

Ekonomicky rentabilní zpracování odpadů v konceptu biorafinerie: fikce nebo skutečnost?

Lukáš Krátký, Petr Seghman, Roman Formánek, Tomáš Jirout

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Technická 4, Praha 6, tel. +420 224 352 550, e-mail: Lukas.Kratky@fs.cvut.cz

Souhrn

V současné době stále existuje velká propast mezi projektovanými a skutečnými průmyslovými výrobami biochemikálií a biopaliv z odpadní biomasy, a to především z ekonomických důvodů, tj. slovy investorů „Vždyť se to nevyplatí...“. Článek seznamuje čtenáře s možnostmi zpracování odpadů v konceptu biorafinerie. Její technicko-ekonomický potenciál je demonstrován na technologii výroby celulósových vláken, lignocelulósového etanolu a na technologii biochemické výroby lipidů z odpadního CO₂. Technicko-ekonomické studie prokázaly perspektivitu ekonomicky rentabilního zpracování lignocelulósových odpadů v biolihovarech druhé generace, a i atraktivitu technologie biochemické transformace odpadního CO₂ na lipidy. Stále je však nutný výzkum a vývoj ve všech oblastech ekologicky šetrného zpracování odpadů s důrazem na potenciál průmyslových aplikací.

Klíčová slova: biorafinerie, bioplyn, mikrořasy, etanol, lignocelulósový odpad

1. Úvod

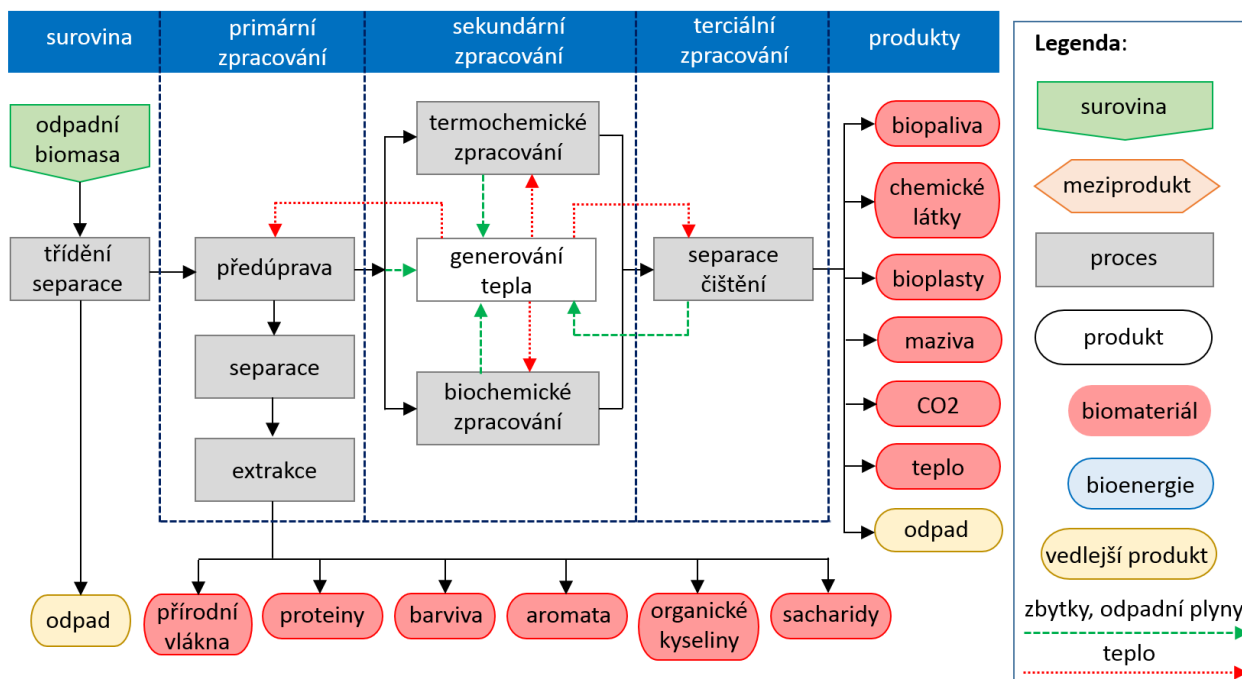
V Evropě vzniká každý rok více než $1,8 \cdot 10^9$ t_{TS} odpadů (Biom, 2015), v čemž jsou zahrnuty zemědělské odpady z rostlinných a živočišných výrob, odpady z potravinářského a zpracovatelského průmyslu, komunální odpady, odpady z údržby zeleně, kaly z čistíren odpadních vod, odděleně sbíraný komunální biologicky rozložitelný odpad z domácností a zahrad, nebo o odpady z restaurací a jídelen, důlní a povrchové těžby a z výroby energie. Cílem politiky EU je zásadně zredukovat objem vznikajících odpadů a minimalizovat tak jejich škodlivost vůči životnímu prostředí a na lidské zdraví. Tak např. v současné době končí na skládkách až 80 % biologicky rozložitelného odpadu, nicméně dle legislativy EU 99/31/ES "o skládkování odpadů" musí být do roku 2020 ukládáno o 65 % méně biologicky rozložitelných odpadů než v roce 1995.

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, celulósová vlákna, přírodní antioxidanty, esenciální látky, oleje), které nalézají své uplatnění např. při výrobě ekoinovativních materiálů (bioplasty, kompozity s biosložkou). Využitím odpadů k výrobě biopaliv a bioproduktů lze částečně omezit spalování fosilních paliv, snížit závislost na ropě a petrochemickým produktech, redukovat produkci oxidu uhličitého, přispět ke zmírnění globálního oteplování a ke zlepšení kvality životního prostředí. Technologie účinné transformace odpadů na biopaliva či cenné chemické látky jsou však stále ve vývoji. Nicméně v současné době lze pozorovat, že odborná veřejnost i průmyslová sféra se stále více orientuje na zpracování odpadů v konceptu tzv. biorafinerie.

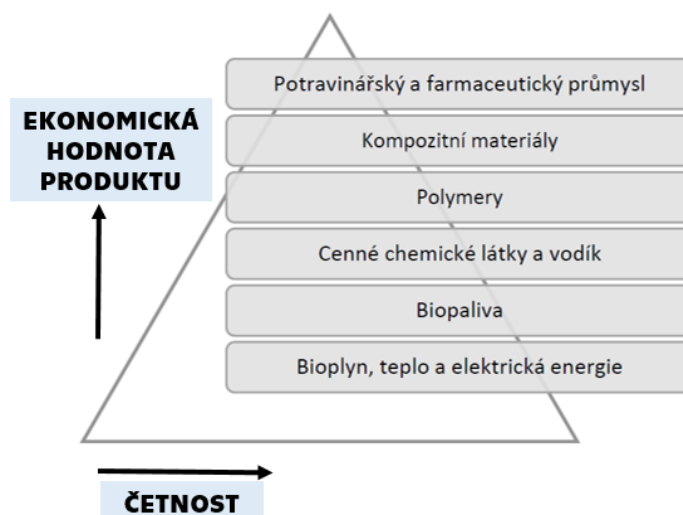
2. Biorafinerie

Biorafinerie je flexibilním multitechnologickým provozem, ve kterém dochází k paralelní konverzi odpadní biomasy na biomateriály, biochemikálie a biopaliva souběžně s výrobou elektrické energie či tepla. Technologický proces zpracování odpadní biomasy v konceptu biorafinerie lze rozdělit do několika základních kroků – skladování; primární zpracování (*třídění, předúprava, extrakce, separace*), sekundární zpracování (*thermochemické, biochemické metody*) a terciální zpracování (*separace, čištění a zušlechťování produktů*), viz obr. 1. Naskladněná odpadní biomasa nejprve prochází třídící linkou s cílem odseparovat nežádoucí příměsi (*kamení, kovy, sklo*) v závislosti na typu primárního a sekundárního zpracování. V dalším kroku následuje předúprava suroviny, jejímž primárním cílem je v maximálně možné míře na-

rušit ligninovou strukturu a zajistit tak maximální účinnost separace primárních produktů (*přírodní vlákna, proteiny, barviva, enzymy, aromata, krmiva*) a účinnost transformace odpadu na sekundární produkty (*biopaliva, chemické látky, CO₂, teplo, krmiva*). Surovina je proto podrobena fyzikální (*mechanická dezintegrace, sušení*), chemické (*alkalická, kyselá, solvolýza*), fyzikálně-chemické (*hydrotermické zpracování, parní expanze*) nebo biologické předúpravě (*houby, plísňe, enzymy*) a jejich vzájemným kombinacím (Krátký a Jirout, 2015a). V závislosti na typu odpadu následuje jeho thermochemické (zplyňování, pyrolýza) nebo biochemické (*alkoholové kvašení, anaerobní fermentace*) zpracování, a procesy terciálního zpracování generovaných produktů, tj. separace, čištění a zušlechťení.



Obr. 1 Technologický model biorafinerie (Krátký et al., 2017)



Obr. 2 Ekonomická hodnota produktu ve vztahu k jeho produkci (Krátký et al., 2017)

Typickými bioproducty, které lze získat z odpadní biomasy, jsou bioalkoholy, biovodík, elastomery, vlákna, pryskyřice, sacharidy, antibiotika, příchutě, barviva, polyoly, povrchově aktivní látky, oleje, dextriny, ethylestery, organické kyseliny a rozpouštědla. V závislosti na čistotě produktů lze nalézt jejich využití v dopravě, energetickém, textilním, stavebním, kosmetickém, farmaceutickém, chemickém, plastikařském, papírenském a v potravinářském průmyslu k výrobě potravinových příchutí a nutričních výrobků.

Při projektování technologie a zejména při výběru vhodného portfolia produktů, které lze získat zpracováním daného odpadu, je nutné dbát nejen na jeho výrobní náklady, ale zejména na výkupní cenu produktu ve vztahu k poptávce. Výstupem technologie zpracování odpadů v konceptu biorafinerie proto musí být kombinace primárních produktů s vysokou ekonomickou hodnotou a sekundárních produktů s nižší ekonomickou hodnotou, viz obr. 2. Mezi produkty s vysokou ekonomickou hodnotou lze zařadit komodity pro potravinářský průmysl, pro výrobu kompozitních materiálů s biosložkou, nebo bioplasty.

2. Příklady technicko-ekonomických studií zpracování odpadů v konceptu biorafinerie

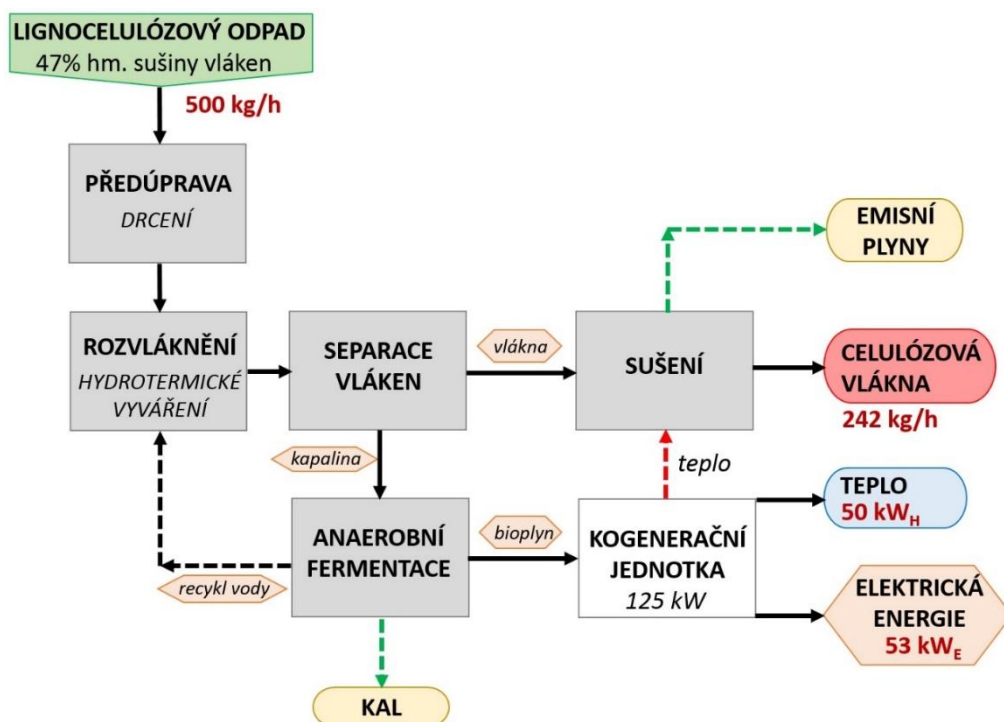
Je známo, že biopaliva a bioprodukty nejsou v současné době schopny konkurovat konvenčním paliivům či petrochemickým produktům zejména z hlediska výrobních nákladů. Hlavním úkolem pro odbornou veřejnost je proto nalézt slibné transformační technologie odpadní biomasy na bioprodukty, které budou vyráběny současně s alternativními zdroji energií. Jedině tak je možné výrazně zlepšit ekonomiku provozu. Pro potvrzení nebo vyvrácení této hypotézy byly provedeny prvotní technicko-ekonomické studie zpracování odpadů v konceptu biorafinerie. První technologie (Azizov, 2017) zpracovává vláknité odpady a jejími produkty jsou celulózová vlákna, teplo, kaly, CO₂ a další emisní plyny, viz kap. 2.1. V druhém případě je prezentována studie výroby lignocelulózového etanolu z kukuřičných oklasků (Seghman, 2017), viz kap. 2.2, přičemž dalšími produkty technologie jsou ligninový sirup, přiboudlina, tuhé zbytky, sádra a CO₂. Pro obě tyto technologie je charakteristické, že produkují odpadní CO₂. V současné době je však celosvětově snaha snižovat emise CO₂ a využít odpadní CO₂ k výrobě biokemikálií či biopaliv třetí a čtvrté generace. Jednou z možných cest zpracování odpadního CO₂ je např. jeho fotosyntetická transformace na mikrořasy bohaté na lipidy. Třetí studie je proto zaměřena na technologii výroby lipidů z odpadního CO₂ (Formánek, 2017), viz kap. 2.3.

Zpracování prezentovaných technicko-ekonomických studií bylo založeno na projektování detailních proudových technologických schémat (PFD schémata) a provedení hmotových a energetických bilancí s uvažováním regenerace tepla, na základě kterých byla navržena základní konstrukční uspořádání instalovaných strojů a aparátů. Celkové investiční náklady (CAPEX) byly vypočteny na základě metody „*The factorial method of cost estimating*“, o níž detailněji pojednávají Towler a Sinnott (2013). Stěžejním krokem metody je ocenění investičních nákladů jednotlivých strojů a zařízení na základě znalosti procesních parametrů. Sečtením všech investičních cen jednotlivých strojů a zařízení byla získána hodnota investičních nákladů na zařízení, tzv. ISBL. Celkové investiční náklady byly stanoveny jako součet ISBL, OSBL, DE a EeE. OSBL jsou investiční náklady na instalaci zařízení tj. instalace, potrubí, MaR, rozvod energií, stavba, nosné prvky, ochrana a nátěry a jejich výše zpravidla dosahuje 40 % nákladů ISBL. Zkratka DE reprezentuje investiční náklady pro projekci technologie, konstrukci a realizaci stavby a pro její odhad se doporučuje stanovit jí jako 0,1·(ISBL + OSBL). Poslední položka investičních nákladů je EeE, což představuje jakousi rezervu pro kolísání cen materiálů a práce, její hodnota se určí jako 0,1·ISBL. Chyba stanovení celkových investičních nákladů je ± 15–30 % z celkové částky. Provozní náklady technologie (OPEX) byly stanoveny na základě dílčích odhadů nákladů na suroviny, energie, na osobní náklady pracovníků, odborný dozor, servis a údržbu, spotřební materiál, laboratorní analýzy, pojištění, režie, náklady na dopravu a rezervu.

2.1 Technologie výroby přírodních vláken z odpadní biomasy

Na obr. 3 je prezentována biorafinerie (Azizov, 2017), která zpracovává vláknité odpady. Vytřídění lignocelulózový odpad bohatý na celulózová vlákna prochází nejprve úderovým drtičem s cílem zmenšit velikost částic a intenzifikovat tak následný proces hydrotermického vyvaření s následnou náhlou dekompresí vsádky (Krátký a Jirout, 2015b). Drcený odpad je v homogenizační jímce smíchán s vodou z recyklu v hmotnostním poměru 1:10 a taktó připravená vsádka je podrobena hydrotermickému rozkladu bez přídavku chemikálií při pracovní teplotě 200 °C po dobu 20-40 min. Po uplynutí požadované doby výdrže dochází k náhlé dekompresi vsádky do expanzní nádoby, odkud je vedena na separátor. Separovaná celulózová vlákna jsou sušena na požadovanou vlhkost sušicím vzduchem, který je nepřímo přehříván spaliny z kogenerační jednotky. Kapalná fáze, která je bohatá na rozpuštěné a neodseparované nerozpuštěné organické a anorganické sloučeniny, je anaerobně fermentována ve fermentoru při mezofilních teplotních podmínkách a vznikající bioplyn je spalován v kogenerační jednotce. Veškerá generovaná elektrická energie a část tepla jsou využity k pokrytí energetických nároků samotné technologie. Primárním produktem biorafinerie jsou celulózová vlákna, která nalézají své uplatnění v izolačních

materiálech, v elektrotechnice, farmacii, v kosmetických výrobcích a zejména jako výztuhy ke zvýšení pevnosti bioplastů a kompozitních materiálů s biosložkou. Sekundárními produkty jsou teplo, kaly, emisní plyny z kogenerace a brýdy ze sušárny. Detailní informace o PFD schématech, bilancích, kalkulaci celkových investičních nákladů, provozních nákladů a o rentabilitě provozu jsou dostupné v práci Azivov (2017).



Obr. 3 Blokové schéma technologie výroby přírodních vláken.

Tab. 1 Technicko-ekonomická analýza procesu.

Celkové investiční náklady CAPEX		58 000 000 Kč
Investice do zařízení		32 000 000 Kč
Investice na konstrukce, strojní montáže, MaR		12 500 000 Kč
Projekce, výroba, realizace		9 000 000 Kč
Rezerva pro kolísání cen		4 500 000 Kč
Provozní náklady OPEX		82 000 000 Kč r⁻¹
Přímé provozní náklady		46 400 000 Kč r ⁻¹
<i>nákup surovin, spotřební materiál, energie</i>		40 000 000 Kč r ⁻¹
<i>servis a údržba</i>		3 400 000 Kč r ⁻¹
<i>ostatní</i>	<i>mzdy, dozor, laboratoř</i>	3 000 000 Kč r ⁻¹
Nepřímé provozní náklady	<i>režie, pojištění</i>	2 000 000 Kč r ⁻¹
Doprava surovin, produktů a odpadu		33 600 000 Kč r ⁻¹
Ekonomická bilance procesu		
produkce celulósových vláken	<i>provoz 8000 hodin</i>	1 936 400 kg r ⁻¹
výkupní cena celulósových vláken		45 Kč kg ⁻¹
roční příjem z prodeje lipidů		87 500 000 Kč r ⁻¹
zdanitelný zisk		5 500 000 Kč r ⁻¹
odpisy s dobou odepisování 20 let		2 900 000 Kč r ⁻¹
prostá doba návratnosti		22,3 let

Z technického hlediska je prezentovaná technologie snáze realizovatelná, protože vlastní technické řešení technologie výroby celulósových vláken je založeno na využití zařízení, která jsou v dnešních

provozech běžná. Ekonomické posouzení technologie prokázalo, že při daném modelovém případě jsou celkové investiční náklady rovny 58 000 000 Kč a provozní náklady technologie 82 000 000 Kč r⁻¹. Při uvažování výkupní ceny celulósových vláken 45 Kč kg⁻¹ je roční příjem z jejich prodeje 87 500 000 Kč, tj. lze dosáhnout zdanitelného zisku 5 500 000 Kč r⁻¹. Při uvažování doby odepisování 20 let pak vychází prostá doba návratnosti investice na 22,3 let, tj. na hranici životnosti vlastní technologie, která je předpokládána v horizontu 20-30 let. Pro tuto technologii byla provedena citlivostní analýza, ze které vyplynulo, že dominantní vliv na ekonomiku provozu technologie má zejména výkupní cena celulósových vláken. Zmíněných 45 Kč kg⁻¹ je autory považováno za minimální výkupní cenu produktu, aby bylo dosaženo rozumné doby návratnosti technologie.

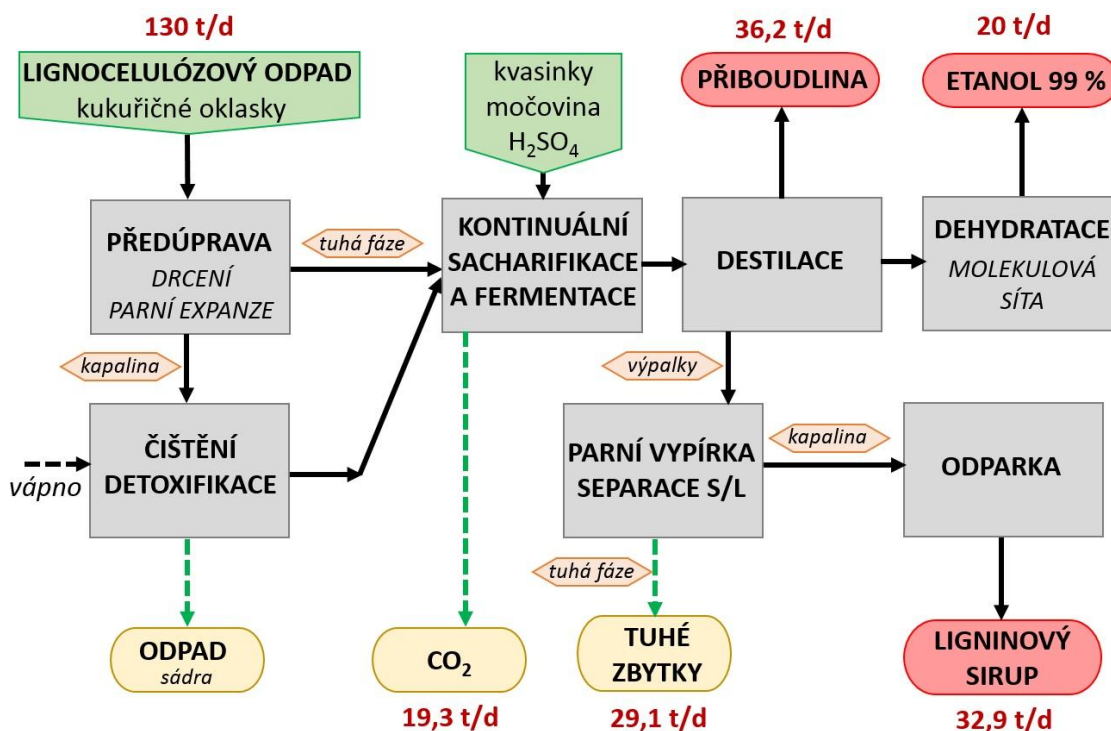
Lignocelulósový odpad jsou cenově dostupná surovina, která se běžně zpracovává kompostováním, spalováním, pyrolýzou, zplyňováním nebo anaerobní fermentací, tj. vždy dochází k emisi CO₂. Prezentovaná technologie je však založena na materiálově-energetické recyklaci lignocelulósových odpadů bohatých na celulósová vlákna, tj. odpady ze zemědělství, z dřevozpracujícího průmyslu, z údržby komunální zeleně, atd. Hlavními benefity této technologie jsou ekologicky šetrné zpracování odpadu v uzavřeném systému s regenerací tepla, materiálově-energetická recyklace lignocelulósové biomasy, minimalizace produkovaného odpadu a snížení emisí CO₂ vůči klasickým metodám zpracování. Na základě hmotových bilancí prezentované technologie vyplynulo, že díky hydrotermickému zpracování je cca 50 % hm. vstupní suroviny rozpuštěno v kapalině, která je dále anaerobně fermentována, a zbývající extrahovaná celulósová vlákna odcházejí na následné zpracování v sušárně. Tj. anaerobní fermentací kapalného zbytku se sníží i objem produkce emisního CO₂ o cca 50 % v porovnání s anaerobní fermentací celé vstupní suroviny. Nicméně i přes tyto benefity je nutné konstatovat, že bez poptávky po celulósových vláknech a bez vhodné hospodářské politiky zohledňující diskutované benefity se vlastní realizace a provoz této technologie neobejde.

Kritickými místy, které silně ovlivňují technickou i ekonomickou stránku celé technologie, je předúprava suroviny s technikou rozvláknění lignocelulósového svazku a technologie zušlechtění celulósových vláken. Vlastní anaerobní fermentace i sušení jsou technologie technicky vyspělé. Vědecko-výzkumné je proto nutné zaměřit zejména na zvýšení účinnosti technologie předúpravy, tj. na výzkum a vývoj intenzifikovaných, energeticky nenáročných a ekologicky šetrných technologií rozvláknění odpadní biomasy s cílem snížit investiční a provozní náklady. Technologie zušlechtění celulósových vláken není v popisované technologii uvažována, nicméně je nutné mít definovanou kvalitu produktu, tj. zákazník musí definovat požadavek na čistotu celulósových vláken a chemickou stabilitu s ohledem na jejich následné uplatnění.

2.2 Technologie výroby lignocelulósového etanolu

Obr. 4. prezentuje blokové schéma technologie výroby lignocelulósového etanolu z kukuřičných oklasků (Seghman, 2017) v konceptu biorafinerie. Surovina je při příjmu vyčištěna od nečistot (hlína, kamení, kovy) a rozdrčena na velikost vhodnou pro následné zpracování. Dezintegrováná surovina je v dalším kroku podrobena předúpravě technologií parní expanze. Během předúpravy dochází v reaktoru k přímému kontaktu syté páry o pracovní teplotě 235°C se surovinou, rozpouští se část hemicelulózy a ligninu, a tím se podstatně zlepšuje přístupnost celulósových svazků následnému mikrobiálnímu rozkladu. Po uplynutí doby výdrže na pracovní teplotě, která se pohybuje řádově v jednotkách sekund, následuje prudká dekomprese vsádky, která způsobí intenzivní rozrušení struktury materiálu. Takto připravenou vsádku je však nutné neutralizovat a detoxifikovat. Vsádka je proto vedena na separátor, kde se vzájemně oddělí tuhá a kapalná fáze. Tuhá fáze postupuje přímo do následného kroku zpracování, kterým je kontinuální sacharifikace a fermentace (SSF) v sériově zapojených bioreaktorech. Kapalná fáze je před vlastním stupem do SSF bioreaktorů nejprve vedena do neutralizačních tanků, kde dochází k jejímu čištění a detoxifikaci přidáním vhodného chemického činidla. Vsádka je poté čerpána přes kalolis do homogenizační jímky, kde je smíchána s tuhými fází, kvasinkami a enzymy na jakost vhodnou pro SSF technologii. Fermentační tanky pracují v teplotním rozmezí 41-65°C v závislosti na stádiu procesu SSF. Po celkové době zdržení, která se pohybuje okolo 6 dní, je vsádka přečerpána do mezizásobníku, odkud je vedena do sekce separace a čištění produktů. První stupeň separace produktů SSF fermentace probíhá na záparové koloně topené sytou parou. Produktem kolony jsou páry bohaté na etanol a vodu, a výpalky obsahující všechny nerozpustné látky (zbytky siláže, kvasinky) a vodu. Páry z hlavy záparové kolony jsou vedeny přes kondenzátor na rektifikační kolonu, jejímiž produkty jsou páry etanolu se slože-

ním odpovídajícím azeotropickému bodu, tj. 95 % hm. etanolu a vody, a přiboudlina, tj. směs těžších alkoholů a dalších organických látek. K zušlechtění etanolu na 99 % hm. je využito adsorpce vlhkosti na molekulových sítích. Výpalky, vedlejší produkt ze záparové kolony, jsou nejprve odstředěny. Separované pevné zbytky naleznou své uplatnění jako krmivo nebo po vysušení jako palivo v energetické sekci biolihovaru. Kapalná fáze je zahuštěna na odparce, vznikající brýdové páry jsou využity v okruhu regenerace tepla a zahuštěný produkt, ligninový sirup je dalším produktem biorafinerie.



Obr. 4 Blokové schéma technologie výroby lignocelulózového etanolu.

Průmyslová technologie výroby klasického etanolu ze surovin se škrobovým základem je starý a technicky velmi dobře propracovaný proces. Surovinu není třeba komplikovaně předupravovat, biodegradabilita suroviny se blíží 90 %. Technologie výroby bioetanolu z lignocelulózového odpadu se liší od klasické výroby etanolu tím, že navíc obsahuje sekce předúpravy suroviny a odlišnou technologii zcukření vsádky, ostatní technologické celky jsou téměř shodné. Ekonomické posouzení technologie prokázalo, viz. Tab. 2, že při daném modelovém případě jsou celkové investiční náklady rovny 244 000 000 Kč a provozní náklady technologie 273 500 000 Kč r⁻¹. Při uvažování výkupních cen 99 % hm. bioetanolu 31 000 Kč t⁻¹, tuhých zbytků 3 000 Kč t⁻¹ a ligninového sirupu 10 800 Kč t⁻¹ je roční příjem z jejich prodeje 346 500 000 Kč, tj. lze dosáhnout zdanitelného zisku 73 000 000 Kč r⁻¹. Při uvažování doby odepisování 10 let pak vychází prostá doba návratnosti investice na 5,1 let s předpokládanou životností vlastní technologie 30 let. Z citlivostní analýzy vyplynulo, že dominantním parametrem ovlivňujícím ekonomiku provozu jsou výkupní ceny bioetanolu a ligninového sirupu. Bylo zjištěno, že při výkupní ceně bioetanolu pod 26 000 Kč t⁻¹ začíná doba návratnosti prudce růst. Cena 26 000 Kč t⁻¹ je přitom přibližně výkupní cena bioetanolu první generace. Pokud by výkupní cena bioetanolu byla běžná, tj. 9 000 Kč t⁻¹, biorafinerie je ztrátová a doba návratnosti projektu se blíží jeho životnosti. Mezní hranice výkupní ceny etanolu s dobou návratnosti do 9 let, je nad 30 000 Kč t⁻¹. Produkce ligninového sirupu je přibližně o 50 % vyšší než produkce etanolu, proto jeho cena má rovněž výrazný vliv na ekonomiku procesu. Největší míra nejistoty spočívá v samotném určení ceny ligninového sirupu. Lignin má široké využití v chemickém průmyslu a jeho cena je závislá na více parametrech (čistota, obsah vody, původ). Technologická sekce výroby ligninového sirupu je však rentabilní pouze při výkupních cenách vyšších jak 9 130 Kč t⁻¹. Pokud je jeho výkupní cena nižší, zařazení odparky a její provoz zvýší náklady více, než kolik výnosů přinese prodej zahuštěného sirupu.

Tab. 2. Technicko-ekonomická analýza procesu.

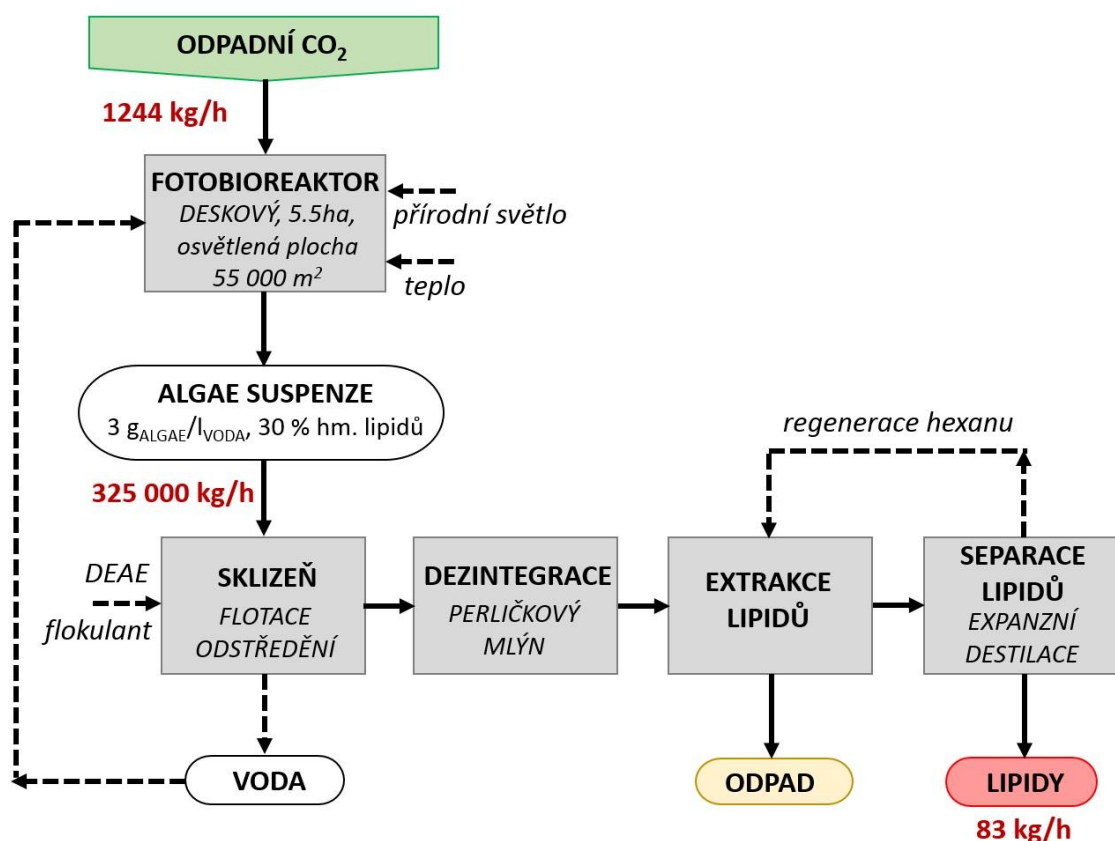
Celkové investiční náklady CAPEX		244 000 000 Kč
Investice do zařízení		144 000 000 Kč
Investice na konstrukce, strojní montáže, MaR		58 000 000 Kč
Projekce, výroba, realizace		28 000 000 Kč
Rezerva pro kolísání cen		14 000 000 Kč
Provozní náklady OPEX		273 500 000 Kč r⁻¹
Přímé provozní náklady		262 000 000 Kč r ⁻¹
<i>nákup surovin, spotřební materiál, energie</i>		235 000 000 Kč r ⁻¹
<i>servis a údržba</i>		13 000 000 Kč r ⁻¹
<i>ostatní</i>	<i>mzdy, dozor, laboratoř</i>	14 000 000 Kč r ⁻¹
Nepřímé provozní náklady	<i>režie, pojištění</i>	8 000 000 Kč r ⁻¹
Doprava surovin, produktů a odpadu		3 500 000 Kč r ⁻¹
Ekonomická bilance procesu		
roční produkce etanolu 99 %	<i>provoz 8000 hodin</i>	6 660 t r ⁻¹
výkupní cena etanolu 99 %		31 000 Kč t ⁻¹
roční příjem z prodeje etanolu 99 %		204 600 000 Kč r ⁻¹
roční produkce sádry	<i>provoz 8000 hodin</i>	302 t r ⁻¹
výkupní cena sádry		10 Kč kg ⁻¹
roční příjem z prodeje sádry		3 020 000 Kč r ⁻¹
roční produkce tuhých zbytků	<i>provoz 8000 hodin</i>	9 690 t r ⁻¹
výkupní cena tuhých zbytků	<i>krmivo</i>	3 000 Kč t ⁻¹
roční příjem z prodeje tuhých zbytků		29 000 000 Kč r ⁻¹
roční produkce ligninového sirupu	<i>provoz 8000 hodin</i>	10 800 t r ⁻¹
výkupní cena ligninového sirupu		10 000 Kč t ⁻¹
roční příjem z prodeje ligninového sirupu		108 000 000 Kč r ⁻¹
zdanitelný zisk		71 120 000 Kč r ⁻¹
odpisy s dobou odepisování 10 let (technologie, stavba)		24 400 000 Kč r ⁻¹
prostá doba návratnosti		5,2 let

Technologie výroby bioetanolu z lignocelulóзовých odpadů není technologicky ani technicky vyspělý proces. Nicméně prezentovaná technico-ekonomická studie ukázala, že technologie výroby lignocelulóзовého etanolu má budoucnost a lze ji využít jako decentralizovanou technologii zpracování odpadu. Nicméně k tomu, aby byla tato technologie efektivní, tak je velmi důležité směřovat výzkum a vývoj do těchto oblastí předúpravy suroviny, přenosu hybnosti, hmoty a tepla v mechanicky míchaných fermentorech a nádržích, a vlastnímu SSF procesu. Předúprava suroviny je klíčovou operací, nezbytnou k zvýšení biologické rozložitelnosti odpadů. I přes aplikaci různých metod předúprav se biodegradabilita suroviny pohybuje v současné době v rozmezí 30-50 %. Proto je nutné zaměřit se především na nalezení efektivních, energeticky nenáročných a ekonomicky rentabilních technologií předúprav lignocelulóзовých odpadů. SSF proces, čerpatelnost a míchatelnost vsádky s lignocelulóзовou surovinou, která má tendenci ulpívat na pracovních částech zařízení, sedimentovat ke dnu nádoby případně plovat na hladině vsádky. Optimalizace přenosu hybnosti, hmoty a tepla v mechanicky míchaných fermentorech a nádržích je rovněž nezbytná. Jedině tak je možné zvýšit biodegradabilitu suroviny, zvýšit produkci primárních produktů, snížit provozní náklady vhodnou regenerací tepla a použitých chemikálií a dosáhnout tak lepší ekonomiky provozu s nižší citlivostí na výkupních cenách bioproduktů.

2.3 Technologie výroby lipidů z mikrořas

V posledních letech je stále více kladen důraz na globální snižování emisí CO₂ do ovzduší, a proto se vědecko-výzkumné zaměřují na možnosti jeho využití k výrobě biochemikálií či biopaliv třetí a čtvrté ge-

nerace. Jednou z možností je fotosyntetická transformace odpadního CO₂ na mikrořasy bohaté na lipidy. V dostupné odborné literatuře lze nalézt mnoho publikací na téma fotobioreaktory, sklizeň řas, extrakce cenných látek z řas. Nicméně všechny tyto technologické kroky jsou řešeny zcela odděleně, chybí zde ucelená představa o komplexní technologii zpracování mikrořas, tj. jak koncipovat a realizovat komplexní technologii výroby. V tomto příspěvku byly prezentované technologie výroby celulózových vláken i technologie výroby lignocelulózového etanolu. Obě technologie jsou zdrojem CO₂ jako sekundární produktu. Proto byla provedena technicko-ekonomická studie biochemické transformace odpadního CO₂ na lipidy (Formánek, 2017) s cílem získat koncept bezemisní biorafinerie.



Obr. 5 Blokové schéma technologie výroby lipidů za řas.

Na obr. 5 je uvedeno blokové technické schéma kontinuální technologie výroby lipidů z odpadního CO₂. Odpadní CO₂ je přiváděn do zadržovací nádoby, ve které dochází k jeho rozpuštění a smíchání se řasami naočkovanou kapalinou. Odtud je suspenze vedena čerpadlem do deskových fotobioreaktorů (Bělohav et al., 2018), kde dochází za vzájemného účinku tepla a světla k vlastní fotosyntetické transformaci odpadního CO₂ na mikrořasy rodu *Chlorella*. Výstupem z fotobioreaktoru je suspenze voda-mikrořasy s charakteristickým obsahem 30 % hm. TS lipidů a typickou koncentrací 3 g_{řas} l⁻¹. Suspenze je skladována v zásobníku, odkud je čerpána do technologického bloku sklizně. Suspenze nejprve protéká statickým směšovačem, do kterého je kontinuálně dávkován flokulant. V mezizásobníku dochází k růstu flokulí a suspenze poté vstupuje do flotátoru, kde dochází k primárnímu zahuštění mikrořas. Z flotátoru jsou primárně zahuštěné řasy čerpány do dekantální odstředivky, ve které dochází k jejímu konečnému odvodnění na hodnotu požadovanou v následném kroku zpracování. Separovaná voda odchází zpět do technologie výroby mikrořas a zahuštěné mikrořasy jsou čerpány do perličkového mlýnu, ve kterém dochází k rozbití buněčných stěn mikrořas a vyplavení obsahu buňky řasy do nosné kapaliny, vody. Dezinintegrovane mikrořasy postupují do extraktoru, ve kterém jsou smíchány s rozpouštědlem, hexanem, v poměru 200 ml g_{řas}⁻¹ s dobou zpracování 2 h. Technologie předpokládá instalaci několika paralelně zapojených extraktorů k zajištění kontinuálního provozu linky. Vsádka z extraktoru je po uplynutí potřebné doby extrakce čerpána do kontinuální bubnové odstředivky, ve které dochází k odloučení tuhých příměsí (flokule, biomasa). Následuje mezizásobník, ve kterém je odsazena zbylá voda. Rozpouštědlo

a lipidy jsou v následujícím kroku vzájemně odděleny pomocí dvoustupňové expanzní destilace. Navržená technologie uvažuje regeneraci tepla a rozpouštědla.

Tab. 3 Technicko-ekonomická analýza procesu.

Celkové investiční náklady CAPEX		474 000 000 Kč
Investice do kultivace		176 000 000 Kč
Investice do sběru, dezintegrace, extrakce, separace		95 000 000 Kč
Investice na konstrukce, strojní montáže, MaR		108 000 000 Kč
Projekce, výroba, realizace		57 000 000 Kč
Rezerva pro kolísání cen		38 000 000 Kč
Provozní náklady OPEX		502 000 000 Kč r⁻¹
Přímé provozní náklady		493 000 000 Kč r ⁻¹
<i>suroviny, energie, spotřební materiál kultivace</i>		321 000 000 Kč r ⁻¹
<i>nákup surovin, spotřební materiál, energie</i>		140 000 000 Kč r ⁻¹
<i>servis a údržba</i>		28 500 000 Kč r ⁻¹
<i>ostatní</i>	<i>mzdy, dozor, laboratoř</i>	3 500 000 Kč r ⁻¹
Nepřímé provozní náklady	<i>režie, pojištění</i>	9 000 000 Kč r ⁻¹
Doprava surovin, produktů a odpadu		0 Kč r ⁻¹
Ekonomická bilance procesu		
roční produkce lipidů	<i>provoz 8000 hodin</i>	666 667 kg r ⁻¹
výkupní cena lipidů		900 Kč kg ⁻¹
roční příjem z prodeje lipidů		600 000 000 Kč r ⁻¹
zdanitelný zisk		98 000 000 Kč r ⁻¹
odpisy s dobou odepisování 10 let (technologie, stavba)		47 400 000 Kč r ⁻¹
prostá doba návratnosti		9,0 let

Ekonomické posouzení technologie prokázalo, viz. Tab. 3, že při daném modelovém případě jsou celkové investiční náklady na stavbu fotobioreaktorů rovny 176 000 000 Kč a na zbývající část zpracování řas 95 000 000 Kč, z toho 22 % na technologii sklizně, 12 % na technologii dezintegrace, 42 % na technologii extrakce a 24% na technologii separace lipidů. Provozní náklady technologie byly vyčísleny 502 000 000 Kč r⁻¹. Při uvažování výkupních cen extrahovaných lipidů 900 Kč kg⁻¹ je roční příjem z jejich prodeje 600 000 000 Kč, tj. lze dosáhnout zdanitelného zisku 100 000 000 Kč r⁻¹. Při uvažování doby odepisování 10 let pak vychází prostá doba návratnosti investice na 9,0 let s předpokládanou životností vlastní technologie 30 let. Vlastní technicko-ekonomické zhodnocení však prokázalo, že ekonomika je extrémně citlivá na investiční a provozní náklady fotobioreaktorů, typ a účinnost extrakce, a na výkupních cenách.

- Vlastní technologie je v uvažovaném konceptu při daných podmínkách rentabilní pouze při výkupních cenách lipidů vyšších jak 800 Kč kg⁻¹.
- Fotobioreaktory – Z hlediska teoretické produkce řas v ozářeném objemu dosahuje deskový fotobioreaktor nejvyšší výtěžnosti řas a to 297 g m⁻² d⁻¹ a 2970 kg_{řas} d⁻¹ ha⁻¹. V 1 litru kultivačního média jsou 3 g řas s 30 hm. % obsahem lipidu tj. 1 g lipidů v 1 litru vody. K výrobě 1 kg lipidů je tedy zapotřebí 1 t kultivačního média, tj. vody s řasami, při 100 % účinnosti extrakce. Důvodem vysokých investiční a provozních nákladů je velmi nízká koncentrace lipidů v řasách a rovněž koncentrace řas ve vstupní surovině.
- Z hlediska vlastní kultivace řas ve fotobioreaktorech je žádoucí zaměřit se možnosti zvýšení koncentrace lipidů v mikrořasách, nebo zvýšení koncentrace mikrořas v kultivačním médiu. Fotosyntetická transformace CO₂ na mikrořasy by proto měla být řešena jako decentralizovaná kultivační technologie mikrořas s následným sběrem a sklizní, kdy výstupním produktem by byly zahuštěné mikrořasy. Ty by byly dopravovány do centralizovaných extrakčních technolo-

gií zpracování řas. Takovéto řešení podstatně sníží investiční i provozní náklady obou technologií.

- Účinnost extrakce - Účinnost extrakce lipidů z mikrořas je ve většině studií definována jako výtěžek hmotnostního podílu lipidů z celkové hmotnosti mikrořas. V prezentované studii byla uvažována hodnota 10 % hm. z celkové hmotnosti mikrořas, což při koncentraci 30 % hm. lipidů v řasách znamená, že nelze vyextrahovat více než 1/3 obsažených lipidů. Proto je nutné se věnovat výzkumu a vývoji efektivních extrakčních technologií.

Celá technologie je složena z konvenčních strojů a aparátů, které jsou na současném trhu lehce dostupné. Kritickými místy celé technologie jsou kultivace řas, technologie sběru a separace řas z vodného prostředí, kdy je nutné intenzifikovat separační techniky s ohledem na konstrukční limity flotačních jednotek a dekantčních odstředivek. Dezintegrace buněčných stěn v perličkovém mlýnu je energeticky náročná a hrozí teplotní degradace lipidů z důvodu nehomogenity teplotního pole v pracovním prostoru mlýnu. Extrakce a extraktory jsou dle současného stavu vědeckého poznání neúčinné, teplotní degradace produktu hrozí i při vlastní expanzní destilaci, a proto k dosažení intenzifikovaných procesů je nutno zaměřit vývoj a výzkum právě do zmíněných oblastí.

3. Závěr

Technologie zpracování odpadů v konceptu biorafinerie jsou prozatím ekonomicky ne příliš zajímavým řešením materiálové a energetické recyklace odpadů. Díky velmi vysokým investičním nákladům na technologie a výrobním cenám produktů nejsou schopny konkurovat konvenčním petrochemickým produktům. Nicméně je nutné si uvědomit, že se jedná o technologie s příznivým dopadem na životní prostředí. Zpracováním odpadů v konceptu biorafinerie lze snížit množství skládkovaných nebo spalovaných odpadů, transformací odpadů lze získat produkty, které se mohou stát náhradou či příměsí k petrochemickým produktům, lze snížit produkci emisních plynů, docílit tzv. bezemisní technologie.

Tab. 4 SWOT analýza perspektivity biorafinerie

silné stránky	slabiny
<ul style="list-style-type: none"> • možnost dosáhnout maximální konverze velkoobjemového zpracování odpadní biomasy • produkce velkého množství různých produktů pro různá odvětví (zemědělský, potravinářský, chemický, energetický průmysl) • nová technologie vycházející ze známých a v průmyslovém měřítku fungujících provozů (výroba papíru, alkoholu a potravin) • možnost efektivního decentralizovaného zpracování odpadů 	<ul style="list-style-type: none"> • snaha prorazit s novými výrobky do uzavřeného trhu (chemická, energetický, spotřební a potravinářský průmysl, doprava) • konkurenceschopnost s tradičními produkty kvůli kvalitě • ekonomická rentabilita (zvláště u složitějších produktů) • vývoj velkoobjemové technologie zpracování vyžaduje nutnost testování v laboratorním, čtvrt- a poloprovozním měřítku • silná závislost na množství a složení odpadů
příležitosti	nebezpečí
<ul style="list-style-type: none"> • minimalizace množství skládkovaných odpadů • produkce ekoinovativních materiálů • snížení zátěže na životní prostředí • tvorba významného příspěvku v oblasti udržitelného rozvoje • dodržení cílů světových politik o omezení využívání fosilních zdrojů energie 	<ul style="list-style-type: none"> • poptávka versus nabídka produktů a jejich kvality • nerovnoměrné rozložení množství a složení odpadů (možnost politických a logistických změn) • vysoké počáteční investiční náklady (problém najít investory) • silná závislost na legislativě

Technicko-ekonomické studie prokázali perspektivitu ekonomicky rentabilního zpracování lignocelulóзовých odpadů v biolihovarech druhé generace, a i atraktivitu technologie biochemické transformace odpadního CO₂ na lipidy. Proto je stále nutný výzkum a vývoj ve všech oblastech ekologicky šetrného zpracování odpadů s důrazem na potenciál průmyslových aplikací, viz Tab. 4. Tj. nalézt taková technická řešení, která zajistí efektivní, energeticky nenáročnou, ekonomicky přívětivou a ekologicky šetrnou transformaci odpadní suroviny na alternativní zdroje energií a chemické látky. Nicméně bez příznivé le-

gislativy a hospodářské politiky (*cenově dostupná surovina, striktní podmínky ochrany životního prostředí, fondy pro podporu vývoje nových technologií zpracování odpadních surovin, efektivní rozmístění průmyslových technologií vzhledem k dostupnosti suroviny, plán využití a podpory biopaliv, zajištění finanční podpory pro výrobu biopaliv z odpadních surovin, daňové zvýhodnění průmyslových provozů a spotřebitelů využívajících biopaliva*) nelze prozatím tento koncept s vidinou okamžitého ekonomicky rentabilního provozu uskutečnit.

Tento výzkum byl podpořen z projektu OP VVV č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000753 „Centrum výzkumu nízkouhlíkových energetických technologií“.

Seznam literatury

- AZIZOV, S. *Environmental-friendly technology for cellulosic fibre extraction for biorefinery*. 2017. Diplomová práce. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky.
- BIOM. *Biomasa jako zdroj energie*. 2015, Dostupné z: http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/biomasa_jako_zdroj_energie.pdf
- BĚLOHLAV, V., JIROUT, T., KRÁTKÝ, L. Možnosti realizace fotobioreaktorů v průmyslovém měřítku. *Chemické Listy* 112, 2018. (in print).
- FORMÁNEK, R. *Efektivní technologie a zařízení pro sběr, separaci a extrakci chemicky cenných látek z mikrořas*. 2017. Diplomová práce. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky.
- KRÁTKÝ, L. a JIROUT, T.: *Moderní trendy předúprav biomasy pro intenzifikaci výroby biopaliv 2. generace*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2015a, 190 s. ISBN 978-80-01-05720-9.
- KRÁTKÝ, L. a JIROUT, T.: The effect of process parameters during the thermal-expansive pretreatment of wheat straw on hydrolyzate quality and biogas yield. *Renewable Energy*. 2015b, vol. 77, p. 250-258. ISSN 0960-1481.
- KRÁTKÝ, L., JIROUT, T., a KUTSAY, A. Perspektivita zpracování odpadů v biorafineriích. In: *Sborník příspěvků TVIP 2017*. Týden výzkumu a inovací pro praxi a životní prostředí - TVIP 2017. Hustopeče, 21.03.2017 - 23.03.2017. Praha: CEMC - České ekologické manažerské centrum. 2017, ISBN 978-80-85990-30-0.
- SEGHMAN, P. *Lignocelulózová bioetanolová biorafinerie*. 2017. Diplomová práce. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky.
- TOWLER, G. P. and R. SINNOTT. *Chemical engineering design: principles, practice, and economics of plant and process design*. 2. vyd. Boston, MA: Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 978-008-0966-595.

Economically feasible waste treatment in biorefinery concept: fiction or reality?

Lukas Kratky, Petr Seghman, Roman Formánek, Tomas Jirout

Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Process Engineering, Technicka 4, Prague 6, Czech Republic,
phone +420 224 352 550, e-mail: Lukas.Kratky@fs.cvut.cz

Abstract:

Generally known, there is still a huge gap between designing and operating industrial technologies, in which waste is transformed to biofuels and biochemicals, due to economic reasons especially. The words of investors: "It's not profitable...". The paper, therefore, presents a novel trend of waste treatment in biorefinery concept. Techno-economical studies of cellulosic fibre separation technology, lignocellulosic ethanol production and waste CO₂ to lipids technologies in biorefinery concept are presented. These studies show perspectivity of economic feasible lignocellulosic waste conversion to ethanol, and attractivity of biochemical waste conversion of CO₂ to lipids. Nevertheless, an intensive research and development activities are needed in all areas of environmentally friendly waste treatment technologies with an emphasis on the potential of industrial applications.

Keywords: biorefinery, biogas, algae, ethanol, lignocellulosic waste