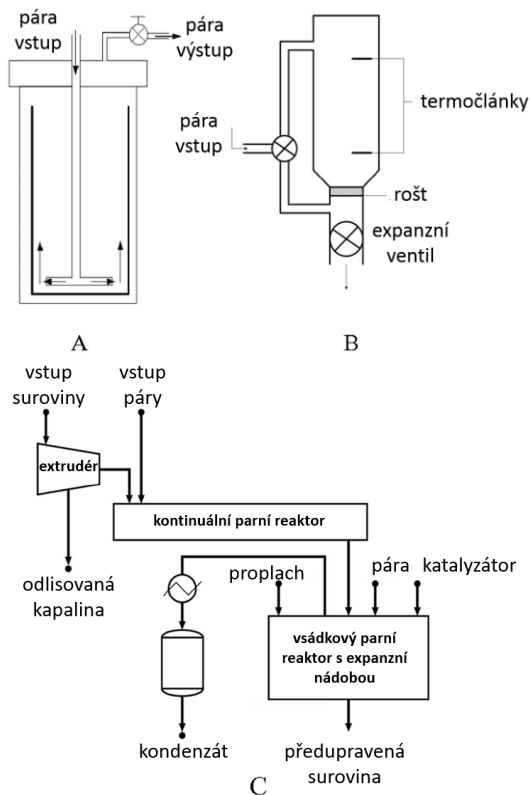
## 2 Technologie a zařízení pro hydrotermické zpracování lignocelulózových odpadů

V laboratorní i průmyslové praxi bylo testováno mnoho metod prvotního zpracování odpadů s lignocelulózovým základem. Principiálně lze metody předúpravy rozdělit do několika skupin, a to na metody fyzikální, chemické, fyzikálně-chemické a biologické. Hydrotermická předúprava suroviny patří spolu s alkalickou či kyselou předúpravou, a předúpravou pomocí čpavku AFEX mezi nejčastější používané technologie prvotního zpracování odpadních materiálů při jejich biochemické konverzi na biopaliva, nebo na jiné chemicky cenné látky. Hlavními nevýhodami průmyslové aplikace kyselé, alkalické předúpravy a metody AFEX jsou vysoké investiční a provozní náklady, jejichž výše je primárně ovlivněna nutností instalace vysokotlakých aparátů, respektování korozní odolnosti materiálů, nutnosti instalace pomocných technologií pro chemickou stabilizaci a separaci hydrolyzátu, pro separaci vedlejších produktů a inhibitorů fermentace a také pro regeneraci použitých chemikálií. Jednou z možných cest, jak snížit finanční náročnost předúpravy a učinit tak technologie biochemického zpracování ekonomicky rentabilní, je využití hydrotermických metod předúprav, tj. metod parní expanze a termické předúpravy. Charakteristickým rysem těchto technologií je, že k rozkladu suroviny dochází ve vodném prostředí, nevznikají téměř žádné vedlejší produkty a inhibitory následné fermentace, při zpracování odpadu se nepoužívají žádné chemikálie, čímž se snižují požadavky na korozní vlastnosti konstrukčních materiálů a jejich případné povrchové úpravy, klesá cena samotných aparátů a odpadá i nutnost instalace pomocných separačních a regeneračních technologií.

### 2.1 Parní expanze

Velmi často používanou technologií hydrotermického zpracování je parní expanze. Vlastní princip zpracování se sestává ze tří kroků zpracování a to z (1) přímého nástřiku syté páry do pracovního prostoru parního reaktoru s náběhem na požadovanou teplotu zpracování, následuje (2) výdrž na teplotě zpracování a (3) po uplynutí doby výdrže dochází k prudké dekompresi vsádky do zásobníku, kde je zpravidla udržován atmosférický tlak. Při přímém nástřiku syté páry do pracovního prostoru parního reaktoru dochá-

zí k prohřívání suroviny, ke kondenzaci páry, k rozpouštění hemicelulózy, a tím ke zlepšení přístupnosti celulózových svazků. Vznikající kondenzát penetruje do pórů suroviny a během třetí fáze procesu, expanze substrátu do zásobníku, dochází díky příslušné objemové změně kapalina–pára k intenzivnímu rozrušení struktury materiálu.



**Obr. 2.1** Typy reaktorů pro technologii páry expanze (Wang et al., 2014)  
A,B – vsádkový; C-kontinuální

V laboratorním, poloprodučním i průmyslovém měřítku se odpadní surovina zpracovává ve vsádkově, nebo kontinuálně pracujících reaktorech, viz obr. 2.1. Zpracování suroviny (Alvira et al., 2010) obvykle probíhá při teplotě syté páry v rozmezí 160–260 °C, pracovním tlaku 0,69–4,83 MPa s dobou výdrže od několika sekund, typicky 3–5 s, do několika minut, zpravidla 10–20 min. Účinnost rozkladu lignocelulózové matrice závisí na velikosti částic, tlaku a na době výdrže v reaktoru, resp. na závislosti teploty

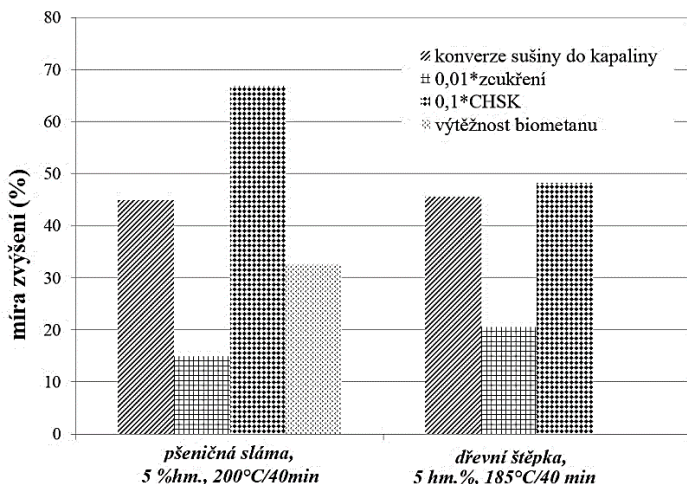
syté páry na době výdrže. Účinného rozkladu lignocelulózové matrice lze dosáhnout jak za vysoké teploty a krátké doby zdržení (270 °C, 1 min), tak i za nízké teploty a dlouhé doby zdržení (190 °C, 10 min). Zpracování suroviny za nižších teplot a delších dob výdrže je mnohem příznivější. Pokud je navíc pára obohacena přidávkem kyseliny sírové, oxidu siřičitého nebo oxidu uhličitého, dochází ke zvýšení rozkladu hemicelulózy, sníží se produkce inhibitorů a dochází také k zvýšení účinku hydrolýzy. Hlavními výhodami využití této technologie jsou zpracování vsádky v přirozeném stavu bez nutnosti předchozího rozpojení, rychlý ohřev a zchlazení vsádky (Yang and Tucker, 2013). Během procesu je však nutné vyvarovat se koncentračnímu gradientu reaktantů a produktů a nerovnoměrnosti teplotního pole. Proto je velmi žádoucí instalovat do parního reaktoru buď tvarově optimalizovaná míchadla, která umožní radiálně-axiální promíchání vsádky, nebo zpracovávat surovinu ve fluidním loži, které může být generováno např. nástřikem páry do vrstvy suroviny skrze trysky v míchacím systému, viz obr. 2.1A, nebo pomocí trysek polohovaných v různých místech obvodu a výšky pracovního prostoru parního reaktoru, viz obr. 2.1B. Hlavními nevýhodami této technologie jsou však vysoké investiční a provozní náklady, jejichž výše je primárně ovlivněna masivní konstrukcí parního reaktoru a expanzní nádoby z důvodů zpracování suroviny při vysokých tlacích, dynamické zatěžování konstrukce a s tím spojené riziko nízkocyklické únavy, ředění vsádky parním kondenzátem, objemné expanzní nádoby, nutnost instalace parního kotle včetně rozvodných potrubních systémů a nezkoušenost obsluhy s provozováním, údržbou a servisem tlakových aparátů.

V mnoha experimentálních pracích bylo prokázáno (Ruiz et al., 2013), že termická předúprava je v porovnání s parní expanzí mnohem účinnější metodou prvotního zpracování, a to díky intenzivnějšímu rozkladu polysacharidů a minimální tvorbě inhibitorů hydrolýzy, a proto je i habilitační spis detailněji zaměřen na problematiku termické předúpravy suroviny.

## **2.2 Termická předúprava**

Princip této metody spočívá ve vyváření suroviny v horké vodě, která je pomocí tlaku udržována v kapalném stavu. Při zpracování dochází až k 60% konverzi biologicky odbouratelných látek z biomasy do kapaliny, kde jsou snáze přístupné mikrobiálnímu rozkladu. K účinnému termickému rozkladu kompozitní rostlinné struktury ve vodném prostředí dochází při teplotách nad 160 °C. V molekule vody dochází ke štěpení vodíkových vazeb, což způsobí její autoionizaci na hydroxidové (OH<sup>-</sup>) a hydroxoniové (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) ionty, které působí jako katalyzátory depolymerizačních reakcí. Hemicelulóza je v přítomnosti hydroxoniových iontů depolymerizována na

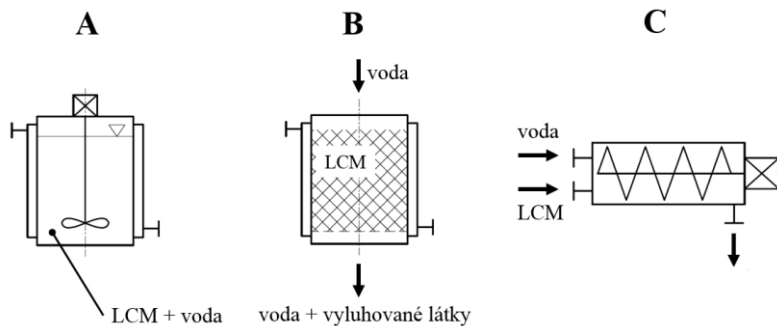
oligosacharidy, monosacharidy a acetylové radikály (Garrote et al., 1999). Navíc díky termickému účinku je část hemicelulózy transformována na kyseliny, které podporují další hydrolýzu. Celulóza je částečně transformována na rozpustné oligosacharidy, glukózu a furfural. Lignin je částečně depolymerizován a rozpuštěn v kapalně fázi (Xiao et al., 2011). Během termického zpracování většinou nedochází k tvorbě inhibitorů fermentace. Nicméně při teplotách zpracování vyšších jak 220 °C jsou polysacharidy štěpeny na fenolické sloučeniny, které mají toxický účinek na bakterie (Alvira et al., 2010). Mezi největší výhody této metody patří to, že substrát je rozkládán bez použití chemikálií, nedochází ke vzniku inhibitorů fermentace, nízká je i produkce odpadů, jsou eliminovány problémy s korozí odolností reaktorů a jednoduchý a ekonomický je i samotný provoz. Nicméně mezi hlavní nevýhody termického zpracování stále patří vysoká energetická náročnost, vysoké investiční náklady na zařízení a bezpečnost jeho provozu.



**Obr. 2.2** Termická předúprava vybraných druhů biomasy (Krátký a Jirout, 2015a)

Účinnost termické předúpravy závisí na složení biomasy a její koncentraci ve vodné suspenzi, na pH vsádky, na teplotě zpracování a na době výdrže, viz obr. 2.2. Hmotnostní podíl kapalina / biomasa se obvykle pohybuje v rozmezí 2–100 a je závislý na konfiguraci reaktoru. Z hlediska míchatelnosti a čerpatelnosti se doporučuje zpracovávat vsádky s koncentrací do 10 hm. %. K vyvarování se tvorby degradačních produktů je nutno udržovat pH vsádky v rozmezí pH 4–7 (Alvira et al., 2009). Teplota zpracování se obvykle pohybuje v rozmezí 150–230 °C v závislosti na složení biomasy a době výdrže. Doba výdrže kolísá řádově od několika sekund do několika hodin v závislosti na teplotě zpracování a složení biomasy. K účinnému

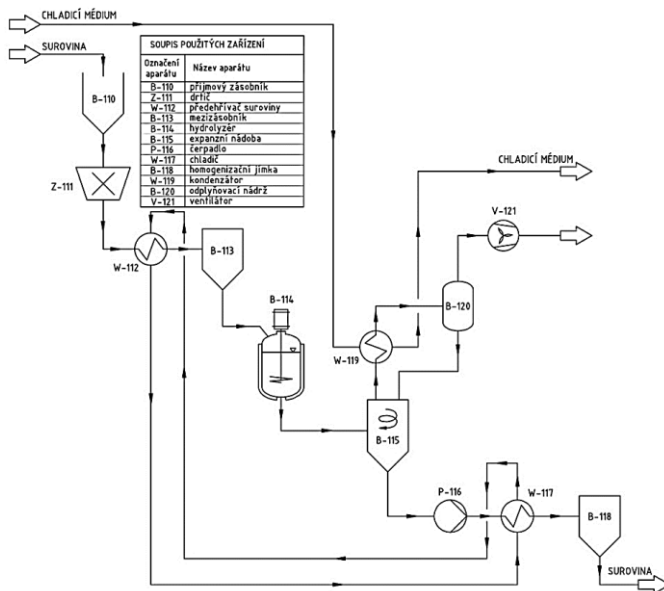
zpracování suroviny při vysokých teplotách stačí krátká doba výdrže, zatímco v případě nízkých teplot je třeba dlouhá doba výdrže.



**Obr. 2.3** Schéma reaktorů pro termickou předúpravu (Ruiz et al., 2013)  
 (A) vsádkový; (B) semi-kontinuální; (C) kontinuální

V průmyslovém měřítku se lignocelulózové odpady termicky zpracovávají ve vsádkových, semi-kontinuálních nebo kontinuálních reaktorech. *Vsádkový reaktor*, viz obr. 2.3A, se používá k nalezení vhodných parametrů zpracování pro kontinuální i vsádkový režim zpracování biomasy, a ke studiu mechanismů a kinetiky reakcí hydrotermického rozkladu biomasy. Princip zpracování biomasy v reaktoru je takový, že reaktor se naplní substrátem, uzavře se, utěsní se a přes teplosměnnou plochu je vsádce dodáváno teplo. Po dosažení požadované teploty zpracování následuje výdrž po stanovenou dobu. Jakmile doba výdrže uplyne, vsádka se zchladí na teplotu nižší jak 80 °C a poté je podrobena dalšímu zpracování. V průmyslových podmínkách vsádkové reaktory pracují v semi-kontinuálním nebo kontinuálním režimu, tj. za konstantní teploty zpracování. A proto z hlediska zachování identické jakosti hydrolyzátu je k přenosu procesních parametrů z laboratorního do průmyslového měřítku nutné zajistit co nejkratší doby ohřevu a chlazení vsádky. To zaručí minimalizaci příspěvku chemických reakcí při ohřevu a chlazení na jakost hydrolyzátu. Pro tyto reaktory je typická dlouhá doba výdrže, tj. dlouhá reakční doba částice biomasy s kapalinou a také i to, že částice zůstávají po celou dobu zpracování v reaktoru. Mezi hlavní nevýhody (Ruiz et al., 2013) patří tvorba degradačních produktů, nižší výtěžnosti xylanu, nedostatečné odstranění ligninu z biomasy a obtížnější separace oligosacharidů díky degradačním reakcím. Na obr. 2.4 je uvedeno typické schéma vsádkového zpracování lignocelulózových odpadů firmy Coramexport (2006). Vodná suspenze rozdrčených odpadů je vedena do hydrolyzéry **W-114**, ve které je nepřímě ohřívána a temperována při požadované teplotě zpracování sytou parou, která je přivá-

děna do duplikátorového pláště nádoby. Po uplynutí dané doby zadržky je termicky ošetřená vsádka vedena potrubím do zásobníkové nádrže **B-115** a do homogenizační jímky **B-118**.

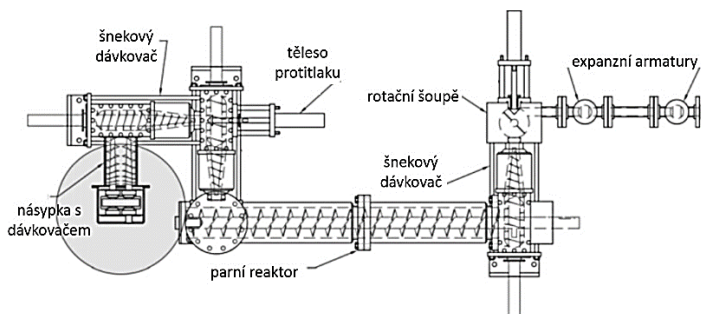


**Obr. 2.4** Zařízení pro vsádkové zpracování suroviny (Coramexpert, 2006)

V *semi-kontinuálním uspořádání*, viz obr. 2.3B, horká tlaková voda kontinuálně protéká skrze vrstvu biomasy. Doba zadržky kapaliny je proto velmi krátká, což má za následek nižší míru zcukření kapaliny a díky tomu i téměř nulovou degradaci sacharidů. Tyto reaktory se ověřily při studování procesů a evaluaci kinetiky probíhajících chemických reakcí, nicméně z důvodu cirkulace vysokých objemů kapaliny je jejich komerční nasazení dosti omezené. Semi-kontinuální reaktory se konstruují nejčastěji jako souprouté nebo protiproudé reaktory s pevným ložem, nebo jako protiproudé reaktory s míchanou fluidní vrstvou (Yang and Tucker, 2013).

Klíčovým zařízením *kontinuálního zpracování* suroviny je hydrolyzátor, viz obr. 2.3C. Hydrolyzátor je tlakový reaktor, ve kterém dochází ke smíchání rozdrčených odpadů s tlakovou technologickou vodou. Vsádka se následně zpracovává při teplotách 170–230 °C po dobu výdrže do 30 min. Suspenze je poté otáčením se dopravního šneku s regulovatelnými otáčkami posouvána k výstupnímu hrdlu a k dosažení potřebné doby výdrže na pracovní teplotě se často používá několik za sebou řazených hydrolyzátorů. Většina termických předúprav v poloprovozním a průmyslovém měřítku je

v současných biotechnologických provozech prováděna při teplotách zpracování do 200 °C s dobou výdrže do 20 min (Yang and Tucker, 2013). Jednotlivé technologie se však liší konstrukčním řešením plnění vsádky, technologií zpracování v hydrolyzáru a odvodem vsádky k dalšímu zpracování. Typické konstrukční uspořádání kontinuální poloprovozní jednotky je uvedeno na obr. 2.5. Konstrukce zařízení využívá kombinace šnekových dopravníků a extrudérů. Šnekové dopravníky slouží k dosažení požadované doby zádrže na teplotě, zatímco extrudéry jsou zde instalovány z důvodu oddělení tlakových prostorů, případně k dávkování nebo odlisování kapalně frakce vsádky. Předností využití této jednotky je její kompaktnost a možnost zpracovávat vysoce koncentrované vsádky s koncentrací tuhé fáze až 50 hm. %. Nicméně hlavními nevýhodami jsou vysoká míra abraze a energetická náročnost daná nutností čerpání vysoce koncentrované vsádky.

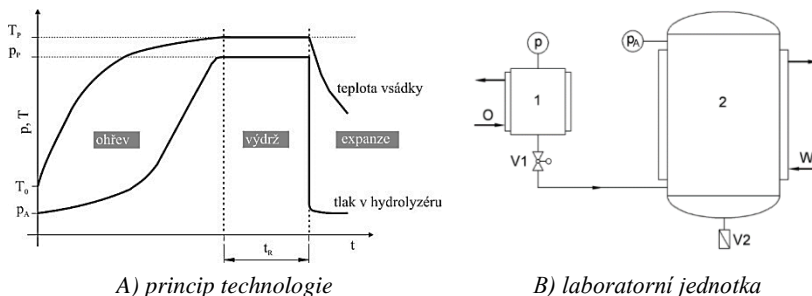


*Obr. 2.5 Šnekový horizontální termoreaktor NREL (Yang and Tucker, 2013)*

## 2.3 Termicko-expanzní předúprava

Z hlediska účinnosti procesu je však mnohem výhodnější využít nový trend hydrotermického zpracování tzv. termicko-expanzní předúpravu. Princip této metody zpracování kombinuje principy technologií termické předúpravy a parní expanze, viz obr. 2.6. V první fázi procesu, kterou je termická předúprava, dochází k termochemickému rozkladu biomasy ve vodné suspenzi. Dochází k termochemické modifikaci šťávy buňky, polysacharidické buněčné stěny se postupně rozpouští a ztrácí tak svoji pevnost. Druhá fáze předúpravy, náhlá dekomprese vsádky, využívá mechanismu fázové změny kapalina–plyn způsobené skokovou změnou tlaku. Voda v kapalném stavu difunduje během termického zpracování do porézní struktury částice. Během expanze vsádky pak dochází k fázové změně, voda mění své skupenství z kapalného na plynné a s tím související tisíci násobná změna objemu způsobí intenzivní narušení struktury částice. Expanze bu-

něčných šťáv proto způsobí popraskání pevnostně oslabených buněčných stěn a vyplavení buněčného obsahu z vakuol do kapalné fáze hydrolyzátu.

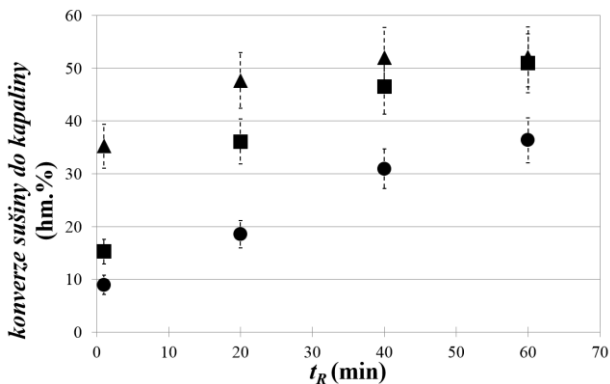


A) princip technologie

B) laboratorní jednotka

**Obr. 2.6** Termicko-expanzní předúprava (Krátký et al., 2010)

1–hydrolyzátor; 2–expanzní nádoba; V1–kulový kohout; V2–vypouštěcí klapka; O–topný okruh; W–chlazení

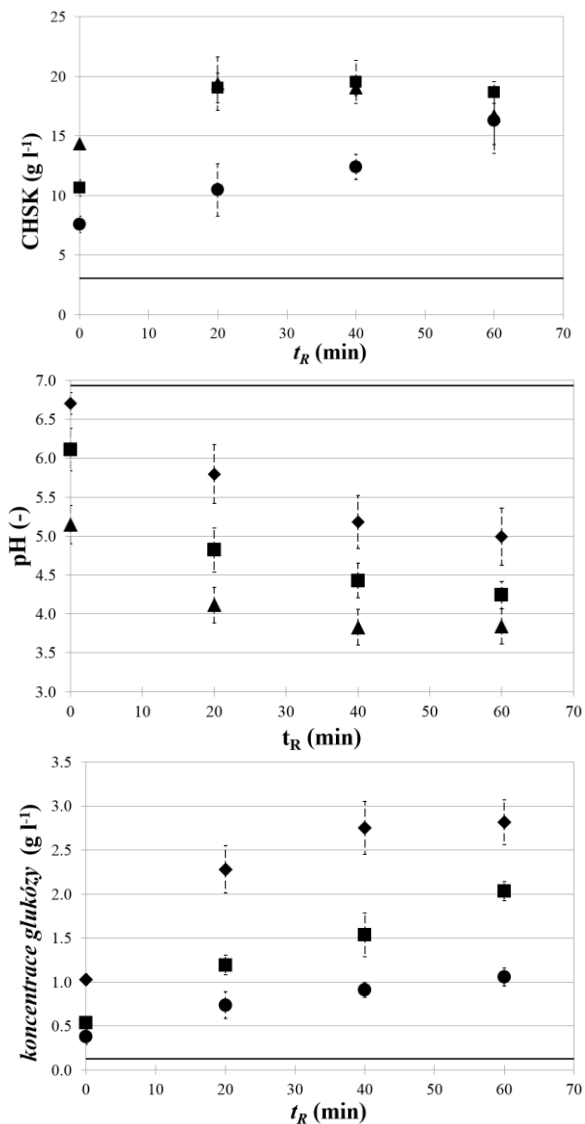


**Obr. 2.7** Vliv předúpravy pšeničné slámy na jakost tuhé fáze hydrolyzátu (Krátký a Jirout, 2015c) ● 170°C, ■ 185°C, ▲ 200°C, — počáteční hodnota

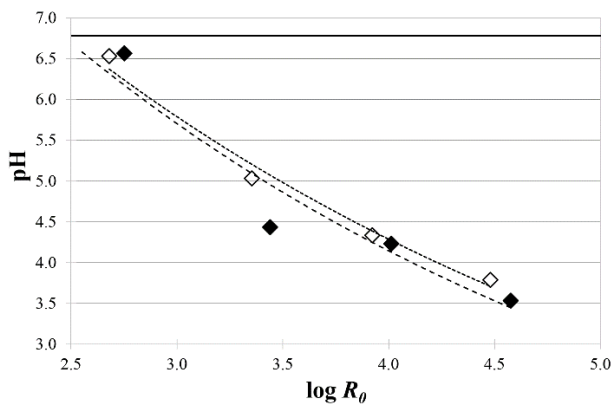
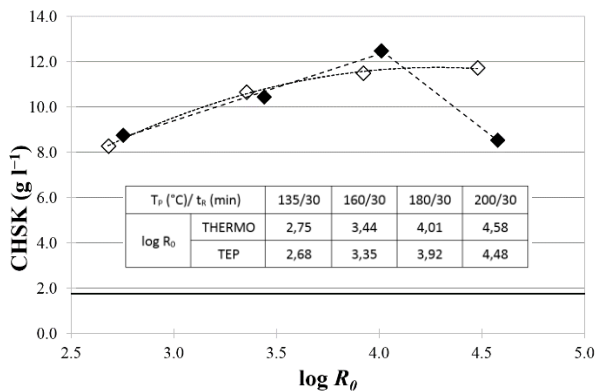
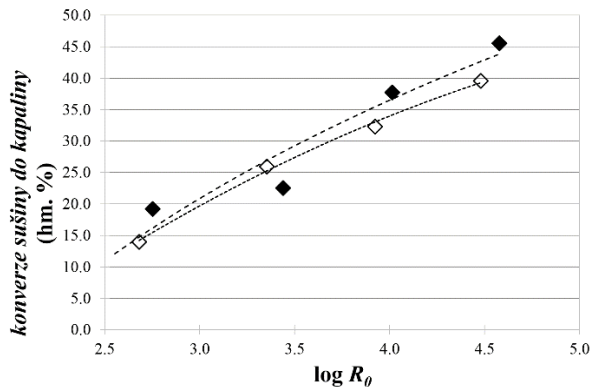
V současné době neexistují v dostupné literatuře informace o vlivu termicko-expanzní předúpravy lignocelulóзовých odpadů na jakost hydrolyzátu. Proto autor práce dlouhodobě prováděl vlastní experimenty s cílem posoudit vliv předúpravy vybraných druhů odpadních materiálů na jakost hydrolyzátu a prokázat tak její vysokou účinnost z hlediska rozkladu suroviny (Krátký a Jirout, 2015a-c; Krátký a Jirout 2012a-c). Jako modelové materiály byly použity pšeničná sláma, kukuřičná siláž, dřevní štěpky, kartónový a kancelářský papír. Bylo zjištěno, že účinnost předúpravy závisí na koncentraci suroviny ve vodné suspenzi, teplotě zpracování a době výdrže. Konverze celkové sušiny biomasy do kapaliny roste s rostoucí teplotou zpracování a dobou výdrže, viz obr. 2.7. Např. pro pšeničnou slámu bylo dosaženo maximální konverze 52 hm. %, pro kukuřičnou siláž pak



90 hm. %. CHSK, koncentrace glukózy a kyseliny octové rostou se zvyšující se teplotou zpracování a dobou výdrže, a že hodnota pH vsádky naopak klesá, viz obr. 2.8.






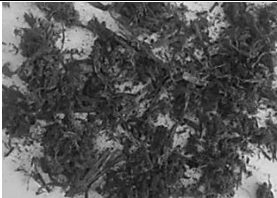
Obr. 2.8 Vliv předúpravy pšeničné slámy na jakost kapalné fáze hydrolyzátu (Krátký a Jirout, 2015c) ● 170°C, ■ 185°C, ▲ 200°C, — počáteční hodnota



**Obr. 2.9** Vliv termické (◆) a termicko-expanzní (◇) předúpravy na jakost hydrolyzátu topolové štěpky - Plná čára reprezentuje počáteční hodnotu sledovaného parametru a vykreslené křivky pak zobrazují trendy jednotlivých závislostí.

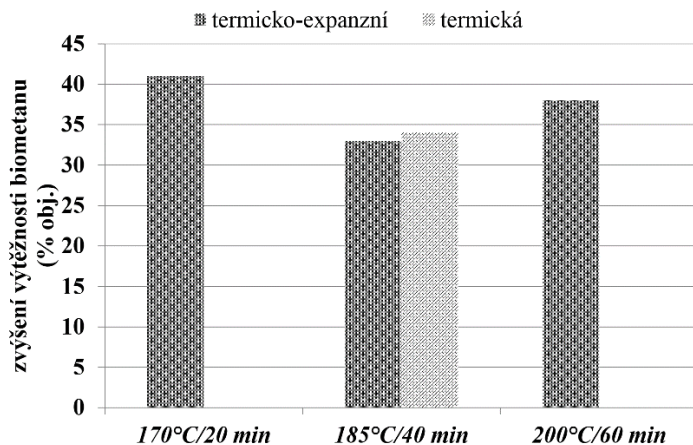
Z hlediska stanovení vhodných procesních parametrů je však velmi důležité kontrolovat hodnoty CHSK a pH kapalně fáze hydrolyzátu. Při určitých hodnotách teplot zpracování a doby výdrže byl pozorován pokles hodnoty CHSK. Důvodem tohoto chování byly strukturální modifikace makromolekul, při nichž dochází k tvorbě špatně oxidovatelných sloučenin, případně inhibičních sloučenin. Pokud navíc hodnota pH vsádky není udržována v rozmezí 4–7, je zde potenciální hrozba degradace primárních produktů hydrolýzy a jejich transformace na látky, které působí inhibičně na fermentační bakterie (Alvira et al., 2013). Z hlediska jakosti tuhé fáze hydrolyzátu pak bylo sledováno, že s rostoucí teplotou zpracování a dobou výdrže dochází k rozvláknování lignocelulózové struktury, vsádka se stává více kašovitou a čerpatelnou (Krátký a Jirout, 2014).

**Tab. 2.1** Vliv termické a termicko-expanzní předúpravy na strukturu tuhého zbytku

	termická	termicko-expanzní
pšeničná sláma 185 °C / 40 min		
dřevní štěpka 200 °C / 30 min		

Autor práce se dlouhodobě zabýval i porovnáním účinností termické a termicko-expanzní předúpravy s cílem posoudit, zda změny v lignocelulózové struktuře nejsou způsobeny pouhým termickým rozkladem, tj. rozvařením suroviny, a zda není vliv expanze vsádky na jakost hydrolyzátu zanedbatelný. Na základě detailního rozboru vlivu termické a termicko-expanzní předúpravy na jakost kapalně fáze hydrolyzátu bylo zjištěno (Krátký a Jirout, 2015a-b), že hodnoty konverze sušiny biomasy, CHSK a pH vsádky byly pro obě metody při stejných parametrech zpracování shodné, viz obr. 2.9. Při expanzi vsádky však dochází k odpaření těkavých látek, tj. dochází k zahuštění hydrolyzátu odparem vody a odstraněny jsou i těkavé látky jako např. kyselina octová nebo furfural (Yang and Tucker, 2013). Proto je velmi důležité technologicky využít kondenzát brýdo-

vých par, protože je velmi bohatý právě na tyto těkavé organické látky. Makrostruktura tuhé fáze termicko-expanzního hydrolyzátu vždy vykazovala vyšší míru rozvláknění vůči termicky předupraveným vzorkům, viz tab. 2.1. Vysvětlení je takové, že během termického vyváření suroviny docházelo k rozpouštění části hemicelulózy a ligninu do kapaliny, a tím docházelo k zeslabení pevnosti lignocelulózové matrice. Dekomprese vsádky pak způsobila destrukci pevnostně oslabené lignocelulózové matrice a vyšší míru jejího rozvláknění, což podstatně zlepšil její čerpatelnost a míchatelnost.

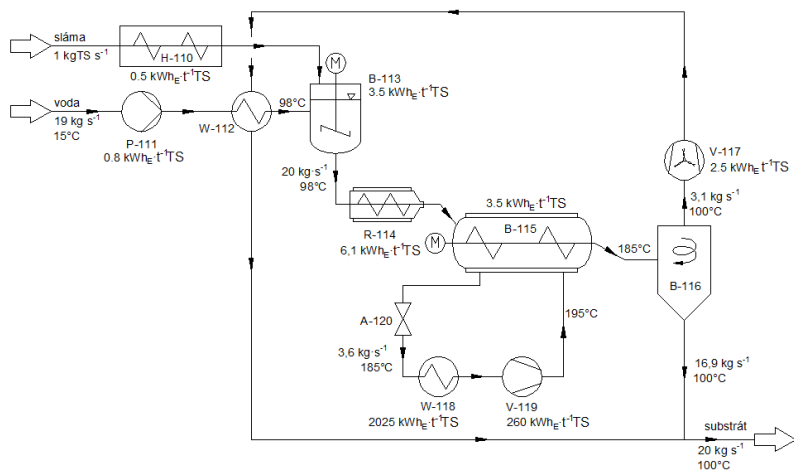


**Obr. 2.11** Vliv předúpravy na výtěžnost biometanu (Krátký a Jirout, 2015b)

Pro reprezentativní vzorky termicky a termicko-expanzně zpracovávané vodné suspenze vybraných materiálů byly provedeny testy výtěžnosti biometanu, viz obr. 2.11. Vlastní testy (Krátký a Jirout, 2015a) byly provedeny za mezofilních podmínek při konstantní teplotě  $35 \pm 2^\circ\text{C}$  dle evropského standardu VDI 4630. U termicky i termicko-expanzně předupravených vzorků bylo dosaženo identických zvýšení výtěžností biometanu až o 34 obj. %, a proto vliv dekomprese vsádky byl pro tento typ materiálu z hlediska výtěžnosti bioplynu zanedbatelný (Krátký a Jirout, 2015b).

S využitím experimentálních dat a provozních zkušeností bylo autorem práce navrženo proudové technologické schéma termicko-expanzní předúpravy (Krátký a Jirout, 2015d), viz obr. 2.12. Látkové a energetické bilance procesu byly vyčísleny pro jednotkové množství vstupujícího substrátu, tj. pšeničné slámy o jednotkovém hmotnostním průtoku sušiny  $1\text{ kg s}^{-1}$ . Sláma je při vstupu do technologie přímo dávkována dopravníkem **H-110** do míchaného zásobníku **B-113**, kde dochází k jejímu promíchání s procesní vodou a k přípravě vsádky o požadované hmotnostní koncentraci suroviny. Procesní voda je však před vlastním využitím ohřata ve výměníku

tepla **W-112** na teplotu 98 °C, protože díky jejímu předehřátí dochází k účinné hydrataci stébel a zabrání se tak jejich plování na hladině vsádky v zásobnících a hydrolyzéro. Takto připravená vsádka je z míchaného zásobníku **B-113** vedena přes extrudér s plnicí hlavou **R-114** do tlakového prostoru v hydrolyzéro **B-115**, kde je zpracována při požadované teplotě zpracování po danou dobu výdrže. Po jejím uplynutí dochází k prudké dekompresi vsádky do expanzní nádoby **B-116**, přičemž dochází ke vzniku brýdových par a hydrolyzátu kapalina–tuhý zbytek. Technologická voda je ohřívána ve výměníku tepla **W-112** kondenzací brýdových par, které vznikají při dekompresi vsádky do expandéru **B-116**. K dohřátí vsádky na požadovanou teplotu zpracování je zapotřebí externího zdroje tepla. Potřebné teplo pro dosažení teploty je proto získáváno ve výparníku **W-118**, ve kterém dochází k odpařování teplonosného média. V dalším kroku je teplotní hladina syté páry zvýšena stlačením v kompresoru **V-119**.



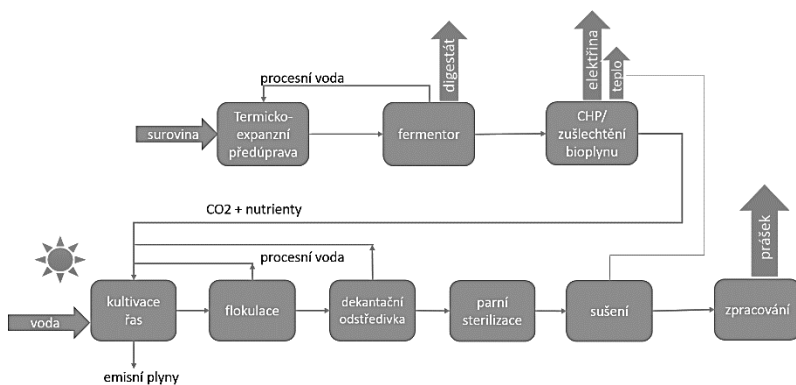
**Obr. 2.12** Modelové technologické schéma předúpravy (Krátký a Jirout, 2015c)

*H-110 dopravník, P-111 čerpadlo, W-112 výměník tepla, B-113 míchaný zásobník, R-114 extrudér, B-115 hydrolyzér, B-116 expandér, V-117 ventilátor, W-118 výparník, V-119 kompresor, A-120 expanzní ventil*

Nutno však zmínit, že samostatná technologie termické a termicko-expanzní předúpravy je energeticky nesoběstačný proces. V modelovém výpočtu bylo stanoveno (Krátký a Jirout, 2015c), že např. pro teplotu zpracování 185 °C, dobu výdrže 40 min a koncentraci biomasy v kapalině 5 hm. % musí být technologie dotována teplem hodnotě 2285 kWh t<sup>-1</sup>TS. Energetickou bilanci procesu je ovšem možné podstatně zlepšit regenerací tepla procesních proudů v komplexních technologiích.

### 3 Termicko-expanzní předúprava v konceptu biorafinerie

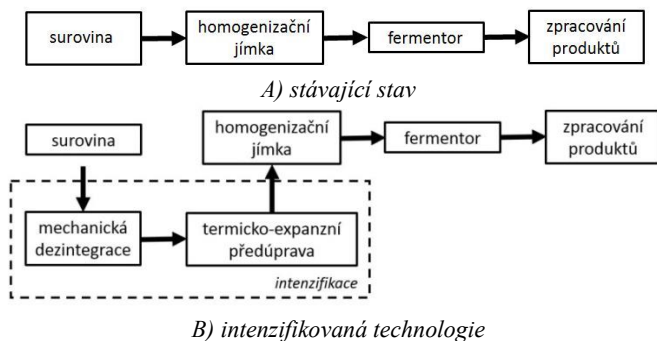
Biopaliva a bioprodukty nejsou v současné době schopny konkurovat konvenčním palivům či petrochemickým produktům zejména z hlediska výrobních nákladů. Hlavním úkolem pro odbornou veřejnost je vyvinout takové technologie zpracování, které by zaručily možnost energeticky efektivního, ekonomicky rentabilního a ekologicky šetrného komplexního velkoobjemového zpracování biomasy na hodnotné bioprodukty, které budou produkovány současně s alternativními zdroji energií. Jedině tak je možné výrazně zlepšit ekonomiku provozu a snížit i zátěž na životní prostředí. Poslední léta se proto z hlediska výroby biopaliv upřednostňuje koncept tzv. biorafinerie. Biorafinerie je flexibilní multitechnologický provoz, ve kterém dochází k paralelní konverzi odpadní biomasy na biomateriály, biochemikálie a biopaliva souběžně s výrobou elektrické energie či tepla. Princip zpracování surovin je zpravidla založen na kombinaci termochemických, biochemických a termických metod zpracování. Výstupními produkty jsou pak chemicky cenné látky a kapalná biopaliva. Díky vyšším výkupním cenám produktů a maximálnímu využití odpadní suroviny i emisních plynů lze dosáhnout pozitivní ekonomické bilance procesu.



Obr. 3.1 Bioplynová stanice v konceptu biorafinerie (Kutsay, Krátký, et al., 2016)

Termicko-expanzní předúprava představuje perspektivní technologii prvotního zpracování suroviny před její biochemickou konverzí na bioprodukty (biovodík, biometan, bioplyn, bioalkoholy, aj.). Zpracování suroviny touto metodou zajistí hygienizaci vsádky, vysokou konverzi organických látek do kapaliny, intenzivní rozvláknění lignocelulózové matrice, a tím i

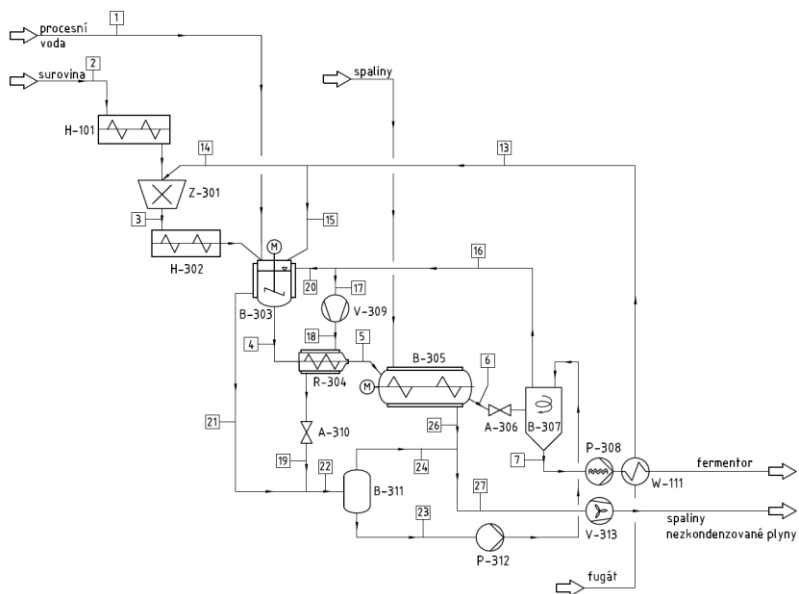
možnost zpracování širokého spektra obtížně rozložitelných materiálů. Separovaná celulózová vlákna a jiné cenné chemické látky mohou být využity při výrobě ekoinovativních materiálů a zbytek lze využít k biochemické konverzi na biopalivo. Na obr. 3.1 je uvedena určitá vize blokového technologického uspořádání bioplynové stanice v konceptu biorafinerie. Tento projekční návrh předpokládá termicko-expanzní předúpravu rozdrčené suroviny a její anaerobní fermentaci (Kutsay, Krátký et al., 2016). Vznikající bioplyn je zušlechtěn na čistý metan, např. pomocí membránové separace (Izák et al. 2010), a zbylý emisní oxid uhličitý je využíván k produkci vodních řas, které naleznou své uplatnění v potravinářském nebo petrochemickém průmyslu. Emisní plyny a zbylý oxid uhličitý je pak možné skladovat a využít k výrobě biopaliv 4. generace, tj. v technologiích CCS/U. Digestát je zpracován na fugát a fermentační zbytek. Z fugátu lze separovat nutrienty a připravit tzv. koncentrované kapalné hnojivo, zbylá voda je využita k ředění suroviny na požadovanou konzistenci. Tuhý zbytek je využit jako přírodní hnojivo, nebo je dosušen a použit k výrobě pelet.



**Obr. 3.2** Modelová technologie biochemického zpracování

V současné době se prozatím nabízí implementovat termicko-expanzní předúpravu do existujících technologií biochemického zpracování odpadů (bioplyn, bioetanol), viz obr. 3.2. Autor práce projektoval modelovou klasickou a intenzifikovanou technologii výroby bioplynu s elektrickým výkonem 500 kW<sub>E</sub> (Krátký a Jirout, 2015b), viz obr. 3.3, s cílem porovnat energetické náročnosti z hlediska spotřeby elektrické energie a tepla, ale také i investiční náklady na realizaci technologií v průmyslovém měřítku včetně zhodnocení návratnosti investice. Klíčovým faktorem při návrhu linky byla minimální spotřeba elektrické energie a maximální regenerace tepla. Specifické investiční náklady vztahované na jednotku elektrického výkonu klasické bioplynové stanice byly vyčísleny na 150 000 Kč kW<sup>-1</sup>, na jednotku objemu fermentoru pak 10 700 Kč m<sup>-3</sup>. Specifické investiční náklady vztahované na

jednotku elektrického výkonu intenzifikované bioplynové stanice byly rovny 210 000 Kč kW<sup>-1</sup>, což představuje v porovnání s průměrnými specifickými investičními náklady neintenzifikované technologie 150 000 Kč kW<sup>-1</sup> 1,4násobné zvýšení. Specifické investiční náklady na jednotku objemu fermentoru jsou pak 13 800 Kč m<sup>-3</sup>. Prosta návratnost investice je 17 let pro klasickou bioplynovou stanici.



**Obr. 3.3** Intenzifikace technologie výroby bioplynu (Krátký a Jirout, 2015a)

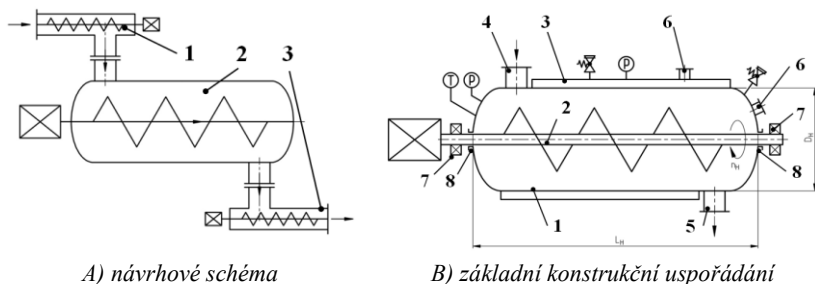
A-306 expanzní hlava, B-102 jímka, B-303 homogenizační jímka, B-305 hydrolyzér, B-307 expanzní nádoba, B-311 odplyňovací nádrž, P-308 čerpadlo, P-312 čerpadlo, R-304 plnicí hlava zahříváče, R-304 zahříváč, V-313 ventilátor, W-111 výměník tepla

Implementace technologie termicko-expanzní předúpravy do zemědělské bioplynové stanice je ekonomicky značně nevýhodná. Díky vysokému zvýšení investičních nákladů na instalaci této technologie, vysokému nárůstu celkových nákladů na údržbu, servis, na spotřební materiál, ročních odpisů technologie a z důvodu nízkého zvýšení příjmu z prodeje elektřiny je roční cash flow bioplynové stanice o 75 % nižší vůči stavu, kdy surovina vstupuje do technologie v neupraveném stavu. Klíčovými kroky ke zlepšení ekonomiky intenzifikované technologie jsou optimalizace procesních parametrů (*zpracování suroviny při vyšších koncentracích*), politika zpracování odpadů a výkupní ceny suroviny (*zvýšení konverze odpad–bioproduct, snížení množství odpadů, poklesu nákladů k jeho skladování či k recyklaci*), a využití technologie v konceptu biorafinerie.



## 4 Zásady konstrukce klíčových zařízení

Klíčovým zařízením kontinuální technologie termické a termicko-expanzní předúpravy je hydrolyzér s kontinuálním příívodem a odvodem vsádky, viz obr. 4.1. Surovina se v hydrolyzéru zpracovává při teplotách 170–200 °C, čemuž odpovídá pracovní tlak 0,8–1,55 MPa. Z tohoto důvodu je proto hydrolyzér tlaková nádoba, při jejíž konstrukci a provozování musí být postupováno dle platné legislativy, např. v souladu s normou ČSN 69 0010 nebo případně s jinou ekvivalentní normou, např. ČSN EN 13445.



**Obr. 4.1** Návrhové schéma hydrolyzéru (Krátký, 2016)

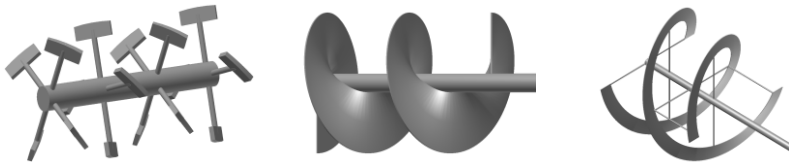
- A) 1–dávkování, 2–hydrolyzér, 3–vyprazdňování  
B) 1–nádoba, 2–rotor, 3–duplikátorový plášť, 4–vstup suroviny; 5–výstup suroviny,  
6–technologická hrkla, 7–ložiskové těleso, 8–ucpávka rotor–stator

Prvotním krokem při návrhu jakéhokoliv aparátu je návrh základní geometrie a výběr vhodného materiálu k výrobě jednotlivých součástí. Při volbě vhodného materiálu (Krátký, 2016) je nutno zohlednit výpočtový přetlak, nejnižší a nejvyšší teplotu stěny a výpočtovou teplotu, objem aparátu, konstrukční řešení, chemické složení a charakter pracovní látky (korozní agresivita, jedovatost, výbušnost, abrazivní, erozivní opotřebení), technologické a fyzikálně-chemické vlastnosti materiálu, způsob výroby jednotlivých dílů a součástí, popř. jiné požadavky např. na provoz, umístění a jeho certifikaci pro výrobu tlakových nádob. Mezi doporučené skupiny konstrukčních materiálů lze zařadit legované oceli, korozivzdorné oceli, slitiny na bázi titanu, niklu, nebo zirkonia. Při zpracování suroviny dochází i k erozivnímu opotřebovávání jednotlivých částí, zejména míchadla a vnitřní stěny pracovní nádoby hydrolyzéru. Z těchto důvodů je proto nutné ocel povrchově zušlechtit, opatřit vhodným kovovým, anorganickým nebo organickým ochranným povlakem, případně při konstrukci využívat korozivzdorné a oteruvzdorné oceli typu Hardox.

## Hydrolyzér

Hydrolyzéry se z důvodu snazší regulace doby zadržky konstruují jako horizontálně umístěné tlakové nádoby. Klíčovými konstrukčními prvky hydrolyzéro jsou nádoba a míchací systém (Krátký a Jirout, 2015a).

- Nádoba - Základní charakteristikou nádoby hydrolyzéro je její objem, který je dle skici na obr. 4.1B, definován délkou  $L_H$  a průměrem  $D_H$  nádoby. Objem hydrolyzéro obecně závisí na množství zpracovávané suroviny, době potřebné k dosažení teploty zpracování a době zadržky. Při požadavku zpracování velkých objemů je z technologických a ekonomických důvodů velmi výhodné projektovat technologii s několika sériově zapojenými hydrolyzéry s menšími pracovními objemy. Vlastní nádoba hydrolyzéro je tvořena horizontálně uloženým válcovým pláštěm, který je z obou stran zpravidla uzavřen klenutými dny. Hydrolyzér bývá konstruován s vnějším duplikátorem pláštěm, který je v případě využití syté páry konstruován jako klasické zdvojení válcové části pláště, viz obr. 4.1B. Využití syté páry jako teplotnosného média je z hlediska termické účinnosti přenosu tepla nejučinnější řešení. Díky vysokým hodnotám součinitele prostupu tepla je třeba menší teplosměnné plochy, čímž klesají investiční náklady na zařízení a zástavbové nároky. V případě použití spalino teplotnosného oleje se doporučuje konstruovat vnější duplikátorem plášť jako šroubovicové kanály, nebo jako zdvojené válcové části s instalací usměrňovačů toku.



A) pádlové míchadlo

B) šnekové míchadlo

C) pásové míchadlo

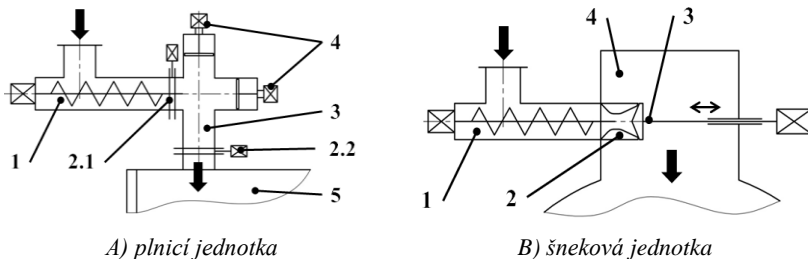
**Obr. 4.2** Typická pomaloběžná míchací zařízení (Krátký a Jirout, 2015a)

- Míchací systém - Míchací systém je v hydrolyzéro instalován kvůli zajištění homogenity koncentračního a teplotního pole vsádky a současně k intenzifikaci přestupu tepla v aparátu. Základní procesní charakteristikou míchacího systému je frekvence otáčení. Ta je primárně závislá na geometrii hydrolyzéro, na době náběhu aparátu na teplotu zpracování a na době zadržky vsádky. Míchací systém v hydrolyzerech je konstruován jako pomaloběžný s frekvencí jednotek otáček za minutu. V průmyslové praxi se pro míchání vsádky v hydrolyzerech často používají míchací systémy s pádlovými míchadly, viz

obr. 4.2A, šnekovým míchadlem, viz obr. 4.2B, nebo pásovým míchadlem, viz obr. 4.2C. Na základě znalosti množství zpracovávané suroviny, doby náběhu a zádrže, geometrie míchadla a nádoby lze stanovit potřebné frekvence otáčení míchacího zařízení. Frekvence otáčení přímo ovlivňuje přenos tepla z teplonosného média do vsádky a tím i dobu zádrže vsádky v hydrolyzáru. V geometrické konfiguraci teplosměnné plochy duplikátorový plášť–nádobka je hodnota součinitele prostupu tepla nejvíce ovlivněna hodnotou součinitele přestupu tepla při stírání stěny nádoby hydrolyzáru míchacím systémem. S klesající mezerou mezi míchadlem a stěnou nádoby bude dosaženo vyšších účinků smykových sil ve stíraném filmu, což způsobí zvýšení součinitele přestupu tepla z vnitřní stěny nádoby do míchané vsádky. Proto se doporučuje surovinu rozpojit a rozvláknit, čímž se zamezí ucpávání mezery mezi stěnou nádoby a lopatkou míchadla. Další možností intenzifikace přenosu tepla je zvětšit teplosměnnou plochu tím, že bude zkonstruován dutý míchací systém, tj. dutá pádlová nebo šneková míchadla s usměrňovači toku, uvnitř kterého bude proudit teplonosné médium.

### **Technické možnosti dávkování suroviny do hydrolyzáru**

V kontinuální technologii průmyslového zpracování suroviny je nutné zajistit dávkování vsádky ze zásobníku o atmosférickém tlaku do hydrolyzáru s pracovním tlakem až 1,55 MPa. V současné době (Krátký a Jirout, 2015a) se nabízejí tři možnosti dávkování a to přes rotační šoupě, plnicí jednotku, viz obr. 4.3A, nebo pomocí šnekové jednotky, viz obr. 4.3B.



**Obr. 4.3** Možnosti dávkování suroviny do tlakového prostoru (Kratochvíl, 1995)

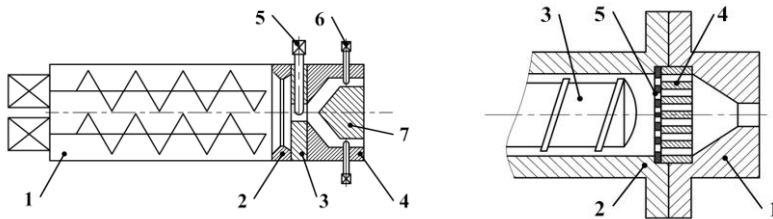
- A) 1–dopravník, 2–šoupátko, 3–plnicí komora, 4–pístové čerpadlo, 5–hydrolyzáru  
 B) 1–extrudér, 2–plnicí hlava, 3–těleso protitlaku, 4–hydrolyzáru

- Systém plnění na obr. 4.3A spočívá ve střídavém otevírání a zavírání jednotlivých deskových šoupátek a plnění komory pomocí objemového čerpadla nebo šnekového dopravníku. Přednostmi této jednotky jsou jednoduchá konstrukce, minimum pohyblivých částí, umožňuje

dávkovat surovinu jakýchkoliv velikostí, nevyžaduje stlačení suroviny k vytvoření těsnícího efektu, a proto je energeticky efektivní. Nicméně objevují se problémy s klenbováním a neúplným vyprázdněním suroviny z dávkovací komory, při provozu dochází jejímu dynamickému namáhání a nízko-cyklové únavě, je vyžadována precizní regulace jednotky. Jednotka funguje semi-kontinuálně, a proto k dosažení kontinuálního toku je nutné provozovat několik paralelně zapojených jednotek.

- Kontinuální systém plnění na obr. 4.3B využívá dvojici extrudér-těleso protitlaku. Vsádka je extrudérem (1) kontinuálně přiváděna do plnicí hlavy (2), odkud je protlačována přes těleso protitlaku (3) do pracovního prostoru hydrolyzéro (4). Tímto kontinuálním způsobem lze dávkovat vsádku až do protitlaku 2,8 MPa (Kratochvíl, 1995). Tento systém plnění má výhodu v tom, že extrudér slouží i jako pojistka proti tlakovému rázu. Nevýhodami jednotky jsou abraze, vysoká energetická náročnost, a nemožnost zpracování lepkavých odpadů a odpadů, které mají při kompresi tendenci aglomerace.

### **Technické možnosti dekomprese vsádky**



A) vyprazdňovací jednotka

B) konstrukce expanzní hlavy

**Obr. 4.4** Zařízení pro kontinuální dekompresi vsádky (Krátký, 2016)

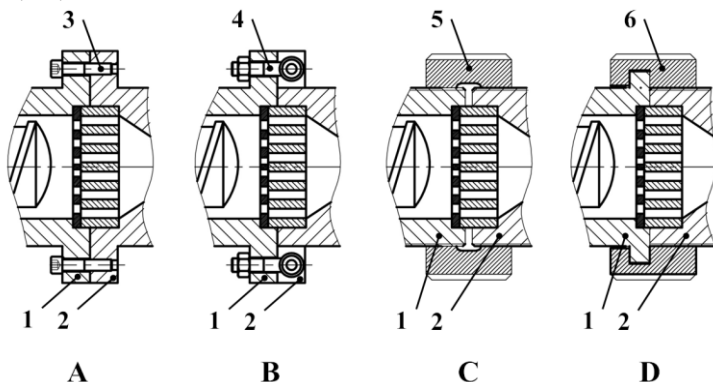
A) 1–dvousnekový extrudér, 2–blok hlavy, 3,4–lamač, 5,6–škrťací klapka, 7–trn

B) 1–hlava, 2–pouzdro, 3–šnek, 4–lamač, 5–síta

Kontinuální mechanismus vyprázdňování je uveden na obr. 4.4. Vlákennitá rostlinná biomasa proudí mezi šneky extrudéru (1) do expanzní hlavy, kde díky regulaci škrťacích klapek (5, 6) dochází k modifikaci velikosti průtočných průřezů v lamačích (3, 4). Tlaková ztráta je přímo úměrná délce a zároveň nepřímo úměrná hydraulickému průměru kanálek. Čili se zmenšujícím se hydraulickým průměrem, potažmo průtočnými průřezy v lamačích, roste tlaková ztráta expanzní hlavy. To způsobí její ucpávání vláknitou surovinou a vytvoření potřebné tlakové ztráty, tj. protitlaku, k dekompresi vsádky. Regulací otáček šneků a škrťacích klapek (5, 6) se pak

docílí nastavení potřebného protitlaku k dekompresi vsádky a současně i kontinuálního odvodu vsádky do expanzní nádoby.

Základní konstrukční uspořádání expanzní hlavy je uvedeno na obr. 4.4B. Klíčovými částmi protitlakové hlavy jsou síto (4) a lamač (3). Lamač je deska s otvory typu soustředného kruhového otvoru, pole kruhových otvorů, případně pole drážek a jiných geometrických tvarů. Na lamač jsou přichycena síta, na kterých se v průběhu pracovního cyklu extrudéru zachycují nedostatečně rozmělněné materiály. Volbou těchto sít se dají výrazně ovlivnit vlastnosti výstupního materiálu. Zařazením lamačů se síty se také zvyšuje odpor toku materiálu, způsobující delší setrvání materiálu ve stroji. Tímto způsobem je tedy možné regulovat tlak ve vytlačovací hlavě. Nicméně nutno zmínit, že tato konstrukční varianta vyžaduje odstávku zařízení a časté čištění zanesených sít. Z hlediska konstrukce a údržby zařízení se pro rychlou výměnu sestavy lamač–síto často využívá bajonetový uzávěr. Vhodnějším způsobem regulace tlaku ve vytlačovací hlavě je však regulace průtočných průřezů pomocí šroubu, který omezuje tok materiálu, viz obr. 4.4A.



**Obr. 4.5** Možnosti uchycení expanzní hlavy s extrudérem (Krátký a Jirout, 2015a)

A–šroubový spoj, B–přírubový spoj se sklápěcími šrouby, C–objímkový spoj, D–bajonetový spoj, 1–extrudér, 2–vytlačovací hlava, 3–šroub, 4–otočný šroub, 5, 6–matice

Celý komplet extrudéru a protitlakové hlavy pak zpravidla bývá spojen přímo s odvodným potrubím předupravené vsádky. Upevnění vytlačovací hlavy k pracovnímu stroji by mělo zajišťovat snadnou montáž a demontáž. Možností, jak konstrukčně spojit protitlakovou hlavu s potrubím, existuje celá řada, viz obr. 4.5. Pro malé stroje se využívá šroubových spojení. U větších strojů se využívá přírubových spojení s pomocí sklápěcích šroubů, ale i různých objímkových uchycení.

## 5 Závěr

Odpadní biomasa představuje jeden z nejvíce energeticky bohatých a nevyužitých obnovitelných surovin pro výrobu alternativních zdrojů energií a přípravu cenných chemických látek. Přirozené vlastnosti těchto materiálů je však limitují vůči intenzivnímu biochemickému zpracování, a proto je nutné je před samotným zpracováním předupravit. V současné době existuje mnoho metod předúprav, nicméně technologie hydrotermického zpracování jsou považovány za ekologicky šetrné a zároveň efektivní technologie, které zaručí podstatné zvýšení biodegradability suroviny. Charakteristickým rysem těchto technologií je, že k rozkladu suroviny dochází ve vodném prostředí, při zpracování se nepoužívají žádné chemikálie, nevznikají téměř žádné vedlejší produkty a inhibitory fermentace, čímž se snižují požadavky na materiály, klesá cena samotných aparátů a odpadá i nutnost instalace pomocných separačních a regeneračních technologií.

Technologie termicko-expanzní předúpravy je novým trendem v oblasti hydrotermického zpracování. Její princip spočívá ve vyvážení vodné vsádky s následnou bleskovou dekompresí. Na základě širokého spektra vlastních experimentálních výsledků termicko-expanzního zpracování odpadů bylo zjištěno, že:

- účinnost předúpravy závisí na složení biomasy, koncentraci biomasy v suspenzi, pH vsádky, teplotě zpracování a na době výdrže;
- konverze biomasy do kapaliny, CHSK kapalné fáze hydrolyzátu, koncentrace kyseliny octové a glukózy se zvyšují se zvyšující se teplotou zpracování a dobou výdrže, pH vsádky naopak klesá;
- vliv termické a termicko-expanzní předúpravy na jakost kapalné fáze hydrolyzátu je identický. Makrostruktura termicko-expanzně upravené suroviny však vykazuje vyšší míru rozvláknění vůči termicky upraveným vzorkům.

Originální experimentální výsledky a provozní zkušenosti byly využity k projektování modelových intenzifikovaných technologií výroby biopaliv.

- Bylo navrženo technologické schéma kontinuální předúpravy.
- Byla provedena energeticko-ekonomická bilance implementace technologie termicko-expanzní předúpravy do modelové bioplynové stanice, která ukázala neekonomičnost jejího provozu.
- Byly vypracovány zásady konstrukčního uspořádání kontinuálně pracujícího hydrolyzéra a jeho klíčových částí.

Do budoucna je nutné hledat možnosti využití technologie termicko-expanzní předúpravy při zpracování materiálů odolných vůči termickému rozkladu (dřevo, kosti, tj. suroviny, které jsou špatně „rozvařitelné“) a její implementaci v konceptu biorafinerie.

## ***Seznam symbolů a značení***

$D_H$	průměr hydrolyzéro	[m]
$CHSK$	chemická spotřeba kyslíku	[g l <sup>-1</sup> ]
$L_H$	délka hydrolyzéro	[m]
$p$	tlak	
$p_A$	atmosférický tlak	[Pa]
$p_H$	pH kapaliny	[-]
$p_P$	tlak sytých par při teplotě zpracování	[Pa]
$R_0$	severity faktor	[-]
$t$	čas	[s]
$T$	teplota	[°C]
$T_0$	počáteční teplota vsádky	[°C]
$T_P$	teplota zpracování	[°C]
$t_R$	doba výdrže na teplotě zpracování	[min]

### ***Zkratky***

AFEX	technologie předúpravy pomocí expanze čpavkových par
BRKO	biologicky rozložitelný komunální odpad
LCM	lignocelulókové odpady
TEP	termicko-expanzní předúprava
THERMO	termická předúprava
TS	celková sušina

## **Seznam použité literatury**

- ALVIRA, P., E. TOMÁS-PEJÓ, M. BALLESTEROS a M. J. NEGRO. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*. 2010, roč. 101, č. 13, s. 4851–4861. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.11.093.
- BIOM. *Biomasa jako zdroj energie*. 2015, Dostupné z: [http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/biomasa\\_jako\\_zdroj\\_energie.pdf](http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/biomasa_jako_zdroj_energie.pdf)
- CORAMEXPORT. *Zařízení pro diskontinuální nebo kontinuální hydrolyzu organické hmoty*. Vynálezce: M. Šnajdr, V. Šnajdr. Příhl. 24. 7. 2006, MPT: C12M 3/08, Čís. patentu 17066, 24. 7. 2006. ÚPV ČR.
- GARROTE, G., H. DOMÍNGUEZ a J. C. PARAJÓ. Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. *Holz als Roh- und Werkstoff*. 1999-6-15, roč. 57, č. 3, s. 191–202. DOI: 10.1007/s001070050039.
- CHANDRA, R., H. TAKEUCHI a T. HASEGAWA. Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012a, roč. 16, s. 1462–1476. DOI: 10.1016/j.rser.2011.11.035
- IZÁK, P., POLONCARZOVÁ, M. a J. VEJRAŽKA. *Způsob obohacení bioplynu z čistíček odpadních vod nebo zemědělské prvovýroby o methan a zařízení k jeho obohacení*, 2010, CZ303106.
- KRÁTKÝ, L. Scale-up of Equipment for Thermal-Expansionary Pretreatment of Lignocelluloses. Chapter 6. In: V. DYNBYL et al. eds. *The Latest methods of Construction Design*. Springer International Publishing Switzerland, 2016, DOI: 10.1007/978-3-319-22762-7\_6
- KRÁTKÝ, L. a T. JIROUT. *Moderní trendy předúprav biomasy pro intenzifikaci výroby biopaliv druhé generace*. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2015a. 190 s. ISBN 978-80-01-05720-9.
- KRÁTKÝ, L. and T. JIROUT. The effect of a rapid batch decompression after hydrothermal pretreatment of wheat straw on hydrolysate quality. *Chemical Papers*. 2015b, roč. 69, č. 12, p. 1563-1572, DOI:10.1515/chempap-2015-0188.
- KRÁTKÝ, L. and T. JIROUT. The effect of proces parameters during the thermal-expansionary pretreatment of wheat straw on hydrolyzate quality and biogas yield. *Renewable Energy*. 2015c, roč. 77, s. 250–258. DOI: 10.1016/j.renene.2014.12.026
- KRÁTKÝ, L. and T. JIROUT. Improving specific power consumption for mechanical mixing of feedstock in biogas fermenter by mechanical disintegration of lignocellulosic biomass. *Acta Polytechnica*. 2014, roč. 54, č. 5, s. 337–342. DOI: 10.1007/978-94-009-4313-1\_42



- KRÁTKÝ, L. and JIROUT, T. The effect of thermal – expansionary hydrolysis on wheat straw treatment. *Inzynieria i Aparatura Chemiczna*. 2012a, vol. 51, no. 43, p. 143-144. ISSN 0368-0827.
- KRÁTKÝ, L. and JIROUT, T. From biomass to biogas: a pilot plant technology. *Czasopismo Techniczne*. 2012b, vol. 109, no. 6, p. 197-206. ISSN 0011-4561.
- KRÁTKÝ, L., JIROUT, T. and NALEZENEC, J.: *Lab-scale technology for biogas production from lignocellulose wastes*. *Acta Polytechnica*. 2012c, vol. 52, no. 3, p. 54-59. ISSN 1210-2709.
- KRÁTKÝ, L., T. JIROUT, M. DOSTÁL A J. SKOČILAS. *Zařízení pro termicko-expanzní hydrolyzu*. [Prototyp], Vlastník: ČVUT v Praze, 2100.
- KRATOCHVÍL, Z. *Method of processing of lignocellulose materials by continuous pressure hydrolysis and equipment*. Inventors: Z. Kratochvíl, I. Roušar, F. Machek, Z. Kratochvíl jr., Registered 08. 02. 1995, Int.Cl.C07D307/50, Patent No. 281504, 08.02.1995. ESPACENET.
- KUTSAY, A., KRÁTKÝ, L. a JIROUT, T. Energy-economic analysis of thermal-expansionary pretreatment for its implementation at biogas plant. *Chemical Engineering and Technology*, 2016. (přijato po revizi).
- KURIAN, J.K., G.R. NAIR, A. HUSSAIN a G.S.V. RAGHAVAN. Feedstocks, logistics and pretreatment processes for sustainable lignocellulosic biorefineries: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013, roč. 25, s. 205–219. DOI: 10.1016/j.rser.2013.04.019.
- POHOŘELÝ, M., M. JEREMIÁŠ, P. KAMENÍKOVÁ, S. SKOBLIA, K. SVOBODA a M. PUNČOCHÁŘ. Zplyňování biomasy. *Chemické Listy*, 2012, roč. 106, s. 264–274. ISSN 0009-2770.
- RUIZ, H.A., R.M. RODRÍGUEZ-JASSO, B.D. FERNANDES, A.A. VICENTE and J.A. TEIXEIRA. Hydrothermal processing, as an alternative for upgrading agriculture residues and marine biomass according to the biorefinery concept: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013, roč. 21, X, s. 35–51. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.069.
- WANG, W., XIAOWEN, Ch., et al. Effect of mechanical disruption on the effectiveness of three reactors used for dilute acid pretreatment of corn stover Part 1. *Biotechnology for Biofuels*, vol.7, issue 57, 2014. ISSN 1754-6834. DOI: 10.1186/1754-6834-7-57.
- XIAO, L.P., Z.J. SUN, F. XU, and R.C. SUN. Impact of HCW pretreatment on the structural changes of woody biomass for bioethanol production. *BioResources*. 2011, roč. 6, č. 2, s. 1576–1598, ISSN 1930-2126.
- YANG, B. and M. TUCKER. Lab.pretreatment systems to understand biomass deconstruction. In: Ch. E. WYMAN, eds. *Aqueous pretreatment of plant biomass for biological and chemical conversion to fuels and chemicals*. John Wiley and Sons, 2013. pp. 489-521. ISBN 9780470972021.

## **Ing. Lukáš Krátký, Ph.D.**

*datum a místo narození:* 24.04.1985, Pardubice  
*trvalé bydliště:* 1. máje 225, 534 01 Holice  
*email:* lukaskratky@seznam.cz  
*mob:* +420-606-684-770

### **Vzdělání**

- 2010–2014** *doktorské studium, titul Ph.D.*  
České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní  
studijní obor: *Konstrukční a procesní inženýrství*  
disertační práce: *Technologie a zařízení pro předúpravu surovin při výrobě biopaliv*
- 2004–2010** *magisterské studium, titul Ing.*  
České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní  
studijní obor: *Procesní inženýrství*  
diplomová práce: *Laboratorní fermentor pro přípravu biopaliv*
- 2000–2004** *středoškolské s maturitou*  
Gymnázium Dr. Emila Holuba, Holice

### **Odborná praxe**

- od 2013** *odborný asistent*  
České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní  
Ústav procesní a zpracovatelské techniky
- 2011–2013** *strojní inženýr ve výzkumu a vývoji*  
České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní  
Ústav procesní a zpracovatelské techniky
- 2011** *zahraniční stáž v rámci doktorského studia*  
Université de La Rochelle, Pôle Sciences et Technologie,  
Département Génie des Procédés, Francie  
výuka: *cvičení a semináře předmětu Dessin Industriel*  
odborné téma: *Sledování expanze přehřátých materiálů do vakua pomocí rychlé kamery*
- 2009–2010** *Sales Support Assistant*  
Alfa Laval, s.r.o.  
technická podpora prodeje výměňkových stanic
- 2005–2008** *Junior konstruktér*  
Monts s.r.o.  
konstrukce a technologie výroby tlakových aparátů

### **Výzkumné a odborné zaměření**

- technologie, stroje a zařízení pro termochemickou a biochemickou transformaci odpadů na bioprodukty se zaměřením na předúpravy surovin v technologiích výroby biopaliv
- přenos hybnosti, tepla a hmoty v zařízeních a aparátech
- projektování technologií, návrh a konstrukce procesních strojů a zařízení
- experimentální stanovení fyzikálně-chemických vlastností látek

### **Nejvýznamnější řešené projekty**

- TA02011251 - Optimalizace smaltovaných míchacích zařízení z hlediska technologické potřeby uživatele. TAČR 2012-2014
- BATA/NIF/2014 - Hydrotermické zpracování v technologiích výroby biopaliv. 2014
- FR-TII/005 - Výzkum a vývoj efektivních aparátů s mechanickými míchadly pro suspenze pevné fáze v kapalině - míchání jemnozrnných suspenzí. MPO ČR 2011-2013
- MSM6840770035 - Rozvoj ekologicky šetrné decentralizované energetiky. MŠMT ČR 2007-2013

### **Publikační a výzkumná činnost**

Ing. Krátký je autorem či spoluautorem 1 české monografie, 1 kapitoly v zahraniční monografii, 4 článků v impaktovaných časopisech v databázi WoS, dále pak 7 článků v recenzovaných mezinárodních časopisech, 17 příspěvků na mezinárodních a 7 na českých konferencích. V databázi WoS a SCOPUS je více jak 50 kladných citací jeho publikací.

### **Členství**

- od 2015 - člen „technické komise CEN“ Centra technické normalizace prostřednictvím zpracovatele CHEVESS ENGINEERING v oblasti konstrukce tlakových zařízení
- od 2014 - člen European Federation of Chemical Engineering
- od 2014 - člen České společnosti chemického inženýrství