

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů
Katedra mikrobiologie, výživy a dietetiky



Možnosti využití výstupních proudů ze spaloven komunálního
odpadu

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Michal Vrabec

Vedoucí práce: doc. Ing. Lubomír Růžek CSc.

2012

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Možnosti využití výstupních proudů ze spaloven komunálního odpadu“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu literatury.

V Praze dne 10. dubna 2012

Podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Lubomíru Růžkovi CSc. za trpělivost, vedení práce a užitečné informace.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petrovi Novákovi, zástupci ředitele pro ekologii Termizo Liberec, a.s., za možnost podílet se na mezinárodním projektu a Ing. Jiřímu Douchovi, CSc., se kterým jsem spolupracoval přímo v terénu v Dublovicích.

Souhrn

Tato práce se v experimentální části zabývá možností využití spalin ke kultivaci řas. Při srovnání se suchozemskými plodinami se zelené řasy vyznačují vysokou rychlostí růstu, několikanásobně vyššími výnosy a vyšším obsahem škrobu nebo lipidů, nízkými nároky na vodu a živiny a schopností tolerovat vysokou koncentraci CO₂ (350krát vyšší než v atmosféře), díky čemuž mají potenciál snižovat bilanci emisí skleníkových plynů. Řasy s vysokým obsahem škrobu nebo lipidů jsou potenciálním zdrojem pro výrobu biopaliv. Cílem bylo ověřit tuto možnost kultivace na reálných spalínách, jejichž zdrojem je kogenerační jednotka bioplynové stanice. Experiment probíhal celkem 47 kultivačních dní v areálu Zemědělského družstva Dublovice (okres Příbram). Kultivace řas probíhala v tenké vrstvě suspenze na plošinovém fotobioreaktoru třeboňského typu o kultivační ploše 32 m², který je patentem pracovníků Mikrobiologického ústavu v Třeboni. Suspenze řas stéká po plošině samospádem ve vrstvě 6 – 10 mm. Koloběh uzavírá oběhové čerpadlo, které točí suspenzi stále dokola. Ke kultivaci byl vybrán kmen řasy *Chlorella sp.*, též vyselektovaný pracovníky v Třeboni, který se vyznačuje vysokou rychlostí růstu, vhodným složením cenných látek a vhodností pro daný typ kultivace. Experiment byl prováděn v rámci mezinárodního projektu EUREKA ALGANOL, jehož hlavním zadavatelem a řešitelem je spalovna komunálního odpadu Termizo, a.s., Liberec.

Během kultivace byly měřeny a zaznamenávány charakteristiky jako je teplota kultury, hodnota pH, koncentrace rozpuštěného O₂, objem dodávaných spalin, parciální tlak CO₂, energie fotosynteticky aktivního záření a především nárůst sušiny, tedy produktivita kultury.

Výsledky jsou prezentovány především ve formě přehledných grafů, ve kterých je znázorněn např. průběh teploty suspenze během dne i během celého experimentu, závislost energie fotosynteticky aktivního záření na přírůstku biomasy a teploty suspenze, vztah mezi množstvím dodaných živin a reálně dosažené produktivity kultury, porovnání denních přírůstků a nočních úbytků sušiny nebo vztah mezi optickou hustotou a koncentrací biomasy.

Cílem práce v části literární rešerše bylo zhodnotit energetické využití odpadů, ve zkratce popsat materiálové výstupní proudy ze spaloven komunálního odpadu s distribucí prvků do jednotlivých produktů. Hlavním impulsem bylo negativní pohlížení veřejnosti na spalovny komunálního odpadu (zařízení na energetické využití odpadu) jako na hrozbu pro životní prostředí a zdraví lidí. Cílem tedy bylo zhodnotit vliv energetického využití odpadu na

životní prostředí především z pohledu produkce emisí znečišťujících látek v porovnání s dalšími zdroji znečištění.

Klíčová slova: řasy, *Chlorella sp.*, plošinový fotobioreaktor, energie fotosynteticky aktivního záření, spaliny, biopaliva, spalovny

Summary

This work in the experimental part deals with the possibility of using flue gas for cultivation of microalgae. When compared to terrestrial crops green algae have high growth rate, much higher yields and higher content of starch or lipids, low requirements for water and nutrients and the ability to tolerate high concentrations of carbon dioxide (350 times higher than in the atmosphere), and thus have the potential to reduce the greenhouse gas emissions. Algae with high content carbohydrates or lipids are a potential source for biofuel production. The mission was to verify the possibility of cultivation on real flue gas, which is a source of biogas cogeneration unit. The experiment was conducted a total of 47 days of cultivation in the area of agricultural company Dublovice (Příbram district). Cultivation of algae took place in a thin layer of suspension on the platform type of photobioreactor with cultivation area of 32 square meters, which is a patent of czech scientists of the Microbiological institute in Třeboň. The suspension flows down because of gravity. Closed cycle circulating pump, which rotates the suspension still around. For cultivation was selected strain of *Chlorella sp.*, also selected by czech scientist in Třeboň, which is characterized by high growth rates, appropriate composition of valuable substances and suitability for the type of cultivation. The experiment was conducted in the international project EUREKA ALGANOL, the main sponsor and the investigator Termizo was municipal waste incinerator in Liberec.

During cultivation were measured and recorded characteristics such as culture temperature, pH, concentration of dissolved oxygen, the volume of gas supplied, the partial pressure of carbon dioxide, energy photosynthetically active radiation, and especially the increase of dry biomass, means productivity culture.

Results are presented mainly in the form of graphs, which shows for example the temperature as suspensions during the day and throughout the experiment, the energy dependence of photosynthetically active radiation PAR in the growth of biomass suspension and temperature, the relationship between the amount of nutrients delivered real achievements in productivity and culture, compared daily gain and decreases in dry matter or relationship between optical density and concentration of biomass.

The aim of the work in the literature review was to evaluate the energy use of waste material in a nutshell describe the output currents from municipal waste incineration plants

with the distribution of elements in each product. The main impuls was negative public viewed incineration of municipal, as a big threat for environment and human health. The aim was therefore to assess the impact of energy waste on the environment mainly from the emission site in comparison with other sources of pollution.

Key words: algae, *Chlorella sp.*, flat photobioreactors, photosynthetically active radiation energy, combustion, biofuels, wasre incineration plants

Obsah

Souhrn	4
1. Úvod	1
2. Cíle práce	3
3. Literární rešerše.....	4
3.1. Energetické využití odpadu v ČR a dalších státech	4
3.2. Odpadové hospodářství ČR v následujících letech.....	6
3.3. Odpad jako obnovitelný zdroj energie.....	7
3.4. Energetické využití, spalování odpadu	8
3.5. Vliv energetického využití odpadu na životní prostředí, úspory pr. surovin.....	9
3.6. Kontrola, měření a emisní limity	12
3.7. Výstupní proudy ze spaloven KO, distribuce kovů	15
3.7.1. Spaliny	17
3.7.2. Koncentrace jednotlivých ukazatelů ve spalinách	18
3.7.3. Čištění spalin.....	19
3.7.4. PCDD / PCDF.....	21
3.7.5. Škvára (struska)	23
3.7.6. Popeloviny	24
3.7.7. Železný šrot.....	24
3.7.8. Odpadní voda.....	24
3.7.9. End – produkt (filtrační koláč).....	24
3.8. Energetické využívání odpadu, důvody pro podporu spaloven KO	25
3.9. Výhody a nevýhody spaloven KO	26
3.10. Zelené řasy.....	27
3.10.1. Možnosti využití řas.....	27
3.10.2. Způsoby kultivace.....	29
3.10.3. Sklizeň a izolace řasové kultury	34
3.10.4. Řasy – materiál s vysokým potenciálem.....	35
3.10.5. Řasy a vysoká koncentrace CO ₂	37
3.10.6. Biopaliva	38
3.10.7. Extrakce lipidů z buněk řas.....	43

3.11.	Zelená řasa <i>Chlorella sp.</i>	43
3.11.1.	<i>Chlorella sp.</i> – chemické složení	44
3.11.2.	Výnosy biomasy	46
3.11.3.	<i>Chlorella</i> růstový faktor (CRF).....	46
3.12.	Intenzita energie fotosynteticky aktivního záření (PAR)	47
3.13.	Teplota kultury	49
4.	Materiál a metody	50
4.1.	Vyhodnocení dat	50
4.2.	Úvod do experimentální části	50
4.3.	Popis kultivačního zařízení	51
4.4.	Charakteristika využívaných spalin	53
4.5.	Průběh prací během kultivačního dne	54
4.6.	Přehled sledovaných parametrů, metody	54
4.7.	Dodávání spalinového CO ₂ z bioplynové stanice k bioreaktoru	55
4.8.	Objem suspenze	56
4.9.	Stanovení obsahu sušiny	56
4.10.	Inokulace kultury, dávkování živin	57
5.	Výsledky	59
5.1.	Energie PAR	59
5.2.	Teplota kultury	60
5.3.	Závislost energie PAR a teploty kultury	62
5.4.	Vývoj obsahu sušiny – růst řas	63
5.5.	Optická hustota (OD ₇₅₀)	67
5.6.	Koncentrace rozpuštěného O ₂	68
5.7.	Objem dodávaného CO ₂	70
5.8.	Sycení kultury CO ₂ ve vztahu k hodnotě pH	71
5.9.	Živiny, produktivita	73
5.10.	Celkový objem suspenze	75
6.	Diskuze	76
6.1.	Ekonomika projektu, srovnání	79
7.	Závěr	81
8.	Seznam literatury	82

9. Seznam příloh.....	91
9.1. Přehled grafů, obrázků a tabulek	92
9.2. Fotografie z experimentu	94
9.3. Doplnující grafy, obrázky a tabulky	98
9.4. Fotografie WTE spaloven v různých zemích světa	101

1. Úvod

Každá společnost i jedinec používají určité výrobky, které dříve nebo později přestanou plnit svůj účel a stane se z nich odpad. Ten vznikl i v minulosti, ale samozřejmě v daleko menší míře a byl tvořen jen přírodními složkami. S rostoucím počtem lidí na Zemi a rozvojem společnosti začali lidé produkovat větší množství odpadu rozličnějšího původu a především toxicity pro životní prostředí. Stále se zvyšující množství odpadů začalo být neúnosné.

Spalováním dochází k uvolňování energie, bez které se lidstvo neobešlo v minulosti a neobejde se ani v budoucnosti. Pokud při její výrobě využijeme jinak nevyužitelné odpady, ušetříme primární neobnovitelné zdroje a eliminujeme možnou kontaminaci životního prostředí (průsak toxických látek do podzemních vod či únik skleníkových plynů do ovzduší z nezabezpečené skládky, kde by jinak odpad skončil).

Ochrana životního prostředí a zdraví lidí je prioritou při posuzování vhodnosti způsobů nakládání s odpady. V Evropě se odpad spaluje téměř 150 let. V počátcích bylo cílem prosté hygienické odstranění odpadu. Postupem času vznikla myšlenka zisku energie z na první pohled nepoužitelného materiálu. Odpad se začal materiálově a energeticky využívat.

Česká republika je vázána legislativou Evropské unie, která po členských státech požaduje mimo jiné razantní omezení skládkování a ukládání biologicky rozložitelných materiálů na skládky. Česká republika nemá na tuto změnu systému náhradní způsoby nakládání s odpady o dostatečné kapacitě a závazky tedy neplní. V ČR jsou od konce 90. let minulého století v provozu pouze 3 spalovny komunálního odpadu. Pro srovnání stejný počet se nachází jen na území Vídně. Jednoduchými počty a porovnáním se způsoby nakládání s odpady v dnešní době bude nutné v roce 2020 najít nové kapacity pro přibližně 2 miliony tun již vytríděného směsného komunálního odpadu, který nebude možno odstranit skládkováním. Bude potřebné změnit dlouhodobé předsudky a pohlížet na odpad nejen jako zdroj pro materiálové využití a recyklaci, ale i jako na zdroj energie a upřednostnit ten způsob využití odpadů, který je z pohledu materiálově – energetické bilance výhodnější. Z ekonomického i ekologického hlediska není možné za každou cenu upřednostňovat materiálové zhodnocení, pokud je vznikající výrobek z recyklovatelných odpadů kvalitativně horší nebo pokud na jeho výrobu spotřebujeme více energie než na výrobek z primárních surovin. Dalším pohledem je i rentabilita. Pokud recyklovaný výrobek bude výrazně dražší,

pravděpodobně pro něj budeme těžko hledat odbyt a taková výroba nebude ekonomicky udržitelná.

Faktem je, že všechna zařízení, ve kterých dochází ke spalování, produkuje v nějaké formě toxické látky. Ovšem je nutné si uvědomit, že každá látka může být toxická. Záleží pouze na množství nebo koncentraci (dávce).

Projekt kultivace zelených autotrofních řas je dokladem kvalitní technologie čištění spalin. Jedna z mála možností ryze biologické a environmentálně čisté technologie zpracování CO₂ je právě kultivace zelených autotrofních řas, které jsou schopny transformovat odpadní CO₂ na biomasu využitelnou například jako hodnotné krmivo pro hospodářská zvířata nebo jako surovinu pro farmaceutický či kosmetický průmysl. Možnost kultivace řas, kde zdrojem uhlíku je spalinový CO₂ pro vysoký výnos biomasy, je již ověřený. V současnosti probíhají především pokusy kultivace pro selekci vhodných kmenů řas s vysokým obsahem škrobu a lipidů pro výrobu biopaliv. Tento výzkum je hlavním cílem experimentální části této práce.

Potenciál vyžití řas jako zdroje pro výrobu biopaliv je obrovský. Výnosy řas mnohonásobně převyšují výnosy suchozemských plodin využívaných pro výrobu nynějších biopaliv. Řasy mají výrazně nižší nároky na vodu a jejich kultivace není vázána na úrodnost půdy. Další výhodou je schopnost růstu při vysokých koncentracích CO₂. Využitím řas pro výrobu biopaliv lze vyřešit několik problémů najednou. Dochází k náhradě primárních neobnovitelných surovin a tím ke snížení produkce znečišťujících látek a skleníkových plynů, naopak řasy pro tvorbu biomasy mohou využívat odpadní CO₂ a tím snížit emisní bilanci skleníkových plynů podílejících se na globálním oteplování. Kultivační plochy lze využívat v areálech zdrojů emitujících CO₂, jako jsou právě bioplynové stanice, zařízení na energetické využití odpadů, elektrárny nebo teplárny.

Řasy získávají na významu pro vysoký růstový potenciál, relativně vysoký obsah lipidů, škrobu a živin. Všechny tyto vlastnosti poskytují vynikající zdroj pro biopaliva, jako je především bionafta, bioethanol, případně biometan a biovodík, stejně jako pro řadu dalších hodnotných produktů farmaceutického, kosmetického nebo potravinářského průmyslu.

Každá náhrada primárních surovin by měla splnit 3 základní požadavky. Neměla by být méně kvalitní než původní surovina, energie nutná k zisku by měla být nižší než energie obsažená v náhradě a výroba by měla být ekonomicky srovnatelná s výrobou primární suroviny. Cena biopaliv z řas je v současnosti bohužel několikanásobně dražší ve srovnání s cenou fosilní ropy.

2. Cíle práce

Popis cílů této práce bych rozdělil na literární rešerši a experimentální část.

Cílem literární rešerše bylo seznámení se s nakládáním s komunálním odpadem v České republice a porovnání s ostatními státy světa. Stejně tak i porovnání energetického využití odpadu v celosvětovém měřítku. Dalším cílem bylo popsat výstupní proudy ze zařízení na energetické využití odpadů, jejich charakteristiky a určit možné způsoby využití nebo odstranění.

Dílním cílem experimentální části bylo ověření možnosti kultivace řas, kde zdrojem anorganického uhlíku je oxid uhličitý, který byl dodáván ve formě odpadních spalin z bioplynové stanice Dublovice. Hlavním cílem pokusu, který byl součástí mezinárodního projektu EUREKA ALGANOL, bylo ověření možnosti kultivace vybraného kmene řasy *Chlorella sp.* pro vysoký obsah lipidů a sacharidů s následným využitím pro výrobu biopaliv 3. generace. Tím by došlo k náhradě primárních neobnovitelných surovin a biopaliv 1. generace, vyráběných z běžných zemědělských plodin.

Jako další dílní cíl bych zmínil snahu o změnu pohledu široké veřejnosti na spalovny komunálního odpadu, který je stále velice negativní, což dokazují současné události při plánování výstavby zařízení na energetické využití odpadů v Plzni – Chotíkově nebo v Karviné. Proto si tato práce klade za cíl dokázat, že při porovnání všech kladů a záporů je energetické využití odpadu environmentálně šetrný způsob nakládání s odpady pro životní prostředí i pro člověka samotného. Toho by mělo být dosaženo pomocí popisu provozu takového zařízení a především porovnáním emisních limitů a skutečných emisí produkovaných různými zdroji, např. porovnáním „škodlivosti“ spaloven odpadu a běžných kotlů na tuhá paliva využívaných v domácnostech.

3. Literární rešerše

3.1. Energetické využití odpadu v ČR a dalších státech

Podíl energetického využití komunálního odpadu (dále jen KO) je v jednotlivých zemích velmi rozdílný a jen ovlivňován řadou faktorů jako ekonomický rozvoj, hustota obyvatel, politické záměry či nátlak ekologických skupin. K tomu přistupuje řada specifických místních faktorů, které se stanovují velmi obtížně. Ve spalování tuhého komunálního odpadu s využitím energie, tj. v procesu, který je znám jako Waste – to – Energy (WTE), lze ve světě rozpoznat určité trendy. Celosvětově se WTE provádí zejména ve vyspělých evropských státech, v Japonsku a USA. Skládání nebo prosté spalování zůstává nejběžnější metodou odstranění KO nejen v České republice. V našich spalovnách je v porovnání s dalšími zeměmi Evropské unie energeticky využito stále jen nízké procento odpadu (Bertolini, 2004).

Důvodem, proč ČR zaostává za ostatními státy v podílu energetického využití odpadu, je až do nedávné doby pohlížení na spalovny „skrz prsty“ jako na obrovské znečišťovatele životního prostředí. Plán odpadového hospodářství ČR (POH) z roku 2003 nepodporoval výstavbu nových zařízení na energetické využití odpadu (dále jen ZEVO) z veřejného rozpočtu. Důsledkem jsou v současnosti pouze 3 spalovny KO v ČR s nedostatečnou kapacitou a stále obrovské množství odpadu odstraňovaných skládkováním. Změna pohledu na energetické využití odpadu nastala až s implementací směrnice Evropského parlamentu a Rady ES č. 98/2008 do legislativy ČR. Další „zaostalost“ ČR v oblasti moderních trendů odpadového hospodářství dokazuje zakáz ukládání spalitelných odpadů na skládky v ekonomicky vyspělých státech Evropy s vysokou mírou spalování (Nizozemí, Švýcarsko, Dánsko). Ve Francii může být skládkován pouze nerecyklovatelný a nespalitelný odpad (Anonymus, 2004). Pro srovnání již v roce 1999 bylo ve Francii ve 110 spalovnách odpadu energeticky využito 6,8 mil. tun KO (Bertolini, 2004). V Německu bylo k roku 2010 zase energeticky využito 19 mil. tun KO (Dohnal, 2011). Švýcaři recyklují 51 % KO, zbytek energeticky využívají ve 30 spalovnách KO a od roku 2000 neukládají na skládky žádné spalitelné odpady (Vyšejnová, 2011).

Poncarová (2009) uvádí, že v roce 2008 bylo v ČR energeticky využito 40 kg odpadu v přepočtu na obyvatele, což je v porovnání s ostatními státy velice nízké číslo. Pro srovnání největšího podílu energetického využití odpadu na obyvatele dosahuje Dánsko, a to 400 kg. To je tedy ve srovnání s ČR desetinásobek. V Rakousku se energeticky využije ročně 150 kg odpadu na obyvatele a jen ve Vídni jsou v provozu 3 spalovny KO (Poncarová, 2009). Při využití maximálních kapacit našich 3 spaloven KO lze ročně energeticky využít přibližně 650 tis. tun KO (roční kapacita ZEVO Malešice 310 tis. tun, Termizo Liberec 100 tis. tun a SAKO Brno 240 tis. tun).

První ZEVO bylo postaveno již v roce 1963 ve Vídni ve Flotzersteigu. Mezi tradiční evropské státy, které dlouhodobě využívají majoritní podíl odpadu ve spalovnách jmenujme Dánsko, Nizozemsko, Belgie, Francii a Německo. Mezi asijské velmoci patří Singapur, Taiwan nebo Japonsko (Döing, 2010). Za nejmodernější spalovnu ve střední Evropě je považována WAW (Welser Abfallverwertung) v Horním Rakousku s kapacitou 300 tis. tun ročně a dodávkou energie pro 60 tis. domácností (Cieslar, 2009). Spalovna KO s největší kapacitou na světě se nachází v Amsterdamu. Ročně dokáže energeticky využít až 1,4 mil. tun KO (Cieslar, 2010). Dohnal (2011) uvádí, že v roce 2011 bylo v Evropě v provozu 444 WTE spaloven. Z toho 363 (včetně našich) je sdruženo pod hlavičkou Konfederace evropských spaloven odpadu (CWEP, Confederation of European Waste – to – Energy Plants). V porovnání let 2000 a 2010 došlo k výstavbě a uvedení do provozu dalších 144 jednotek, protože Bertolini (2004) ve svém článku uvádí k roku 2000 v provozu 300 spaloven. V roce 2009 bylo ve Spojených státech 89 WTE spaloven s průměrnou kapacitou 350 tis. tun odpadu ročně (Novák a kol., 2010). Döing (2010) zase uvádí, že v roce 2009 bylo na světě přes 800 WTE spaloven. Dále uvádí, že k velkému rozvoji spalování došlo především ve velkých státech, jako je Čína nebo USA, ve kterých nebylo spalování až do nedávna příliš využíváno. Průměrná kapacita spaloven v celosvětovém měřítku vzrostla ze 160 tis. na 200 tis. tun a předpokládá se další navýšení do roku 2015 díky výstavbě nových moderních spaloven s větší kapacitou na 240 tis. tun ročně.

Ovšem i rozvoj spalování odpadu může přinášet rizika. Příkladem je Čína, kde jsou používané technologie na mnohem nižší úrovni než v tradičních státech. Progres v zavedení nejlepších dostupných technologií (BAT = Best Available Technology) dokládá snížení produkce dioxinů ve spalovnách KO v Německu, kde se v roce 1990 podílely spalovny na produkci PCDD/F z 33 %, v roce 2004 to bylo pouhé 1 % (Stengler, 2005). Dalšími

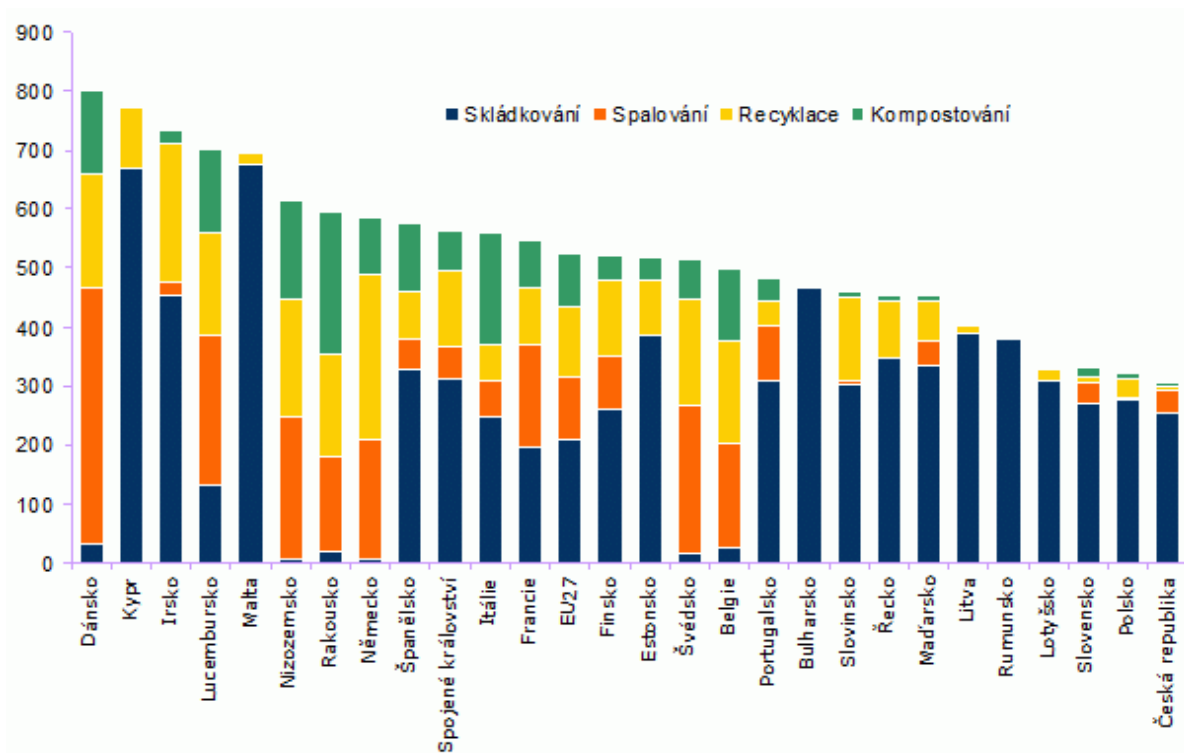
problémy spaloven v Číně je neexistence emisních standardů srovnatelných s těmi v Evropě a malá výhřevnost odpadů, která je přibližně třikrát nižší než by bylo vhodné z důvodu menší produkce polutantů i z hlediska ekonomického (Zafar, 2008).

Jak zmiňuje Stengler (2005), v Evropě je energeticky využito přibližně 50 mil. tun odpadu ročně (20 %), což je v porovnání s 121 mil. tun odpadu ukládaných na skládky stále malé procento, i když se kapacita spaloven od roku 1985 zdvojnásobila. V rámci EU 27 je recyklováno a kompostováno 42 % vzniklých odpadů (Dohnal, 2011). Snaha do budoucna je samozřejmě tento nepříznivý stav změnit podporou energetického využití odpadů. Naše nejstarší spalovna je ZEVO Malešice. Do provozu byla uvedena v roce 1998.

3.2. Odpadové hospodářství ČR v následujících letech

Do roku 2020 bude nutné odklonit od skládkování 2 mil. tun směsného komunálního odpadu SKO (tedy již vyříděného od plastů, skla, biologicky rozložitelného odpadu, papíru či kovů) a zajistit pro něj energetické využití nebo mechanicko – biologickou úpravu (MBÚ) s energetickým využitím vyříděné vysokovýhřevné frakce a uložením zbytku na skládku po biologické stabilizaci. Z těchto 2 mil. tun bude 650 tis. tun využito ve stávajících spalovnách KO. Při předpokládané výstavbě plánovaných spaloven KO v Plzni, Karvině a na Vysočině bude v těchto zařízeních využito přibližně 400 tis. tun odpadu. Další 350 tis. bude využito v ostatních zařízeních na energetické využití odpadů (zplyňování, pyrolýza, anaerobní digesce – bioplynové stanice, spoluspalování v cementárnách). Pokud tedy bereme v potaz i kapacitu zařízení, které ještě ani zdaleka nejsou ve výstavbě, stále zbyde přibližně 650 tis. tun směsného komunálního odpadu, který by podle legislativních normativů EU neměl končit na skládce. Z výše popsané bilance je zřejmé, že ani plánované ZEVO potýkající se s masivním odporem nebudou ani zdaleka dostatečné pro dodržení evropské legislativy.

Problémem je i kalkulace předchozí bilance s množstvím produkovaného KO ve stejné výši jako v roce 2010. Trend produkce KO má ovšem mírně stoupající tendenci. Dalším problémem je, že se počítá s recyklací 50 % vyprodukovaného KO. Tato hodnota je velice optimistická a těžko realizovatelná. V roce 2010 dosáhla recyklace KO hodnoty pouhých 20 % (Řezníček a Procházka, 2010). Dále nejsou do bilancí zahrnuty odpady vznikající při nepředvídatelných přírodních kalamitách. Stále častěji nás postihují např. povodně.



Graf 3.1. Způsoby nakládání s odpady v uvedených státech
(<http://issar.cenia.cz/issar/page.php?id=1612#graf3>)

Podrobná data o nakládání s odpady v rámci EU lze získat např. na stránkách Evropské komise (<http://ec.europa.eu/environment/waste/>).

3.3. Odpad jako obnovitelný zdroj energie

Podpora technologií na využití druhotných surovin a obnovitelných zdrojů, mezi které lze řadit i odpady, je důležitá. Obnovitelné zdroje se u nás podílí na výrobě elektřiny pouhými 7 %. Ze směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2009/28/ES ze dne 23. dubna 2009 o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů, vyplývá pro Evropskou unii jako celek cíl 20 % podílu energie získané z obnovitelných zdrojů a cíl 10 % podílu energie z obnovitelných zdrojů v dopravě. Dle této směrnice jsou pro ČR závazné pouze celkové cíle vztahované k roku 2020. Jedná se o cíl podílu energie z obnovitelných zdrojů na konečné spotřebě energie v České republice ve výši 13 % k roku 2020.

Nový Zákon o podporovaných zdrojích energie lze považovat za průlomový v chápání odpadu jako obnovitelného zdroje energie. Ten poprvé zmiňuje odpad jako obnovitelný zdroj

energie a rozlišuje dvě části KO. Pro biologicky rozložitelnou složku se používá terminologie obnovitelný zdroj energie. Zbylá část („fosilní“) se označuje jako druhotný energetický zdroj (Šťastná, 2011a).

3.4. Energetické využití, spalování odpadu

Energetické využití je využití odpadu pouze za zisku tepla nebo tepla i elektrické energie (kogenerace) při dostatečné účinnosti spalovacího procesu. Prosté spalování je odstranění odpadu bez využití jeho energetického potenciálu. Pojmem trigenerace se označuje výroba tepla, elektřiny a chladu (Dohnal, 2011).

Novelou č. 154/2010 Sb., ze dne 21. května 2010, zákona č. 185/ 2001 Sb., o odpadech byla zavedena rovnice pro výpočet energetické účinnosti (1). Vysvětlení jednotlivých členů rovnice je uvedeno v příloze č. 12 zákona, v platném znění, dostupné např. zde: <http://business.center.cz/business/pravo/zakony/odpady/priloha12.aspx>. Zároveň je určena minimální účinnost 60 %, při které je spalování již považováno za energetické využití odpadu.

$$\text{Energetická účinnost (Eú)} = (E_p - (E_f + E_i)) / (0,97 \times (E_w + E_f)) \quad (1)$$

Tuhé odpady hoří za normálních podmínek bez přídavku dalšího aditiva. Přídavné palivo – zemní plyn se běžně využívá jen při zahájení provozu a po pravidelných odstavkách (za provozu pouze při nestandardních podmínkách, pokud teplota spalování poklesne pod 850 °C)

Kuraš (2008) uvádí podmínky, za kterých lze spalovat odpad bez přídavného paliva.

1. Výhřevnost odpadu vyšší než 5000 MJ.kg⁻¹.
2. Obsah popelovin nižší než 60 %.
3. Obsah vlhkosti nižší než 50 %.
4. Obsah hořlaviny vyšší než 25 %.

3.5. Vliv energetického využití odpadu na životní prostředí, úspory primárních surovin

Ve spalovně Termizo, a.s., Liberec je ročně využito 96 tis. tun komunálního odpadu. Díky tomu je teplem zásobeno 13 tis. domácností a elektřinou 3 tis. domácností (Termizo, 2011).

V říjnu 2010 byla v Malešicích uvedena do provozu kogenerační jednotka vyrábějící společně teplo i elektrickou energii (kogenerace též označována jako KVET – kombinovaná výroba tepla a elektřiny). V Malešicích je po spuštění kogenerační jednotky vyráběno 70 % tepla a 30 % elektřiny, konkrétně 1 tis. TJ tepla a 62 tis. MWh elektřiny, která je dodávána do veřejné sítě Pražské energetiky. Elektřina, která je ve spalovně vyrobena, odpovídá spotřebě přibližně 30 tis. domácností (Poncarová, 2009). Spalovna vyrábí teplo i během letních měsíců. Teplo je v této době využíváno pro přípravu teplé užitkové vody, např. potravinářskými firmami.

Únik znečišťujících látek do ovzduší je ošetřen kombinovaným čištěním spalin s dvoustupňovou pračkou a keramickým katalyzátorem na likvidaci toxických dioxinů. Aktuálně je komínem spalovny do vzduchu vypouštěno asi 245 tis. tun CO₂. Pokud by bylo toto teplo vyrobeno z hnědého uhlí, byla by produkce CO₂ zhruba dvojnásobná (Poncarová, 2009).

Výhřevnost komunálního odpadu není nezanedbatelná. Srovnat ji můžeme s výhřevností hnědého uhlí. Výhřevnost KO se pohybuje nejčastěji v rozmezí 8 – 12 MJ.kg⁻¹ (Poncarová, 2009). Kuraš (2008) naproti tomu uvádí výhřevnost KO v rozmezí 4 – 10 MJ.kg⁻¹. Jedna tuna komunálního odpadu má přibližně stejnou výhřevnost jako 0,65 tun uhlí. Při maximálním využití kapacit našich současných 3 spaloven KO tedy můžeme ročně ušetřit přibližně 400 tis. tun uhlí. Výhřevnost KO se pohybuje ve značně širokém spektru z důvodu různých vlastností a tedy i složení odpadu. Rozdíl je výhřevnost biologického odpadu a plastů. V lokalitách s minimem vytríděných plastů v komunálním odpadu bude výhřevnost KO vyšší. Dle Kuraše (2008) má např. polyetylen (PE) výhřevnost 45 MJ.kg⁻¹, což téměř odpovídá hodnotě výhřevnosti 46,5 MJ.kg⁻¹, udávané Ledererem (2010).

Tab. 3.1. porovnává produkci emisí různých zdrojů pro výrobu energie. Z tabulky je patrné, že lokální topeniště (kamna na tuhá paliva v domácnostech) jsou pro kvalitu ovzduší nejhorším zdrojem vytápění. Následuje vytápění uhlím. Z nejběžnějších zdrojů vytápění má

nejmenší negativní vliv na životní prostředí zemní plyn. Nižší emise SO₂ a NO_x při srovnání se spalovnami KO jsou dány minimálním obsahem dusíku a síry v zemním plynu. Tab. 3.1. potvrzuje minimální produkci škodlivých emisí spalovnami KO, především TZL (prachu), CO nebo PCDD/F.

Palivo	TZL	SO ₂	NO _x	CO	C _x H _y
Černé uhlí	250	500	100	6500	250
Hnědé uhlí	350	230	50	7000	150
Lokální topeniště	2000	800	200	20000	4000
Topný olej	2	130	50	50	12
Zemní plyn	0,1	0,2	35	50	2
Spalovna KO	0,003	2	80	4	0,007

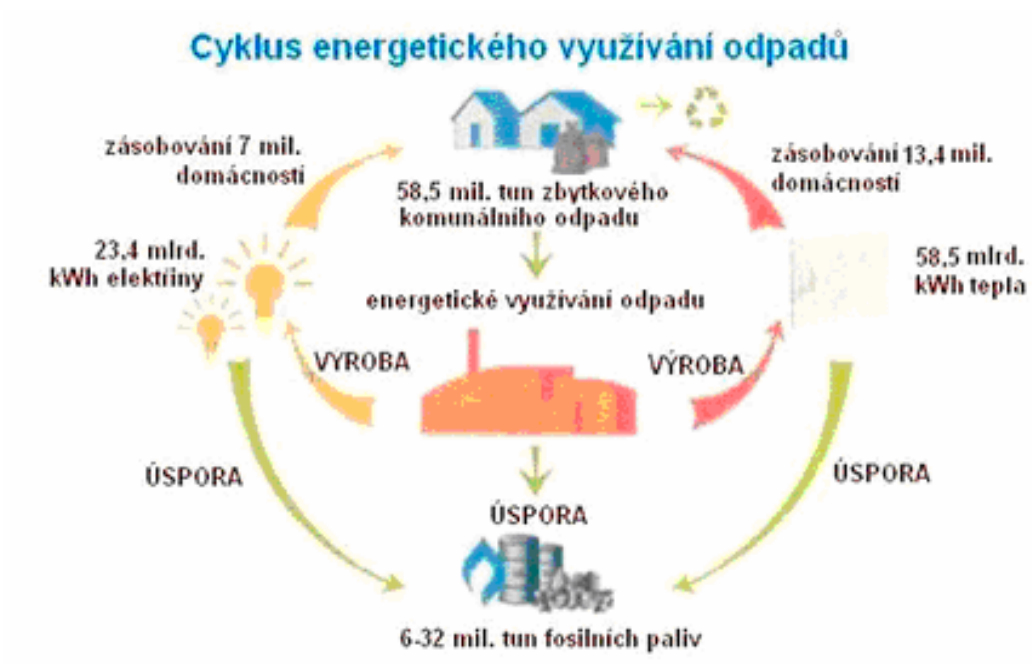
Tab 3.1. Průměrné emise škodlivin ze spalování vybraných paliv (kg.TJ⁻¹) (Straka, 2010)

Mezi výstupní proudy ze spaloven KO lze zařadit i teplo a elektrickou energii. Řezníček a Procházka (2010) uvádějí, že v roce 2006 bylo ve 360 WTE evropských spalovnách energeticky využito 60 mil. tun odpadu, z kterého se získalo:

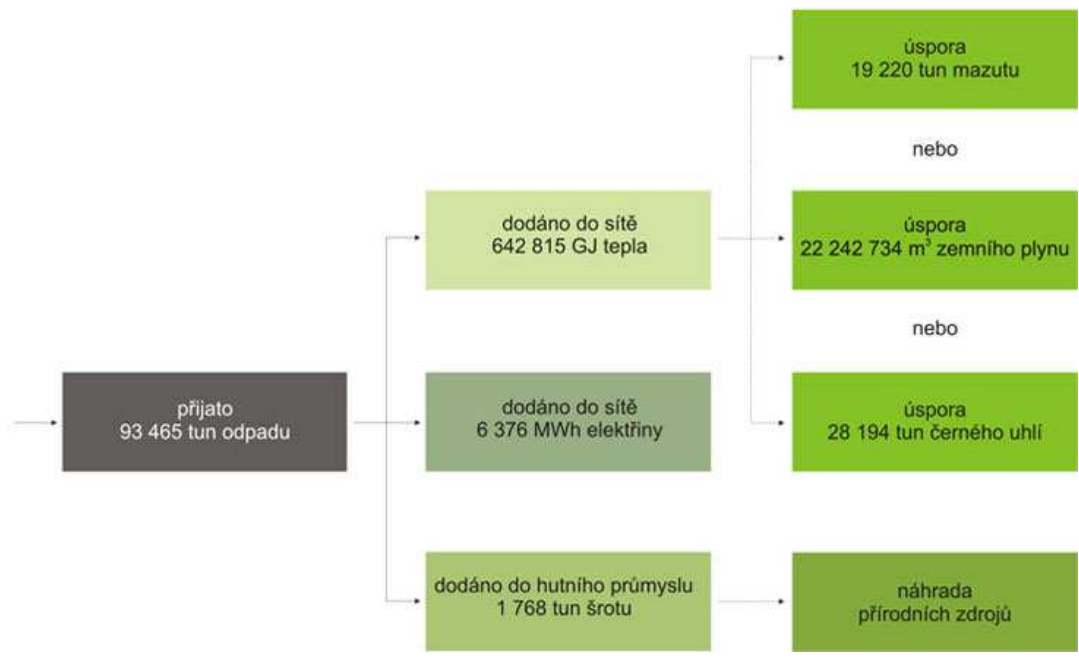
- Teplo pro 13,4 mil. domácností (58,5 mld. kWh).
- Elektrická energie pro 7 mil. domácností (23,4 mld. kWh).

Ve spalovně Termizo, a.s., Liberec je ročně energeticky využito téměř 100 tis. tun KO, z kterého se získá:

- Teplo pro 13,8 tis. domácností.
- Elektrická energie pro 4,5 tis. domácností (9,9 GWh) (Termizo, 2011).



Obr. 3.1. Cyklus energetického využití odpadu v EU, 2006 (<http://odpadjeenergie.cz/vyroba-energie/prepoklady/cyklus-energetickeho-vyuzivani-odpadu.aspx>)

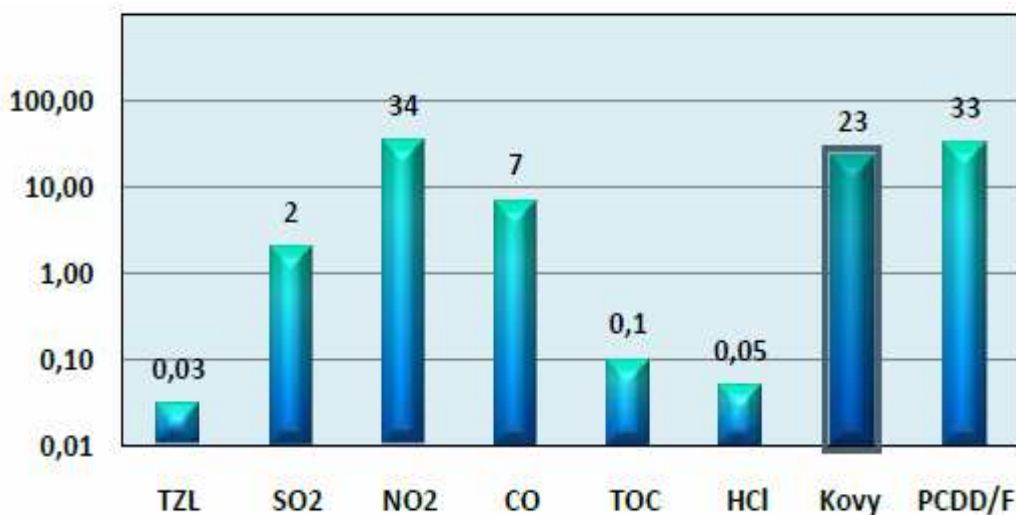


Obr. 3.2. Úspora neobnovitelných zdrojů využitím odpadu ve spalovně Liberec za rok 2005 (<http://www.termizo.mvv.cz/php/index.php?p=34>)

3.6. Kontrola, měření a emisní limity

Důležitým dokumentem regulujícím emisní hodnoty jednotlivých látek na výstupu je Nařízení vlády č. 354/2002 Sb., kterým se stanoví emisní hodnoty (implementovány požadavky směrnice EU č. 76/2000/ES o spalování odpadů).

ZEVO jsou vázána dodržovat velice přísné limity. Tyto limity jsou v řadě ukazatelů mnohonásobně přísnější než pro jiné stacionární zdroje znečištění. Naprosto minimální vliv na znečišťování ovzduší a životní prostředí celkově svědčí fakt, že i přes tyto přísné limity nedochází ani k jejich přiblížení. Pravdivost tohoto tvrzení dokládá graf 3.2., převzatý z Výroční zprávy spalovny KO Termizo, Liberec za rok 2010. Za zdůraznění stojí dva často zmiňované a diskutované parametry – TZL a PCDD/F. Při legislativou stanoveném limitu 10 mg.m^{-3} TZL a reálné produkci 0,03 % limitu, dochází k produkci přibližně 330krát nižším emisím oproti legislativou stanovené hodnotě. Provděpodobně nejdiskutovanějším a nejčastěji zmiňovaným argumentem odpůrců spaloven KO jsou nebezpečné PCDD/F. Limit pro tyto látky byl několikrát snižován až na současných $0,1 \text{ ng TE.m}^{-3}$. Při dosahování 33 % tohoto limitu produkuje Termizo, Liberec trojnásobně nižší emise. Z grafu 3.2. je také patrné největší přiblížení u produkce NO_x a to na 34 % limitu.



Graf 3.2. Složení spalin 2010 (% z limitu) (Termizo, 2011)

Moderní spalovny KO produkují minimální množství škodlivých a znečišťujících látek. Společně s NO_x je to nejvíce CO_2 , NH_3 nebo VOC. Zanedbatelné množství PCDD/F

emitoaných do ovzduší je dáno zavedením moderních technologií, které tyto látky eliminují z 99 % (Novák, 2010).

Jak uvádí Johnke (2000), moderní spalovny KO neprodukují za běžných podmínek žádné emise nejjednoduššího uhlovodíku methanu (CH_4), skleníkového plynu, který je přibližně dvacetkrát agresivnější než CO_2 . Methan by mohl unikat z bunkru při anaerobním rozkladu odpadu. K tomu ovšem nedochází díky podtlakovému systému, který využívá vzduch nasávaný z bunkru pro aerobní podmínky při hoření odpadu v roštových kotlích.

Hodnota emisního limitu závisí na délce období, pro které je koncentrace určována podle průměru. Jiných hodnot dosahují průměrné emisní limity hodinové a denní. Nejčastěji jsou uváděny denní limity (příloha č. 5, nařízení vlády č. 354/2002 Sb.). Pokud dojde k překročení limitu, nařízení vlády č. 354/2002 Sb. (příloha č. 3) stanovuje určitý rozsah, o který je možné limit překročit. Stanovena je také možná četnost těchto překročení.

Parametr	Emisní limit ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Naměřená hodnota ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
TZL	10	0,002
HCl	60	0,03
HF	1	0,4
Oxidy síry jako SO_2	50	4
Oxidy dusíku jako NO_x	200	135
CO	50	12
TOC	10	0,03
NH_3	-	0,25
Hg	0,05	0,027
Cd+Tl	0,05	0,005
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Ni+Mn+V	0,5	0,08
PCDD/F ($\text{ng TE}/\text{m}^3$)	0,1	0,033

Tab. 3.2. Porovnání denních limitů a naměřených hodnot ve spalovně KO, Liberec (Nařízení vlády č. 354/2002 Sb.; Termizo, 2011)

Nařízení vlády č. 354/2002 Sb., § 10 dále vymezuje požadavky na měření hmotnostních koncentrací vybraných látek na výstupu ze spalovny. Během roku dochází k neustálému kontinuálnímu a automatickému měření. Tyto hodnoty jsou okamžitě dostupné obsluze tzv. velína. ZEVO Malešice umožňuje veřejnosti sledovat aktuální dosahované hodnoty na tabuli před vchodem do areálu, jak je vidět z obr. 3.3. Tyto aktuální informace lze též okamžitě

dohledat na stránkách Pražských služeb (<http://www.psas.cz/index.cfm/sluzby-firmam/zarizeni-pro-energeticke-vyuzivani-odpadu/monitoring-emisi/>).

Paragraf 10 dále stanovuje podmínku minimálně dvakrát ročně k jednorázovému měření autorizovanou osobou v intervalech ne kratších než 3 měsíce. Další podmínkou je minimálně jednou za rok kontrola správného měření automatických systémů pro kontinuální měření a jejich kalibrace alespoň jednou za 3 roky.



měřená veličina	limit	emisní hodnota
Oxidy dusíku - NO _x	(200)	158,8 mg.Nm ⁻³
Chlorovodík - HCl	(10)	0,9 mg.Nm ⁻³
Tuhé emise - TZL	(10)	0,9 mg.Nm ⁻³
Oxid uhelnatý - CO	(50)	16,5 mg.Nm ⁻³
Oxid siřičitý - SO ₂	(50)	2,8 mg.Nm ⁻³
Celkový org. uhlík - TOC	(10)	0,7 mg.Nm ⁻³

Informace 16. duben 2010 8:53

Obr. 3.3. Tabule s aktuálními emisními hodnotami před ZEVO Malešice (Vlastní foto, 2010)

Kontinuálně jsou měřeny hmotnostní koncentrace následujících znečišťujících látek: NO_x, CO, TZL, SO₂, TOC, anorganických sloučenin chloru v plynné fázi vyjádřených jako chlorovodík (HCl), anorganických sloučenin fluoru v plynné fázi vyjádřených jako fluorovodík (HF). Dále je kontinuálně měřena teplota spalin, koncentrace O₂ a tlak. Jednorázově jsou měřeny obsahy těžkých kovů v plynné, tuhé i kapalně fázi a PCDD/F.

Pro jednoznačné, přesné a srovnatelné hodnoty s ostatními spalovnami KO, jsou stanoveny přesné referenční hodnoty, při kterých dochází k výpočtu obsahu znečišťujících látek: teplota 273,15 K, tlak 101,32 kPa a obsah kyslíku 11 % (Nařízení vlády č. 354/2002 Sb.).

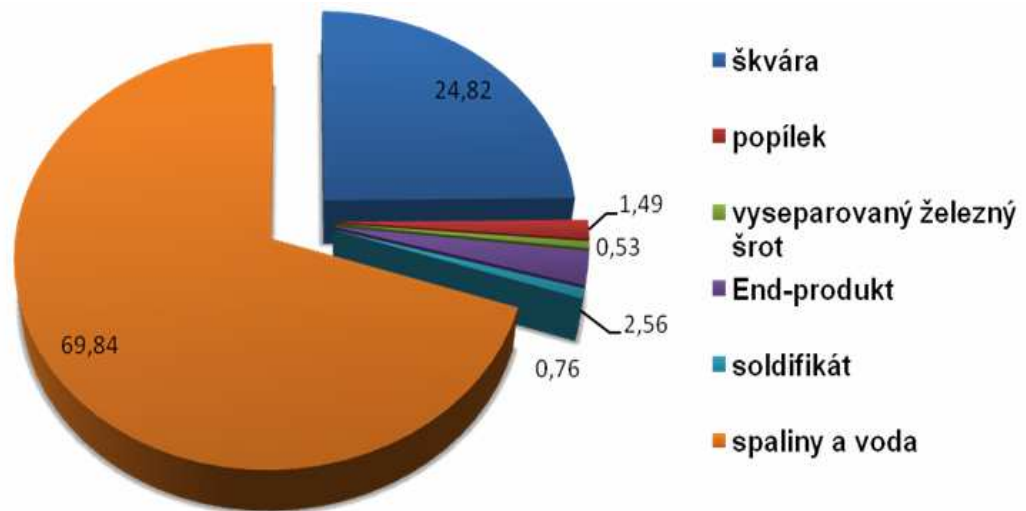
Celkem je monitorováno 91 látek. Z těchto 91 sledovaných látek je 75 emitovaných do ovzduší, ostatní jsou sledovány ve vztahu k vodě a půdě. Dále jsou monitorovány imise, které jsou měřeny v okolí spaloven (Termizo, 2011).

3.7. Výstupní proudy ze spaloven KO, distribuce kovů

Produkty spalovacího procesu jsou plynné a pevné zbytky. Mezi plynné produkty spalování patří spaliny s různým složením v závislosti na složení a vlastnostech spalovaného materiálu a na podmínkách spalovacího procesu. Hlavní podíl pevných produktů tvoří škvára. Dalšími pevnými zbytky jsou popeloviny, End – produkt (také označovaný jako filtrační koláč), odpadní voda a vyseparovaný železný šrot ze strusky.

Karásek (2011) uvádí, že průměrně vznikne z 1 tuny spáleného odpadu:

- 204,6 kg škváry,
- 14,1 kg popílku,
- 30,6 kg End – produktu.



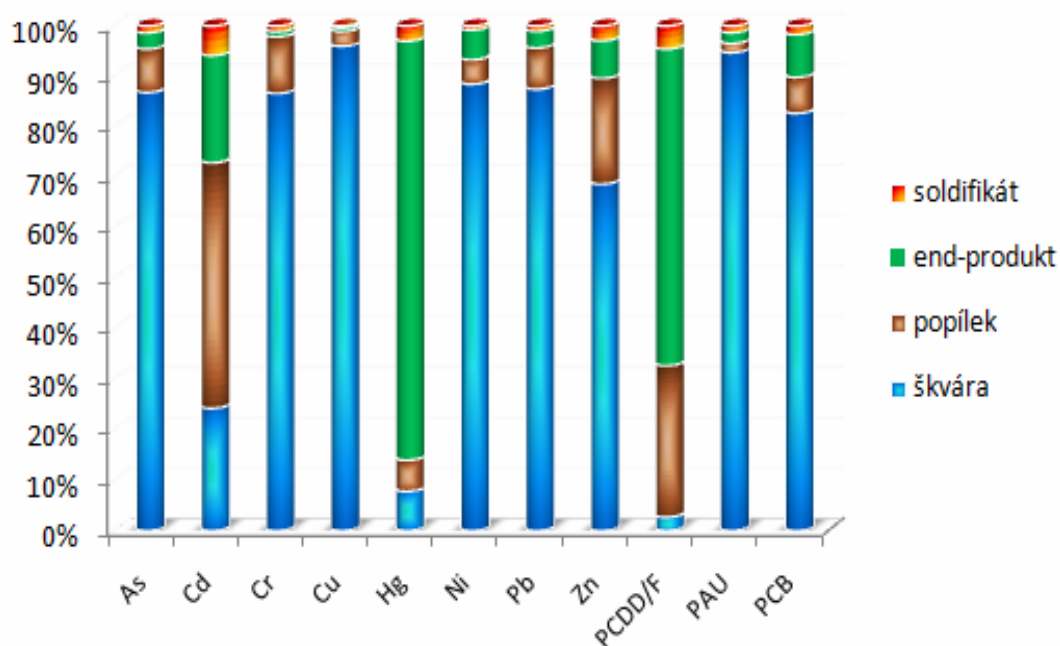
Graf 3.3. Produkty spalování SKO (% hmot.) ve vztahu k množství spáleného odpadu (Peroutka a Suzová, 2009)

	Filtr. koláč	SPRUK	Jiný popel a struska	Popílek	Motor. oleje	Želez. materiály	Sorbent	Obaly	Rozpouštědla
č. odpadu	190105	výrobek	190112	190113	130208	190102 výrobek	150202	150110	140603
Celkem	849	20 415	9 248	95	*	855	3,52	*	0,17

Tab. 3. 3. Výstupní pevné materiály vzniklé spálením 98 tis. tun SKO (Termizo, 2011)

Poznatky o látkovém složení vstupního odpadu jsou velice důležité pro plánování i provoz zařízení, především pro dimenzování a výběr vhodných technologií pro čištění spalin nebo k dalšímu využití škváry. Bogdálek a Moskalík (2008) uvádějí, že dřívější průzkumy ukázaly ekonomickou nevhodnost přímých metod měření látkového složení. Jako efektivní se ukázaly nepřímé analytické metody stanovení složení odpadu z výstupních produktů spalování. Produkty spalování jsou totiž více homogenní a analyticky lépe zpracovatelné. V současnosti je kladen velký zřetel na stanovení obsahů rizikových prvků.

Požadavky pro nakládání s odpady vzniklými při spalování komunálních odpadů jsou upraveny vyhláškou č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, v platném znění. Primárním a hlavním cílem je minimalizace zbytků, pokud jde o jejich množství a toxicitu. Spalováním odpadu dochází ke snížení hmotnosti o 60 – 70 % a objemu o 90 % (Řezníček a Procházka, 2010).



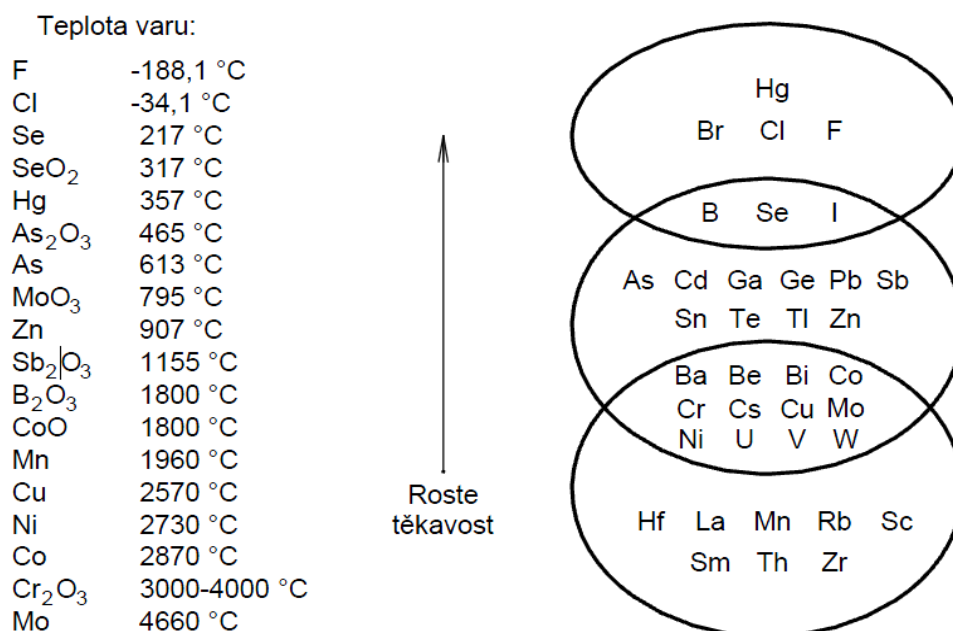
Graf 3.4. Distribuce prvků a látek do výstupních proudů (Bogdálek a Moskalík, 2008)

Složení výstupních proudů ze spaloven je velice závislé na složení a vlastnostech spalovaného odpadu. Například obsah těžkých kovů je závislý na jeho obsahu v původním odpadu. Pro každou látku je typická majoritní distribuce do různých produktů. Peroutka a Suzová (2009) a Sako Brno (2009) popisují typický příklad transferu do rozdílného

produktu u rizikových prvků kadmia a niklu. Jak je vidět z Obr. 4. v příloze 9.3., největší podíl (téměř 50 %) Cd se váže na popílek, s 27 % následuje škvára. Naproti tomu Obr. 5. v příloze 9.3. dokládá, že naprostá většina Ni (92 %) se váže na škváru. Data jsou vztažena na analýzu ze spalovny SAKO Brno provedené v roce 2008 před rekonstrukcí spalovny.

U rizikových prvků a dalších kovů lze pozorovat podobnosti distribuce během spalovacího procesu. Významným faktorem je bod varu jednotlivých prvků. Karásek (2011) rozlišuje následující 3 skupiny prvků podle podobných vlastností.

- Prvky vypařující se během spalování (koncentrují se ve spalinách). Jedná se o Hg, Se.
- Prvky, které jsou částečně těkavé, ale koncentrují se převážně ve škváře. Jedná se o Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Ni.
- Prvky, které se nachází v popílku a částečně ve škváře. Jedná se o Cd, As.



Obr. 3.4. Klasifikace prvků dle chování během spalovacího procesu (Karásek, 2011).

3.7.1. Spaliny

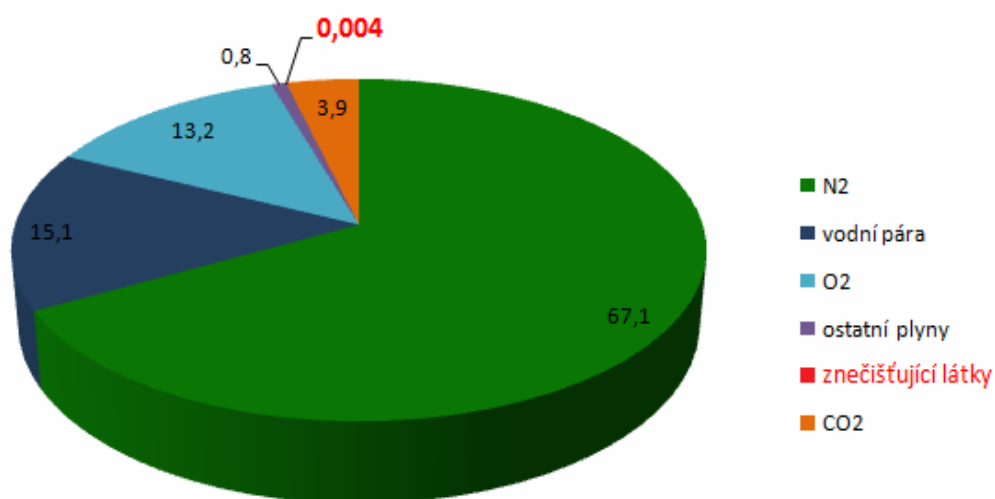
Nejčastějším argumentem proti ZEVO je produkce „toxických“ spalin zamořujících ovzduší, z kterých se nejčastěji hovoří o PCDD/F látkách. Experimentální část práce se zabývá využitím těchto spalin pro kultivaci řas. Proto tedy je vlastnostem spalin a PCDD/F věnován podrobnější popis.

3.7.2. Koncentrace jednotlivých ukazatelů ve spalinách

Kuraš (2008) uvádí, že z jedné tuny energeticky využitého odpadu vznikne 4500 – 6000 m³ spalin.

Při spalování za dostatku vzduchu jsou hlavními složkami spalin vodní pára, CO₂ a O₂. Nevyčištěné spaliny obsahují podle charakteru odpadu další látky jako HCl, HF, HBr, NO_x, SO₂, TZL, PCDD/F a sloučeniny rizikových prvků. Při nedokonalém spalování za nedostatku vzduchu nebo za nízké teploty vzniká větší množství CO (Kuraš, 2008).

Pro zajímavost Zajíček (2010) uvádí, že jen při silvestrovských oslavách vyprodukuje ohňostroji do ovzduší více dioxinů než při provozu našich třech spaloven KO za celý rok. Složení spalin na výstupu je znázorněno na následujícím grafu 3.5. Hlavní složky jsou N₂, O₂ a vodní pára. Znečišťující látky (SO₂, NO_x, CO, PCDD/F atd.) tvoří pouhé čtyři tisícin procenta.



Graf 3.5. Složení spalin (%) na výstupu po vyčištění (Peroutka a Suzová, 2009)

Spalovna Termizo, Liberec disponuje kvalitním čištěním spalin, díky kterému emituje ročně do ovzduší minimální koncentrace znečišťujících látek, např.:

- Snížení emisí prachu na extrémně nízkou hodnotu 1 kg.
- Emise organických látek v množství 17 kg
- Emise chlorovodíku 14 kg.
- Emise oxidů síry 2,3 t (Termizo, 2011).

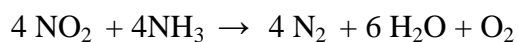
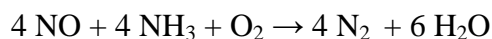
3.7.3. Čištění spalin

Spalovny KO musí dodržovat velmi přísné emisní limity stanovené legislativou. Aby byly tyto limity splněny, probíhá proces čištění spalin ve spalovně Liberec ve čtyřech následujících technologických stupních:

- Redukce oxidů dusíku NO_x
- Zachycení tuhých znečišťujících látek (TZL)
- Katalytický rozklad organických sloučenin, jako PCDD/F
- Čištění anorganických složek spalin

1. Redukce oxidů dusíku

Je realizována při teplotách 900 – 1100 °C přímo ve spalovací komoře. Do spalovací komory je zaveden 25% roztok čpavkové vody (NH₄OH). Redukce probíhá reakcí oxidů dusíku s amoniakem či čpavkovou vodou za vzniku plynného dusíku, vody a kyslíku.



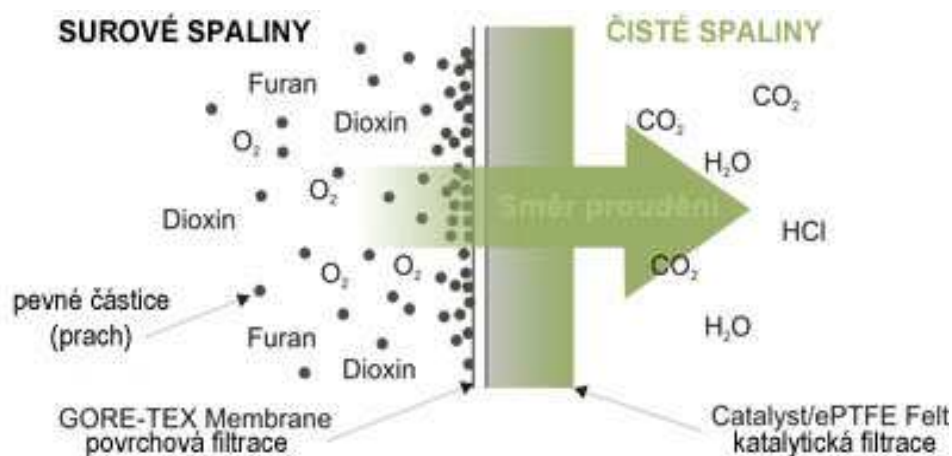
2. Zachycení TZL

Popílek ve spalinách je zachytáván elektrofiltrem na základě rozdílných nábojů na elektrodách a zbytky katalytickým filtrem REMEDIA sloužícím primárně k eliminaci dioxinů. Pro eliminaci nebezpečných vlastností jsou z popílku odstraňovány extrahovatelné soli a rizikové prvky pomocí kyselé vody, pocházející z I. stupně mokrého čištění spalin. Po odstranění těchto látek je popílek dávkován do extrakčních nádrží, kde je při nízkém pH 3,5 vyluhován. Na závěr je odvodněn vakuovým filtračním pásem a následně odveden do sila společně ke strusce (Petr Novák, III. 2010, in verb.).

3. Katalytický rozklad organických sloučenin

Rozklad PCDD/F látek probíhá na katalytickém filtru, kde dochází k oxidaci. Filtr dokáže kromě dioxinů rozložit i další toxické látky obsažené v surových spalinách na složky

tvořící součást atmosféry, jako je HCl, H₂O a CO₂, jak je patrné z následujícího obr. 3.5. K eliminaci dochází ve vrstvě tkaninového filtru s filtrační plochou 1 800 m² (Novák, 2008; Straka, 2010).



Obr. 3.5. Schéma postupu a eliminace spalin na katalytickém filtru (Novák, 2008).

4. Čištění anorganických složek spalin

K eliminaci těchto složek dochází v pračce spalin tzv. „mokrým čištěním spalin“, které se skládá z dalších tří stupňů a to:

I. stupeň – (tzv. QUENCH) dochází k ochlazování horkých spalin vstřikováním vody na teplotu 65 °C. Tato voda nasycuje spaliny a pohlcuje anorganické kyseliny jako HF nebo HCl, zároveň dochází k separaci rizikových prvků (Hg, Pb, Cd, Pb) kondenzací v podobě jejich oxidů.

II. stupeň – v pračce spalin dochází ke styku změkčené vody s NaOH ve směru spalin vzhůru a vody proti směru spalin ze shora dolů. Tím dochází k výměně látek a odstranění oxidů síry ze spalin.

III. stupeň – dochází k odstranění nejmenších částic – aerosolů a prachových částic ze spalin kolmým rozstřikováním vody ke směru proudu spalin. Již vyčištěné spaliny jsou po opuštění tohoto posledního stupně při teplotě 65 °C a vlhkosti 15 – 25 % odvedeny komínem do ovzduší. Při maximálním výkonu vzniká 60 000 m³ spalin za hodinu (Novák, 2008).

3.7.4. PCDD / PCDF

Pod zažitým a neodborným termínem dioxiny se skrývají dvě rozsáhlé skupiny chemických látek: polychlorované dibenzo-p-dioxiny (PCDD) a polychlorované dibenzofurany (PCDF).

Problematikou těchto látek se zabývá samostatný legislativní dokument Nařízení komise EU č. 1259/2011, ze dne 2. prosince 2011, kterým se mění nařízení č. 1881/2006, pokud jde o maximální limity pro dioxiny, PCB s dioxinovým efektem a PCB bez dioxinového efektu v potravinách.

Tyto látky se nacházejí společně ve směsi a každá z nich má jinou hodnotu toxicity. Pro hodnocení celkové toxicity směsi se ovšem uvádí pouze jedna hodnota – tzv. celkový ekvivalent toxicity (TEQ – toxicity equivalent). Pro stanovení hodnoty TEQ je potřeba znát toxicitu jednotlivých kongenerů studované směsi, kterou charakterizuje tzv. toxický ekvivalentní faktor (TEF – toxicity equivalent factor). Někdy se kromě zkratky TEF používá jen TE (toxický ekvivalent, příp. ekvivalent toxicity). TEF porovnává toxicitu jednotlivého kongeneru s nejtoxičtějším dioxinem 2, 3, 7, 8 – tetrachlordibenzo-p-dioxinem (dále jen 2, 3, 7, 8 – TCDD), který klasifikuje mezinárodní organizace IACR od roku 1997 do skupiny 1, jako prokázaný lidský karcinogen a MŽP ČR (n.d.) ho řadí mezi nejtoxičtější látky vůbec. Každý kongener má vlastní hodnotu toxického ekvivalentního faktoru. Tento faktor tedy ukazuje míru toxicity daného kongeneru v porovnání s nejtoxičtějším. Pro 2, 3, 7, 8 – TCDD byla stanovena hodnota TEF = 1. Jelikož se jedná o nejtoxičtější dioxin, všechny ostatní kongenery mají hodnotu TEF menší než 1. Obecně platí, že toxičtější jsou PCDD (nejtoxičtější PCDF dosahuje hodnoty TEF = 0,5 pro 2, 3, 4, 7, 8 – pentachlordibenzofuran) (MŽP ČR, n.d.; Van den Berg, 1998). Celkový TEQ tedy odpovídá součtu jednotlivých TEF vynásobených jejich koncentrací. Jednoduše popsany výpočet TEF faktoru ukazuje vzorec (2), výpočet TEQ faktoru vzorec (3).

$$I - \text{TEF} = \frac{\text{EC}_{50} (2,3,7,8 - \text{TCDD})}{\text{EC}_{50} (\text{hodnoceného kongeneru})} \quad (2)$$

$$\text{TEQ} = \text{TEF} \times \text{koncentrace kongeneru} \quad (3)$$

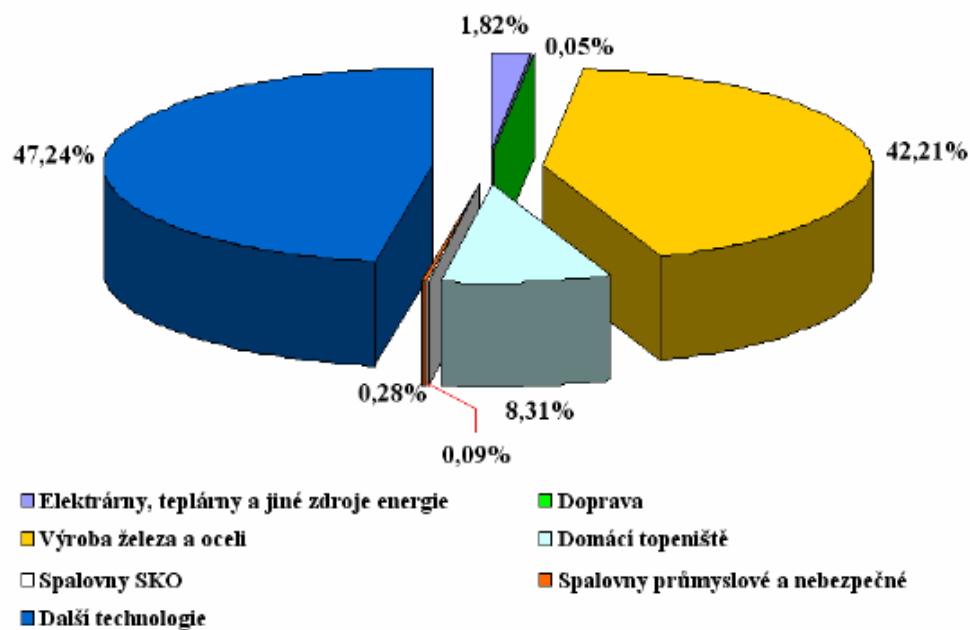
Pro zajímavost neznámý a neověřený zdroj uvádí LD_{50} pro 2, 3, 7, 8 – TCDD = 0, 001 $mg.kg^{-1}$ tělesné hmotnosti člověka. Akutní toxicita je málo pravděpodobná. Daleko nebezpečnější vlastností je schopnost akumulace především do tukové tkáně. Toxický účinek může nastat např. při razantním hubnutí. Ekvivalenty toxicity jsou pro jednotlivé kogenery uvedeny v příloze č. 1, nařízení vlády č. 354/2002 Sb. Ukázka TEF jednotlivých kogenerů je uvedena v příloze 9.3., obr. 2.

Dalším doklad o šetrnosti ZEVO k životnímu prostředí ukazuje následující tab. 3.4. a graf 3.6., z kterých je patrné, že emise PCDD/F ze spaloven KO jsou nesrovnatelné s hlavními znečišťovateli, především železárnami a ocelárnami. Tři české spalovny vyprodukují ročně v součtu cca 90 mg TEQ, což představuje 0,09 % celkové roční produkce (Horák a Hopan, 2009). Zajímavý je i poznatek minimálního vlivu dopravy na celkové emise PCDD/F.

Spalovny odpadů	mg TEQ.rok ⁻¹
Pražské služby, a.s., Malešice	70
Termizo, a.s., Liberec	15
SAKO Brno, a.s.	7,7
Největší producenti PCDD/F	mg TEQ.rok ⁻¹
ArcelorMittal Ostrava, a.s.	21 000
Třinecké železárny, a.s.	19 300
ČEZ, a.s., Elektrárna Dětmarovice	1160

Tab. 3.4. Roční produkce PCDD/F vybraných zdrojů znečišťování v ČR za rok 2007 (Horák a Hopan, 2009)

Horák a Hopan (2009) se ve své publikaci zamýšlejí i na porovnání produkce PCDD/F u spalovny KO a průměrné české vesnice, za kterou uvažují sídlo se 700 domy vytápěnými tuhými palivy. Dle výpočtů publikují, že taková hypotetická vesnice vyprodukuje 11 – 25 mg TEQ ročně. Dle tab. 3.4. by tedy tato jedna vesnice vyprodukovala i více PCDD/F než např. spalovna SAKO v Brně.



Graf 3.6. Antropogenní produkce PCDD/F v ČR za rok 2004 – 174,78 g (Peroutka a Suzová, 2009).

Celková roční produkce dioxinů v ČR je 1 kg. V grafu 3.6. zmíněných 174,78 g vzniká antropogenní činností. Zbýlých 82,5 % vzniká přirozenými přírodními procesy, jako jsou požáry (Zajíček, 2010). Spalovny KO produkují okolo $0,01 \text{ ng TE.m}^{-3}$. Spalovna v Bavorském Schwandorfu produkuje dokonce pouhých $0,0013 \text{ ng TE.m}^{-3}$. Naproti tomu běžný domácí kotel na tuhá paliva produkuje $0,843 \text{ ng TE.m}^{-3}$ (Šťastná, 2011b).

3.7.5. Škvára (struska)

Škvára je pevným výstupním materiálem (produktem), tvořícím jednoznačně největší hmotnostní podíl z pevným výstupů ze spalovny. Tvoří přibližně 22 – 24 % původní hmotnosti odpadu (Peroutka a Suzová, 2009). Typické charakteristiky jsou:

- silikátový materiál bez zápachu s objemovou hmotností 832 kg.m^{-3}
- barva tmavošedá , zrnitost proměnná (Peroutka a Suzová, 2009).

3.7.6. Popeloviny

Pevný výstupní materiál vzniklý zachycením na elektrofiltrech v prvním stupni čištění spalin.

- Barva světlešedá, bez zápachu, sypká konzistence (Peroutka a Suzová, 2009).

Směs vyčištěné škváry a popelovin od rozpustných solí a rizikových prvků je skladována v bunkru škváry a po magnetické separaci železného šrotu se dále využívá jako plnohodnotný materiál ve stavebnictví pod názvem SPRUK (Termizo, 2011; Šťastná, 2011a).

3.7.7. Železný šrot

Odděluje se od škváry magnetickou separací. Ze 100 tis. tun využitého KO vzniká přibližně 1,2 tis. tun železného šrotu dále využitelného jako náhrada za primární suroviny, např. v železárnách a ocelárnách (Termizo, 2011).

3.7.8. Odpadní voda

Odpadní voda obsahuje řadu nebezpečných složek. Vzniká při mokré vypírce spalin a vyluhováním popílku. Tato voda je zachytávána v nádržích, následně jsou přidávány chemikálie jako HCl, vápenné mléko a FeCl_3 . Při pH 9,5 dochází k vyloučení těžkých kovů, které sedimentují na dno sedimentační nádrže v podobě kalu jemných vloček. Již vyčištěná voda ze sedimentačních nádrží je ještě jednou zkontrolována a následně vypuštěna do kanalizace (Novák 2008; Termizo 2011).

3.7.9. End – produkt (filtrační koláč)

Filtrační koláč je konečným produktem čištění spalin. Kal obsahující těžké kovy je propírán a následně odvodněn za vzniku pevného odpadu – tzv. filtračního koláče, který je soldifikován (stabilizován) a odvezen na zabezpečenou skládku nebezpečného odpadu (Novák 2008; Termizo 2011).

Nakládání s výstupními proudy je u spaloven rozdílné. Termizo, a.s., Liberec materiálově využívá 99 % vzniklých produktů. Popeloviny a škvára jsou certifikované jako plnohodnotný stavební materiál díky důslednému čištění a promývání pro zachycení rozpustných solí a rizikových prvků do filtračního koláče. Jedinou výstupní nevyužitou složkou je pochopitelně filtrační koláč, který je soldifikován a odvážen na zabezpečenou skládku nebezpečného odpadu (Termizo, 2011). Naproti tomu ZEVO Malešice separuje pouze železný šrot a popeloviny se škvárou ukládá na skládky, resp. prodává koncernu ASA, který s materiálem dále nakládá (Baloch in verb., 2012).

3.8. Energetické využívání odpadu, důvody pro podporu spaloven KO

Řezníček a Procházka (2010) ve své práci popisují důvody aktuálnosti a potřeby podpory energetického využívání odpadu v České republice.

- Odpad je ideální alternativou primárních neobnovitelných surovin s výhřevností téměř jako hnědé uhlí.
- České republice hrozí reálné sankce při nesnížení množství biologicky rozložitelného komunálního odpadu (BRKO) ukládaného na skládky.
- Česká republika zaostává za vyspělými evropskými státy ve využívání odpadu jako zdroje energie.
- Při odbytové krizi surovin je energetické využívání odpadu řešením pro odpady bez momentální možnosti uplatnění na trhu.
- V době přírodních katastrof je energetické využívání, příp. prosté spalování jedním z okamžitých řešení odstranění odpadu a zabránění možného šíření patogenních organismů.

Odpůrci energetického využívání odpadu argumentují řadou názorů proti těmto technologiím. Na straně druhé neřeší skutečnost, že bez energie se neobejde nikdo z nás. Využitím 1 tuny SKO ušetříme téměř 1 tunu hnědé uhlí, jehož těžba je sama o sobě energeticky náročná. Navíc vytěžením 1 tuny uhlí vzniká 8 – 10 tun skrývky, která se stává odpadem (Řezníček a Procházka, 2010).

3.9. Výhody a nevýhody spaloven KO

Jako každá technologie, v tomto případě způsob nakládání s odpady, má své výhody i nevýhody. Při srovnání všech pro a proti a jejich významu převládají výhody energetického využití odpadu.

Výhody energetického využití odpadu

- Spalovacím procesem získáme z odpadu teplo a elektřinu.
- Spálením nepotřebného odpadu šetříme primární zdroje, které by byly použity pro výrobu energie (spotřebitel nepozná, jestli ho hřeje teplo vyrobené z odpadu nebo z uhlí).
- Využijeme zdánlivě již nepotřebný odpad, který by pravděpodobně skončil na skládce a stal by se potencionálně nebezpečným pro životní prostředí.
- Dochází ke snížení hmotnosti odpadu o 60 – 70 % a objemu o 90 % (Řezníček a Procházka, 2010).
- Spalováním získáme materiál, který lze dále využít ve stavebnictví (SPRUK) nebo např. recyklovat (železný šrot).
- Spalování je šetrný způsob odstranění odpadů k životnímu prostředí.
- Minimální zábor půdy nutné pro výstavbu zařízení v poměru ke kapacitě.

Nevýhody energetického využití odpadu

- Především vysoké náklady na výstavbu a provoz takového zařízení.
- Nutnost existence špičkových technologií (BAT), např. zařízení na čištění spalin, přestavby stávajících zařízení v teplárnách využívající černého uhlí.
- Omezená kapacita spaloven.
- Výstavba jen v lokalitách s vysokou koncentrací obyvatel – dostatek odpadu pro zařízení, dostatek odběratelů tepla a energie.
- Zvýšená doprava v okolí spaloven z důvodu nutnosti svozu odpadu.
- Negativní postoj veřejnosti považující spalovny za „postrach“ pro životní prostředí a zdraví lidí.

3.10. Zelené řasy

K experimentu byly použity zelené řasy *Chlorella sp.* Studium řas se zabývá vědní obor algologie (z latinského *algae* = řasy). V posledních letech se také setkáváme s označením fykologie (z řeckého *phykos* = řasy) (Desertová, 2010). Řasy jsou autotrofní organismy transformující sluneční záření, H₂O a CO₂ na biomasu (Demibras, 2010). Mikroskopické řasy představují velkou skupinu jednoduchých vodních organismů, které využívají energie slunečního záření. Žijí ve slaných a sladkých vodách, ale i na souši, nejčastěji v tropických deštných pralesích nebo symbioticky s houbami v podobě lišejníku (Novák A, 2010). Jsou prokaryotické – sinice (*Cyanophyceae*) i eukaryotické – zelené řasy (*Chlorophyta*), rozsivky (*Bacillariophyceae*) (Cenciani a kol., 2011). Jednobuněčné řasy se volně vznášejí ve vodě jako součást rostlinného planktonu, vícebuněčné často vytvářejí orgány podobné kořenům a stélce vyšších rostlin a žijí přisedle. Pro výrobu biopaliv jsou nejperspektivnější řasy zelené, které obsahují chlorofyl. Další skupiny obsahují jiná fotosyntetická barviva, známe tedy také řasy červené (*Rhodophyceae*) a hnědé (*Phaeophyceae*) (Novák A, 2010).

Druhové spektrum řas je velice rozmanité. Varfolomeev a Wasserman (2011) uvádějí, že je popsáno 50 000 druhů řas, což je v souladu s údajem, který publikují Mata a kol. (2010), kteří dále uvádějí, že největší sbírka řas s 5000 druhy se nachází ve městě Coimbra v Portugalsku. Masojídek a Prášil (2010) odhadují, že se řasy podílí z 50 % na globální primární produkci biomasy. Schopnost přežít řas a rozmnožovat se v širokém spektru podmínek prostředí, se odráží v obrovské rozmanitosti látkového složení buněk, stejně jako v schopnosti upravit metabolismus lipidů a efektivně reagovat na změny životních podmínek (Hu a kol., 2008).

3.10.1. Možnosti využití řas

Hlavními cíli projektu EUREKA ALGANOL, jehož experiment byl součástí této práce, je ověření produkce biomasy z odpadních plynů, kde je zdrojem uhlíku „spalinový“ CO₂ a ověření možnosti využití vypěstované biomasy pro výrobu biopaliv. Využití řas je ovšem daleko rozsáhlejší. Již známé a aplikované je využití v lékařství, kosmetice, potravinářství jako krmivo pro zvířata či jako doplněk stravy lidí. V současnosti nejnámější využití řasy *Chlorella* je výroba tablet jako doplněk stravy. Podstatně nižší požadavky na čistotu produktu

lze předpokládat u krmivářského využití řasové biomasy, přičemž jako nejvhodnější se jeví užití při výkrmu skotu, kde odpadá nutnost desintegrace buněk. Celulózové buněčné obaly řas jsou v hydrolytických procesech v žaludcích skotu snadno rozloženy a obsah buněk může být rychle stravován (Straka a Doucha, 2009; Li a kol., 2008). Díky unikátnímu složení mají řasy velký potenciál dále jako přírodní barviva nebo krmiva díky cenným látkám – vysokému obsahu proteinů, minerálů, vitamínů nebo nízké kalorické hodnotě (Singh a Gu, 2010). Řasy *Arthrospira*, *Chlorella*, *Spirulina* nebo *Dunaliella salina* našly uplatnění v potravinářském průmyslu. Řasy jsou používány přímo v potravinách nebo tabletách. Řasa *Arthrospira* se vyznačuje vynikající potravinářskou hodnotou díky vysokému obsahu proteinů. Použití snižuje krevní tlak a stimuluje rozvoj střevní mikroflóry (*Lactobacillus*). *Chlorella* obsahuje glukán, který snižuje obsah lipidů v krvi. *Chlorella* je dále účinná proti žaludečním vředům a při hojení ran, působí preventivně proti arteroskleróze, hypertenzi a vysokému cholesterolu (Varfolomeev a Wasserman, 2011). *Spirulina platensis* a *Spirulina maxima* jsou oblíbené v lidské spotřebě, protože posilují imunitní systém a pomáhají předcházet infekcím nebo rakovině (Mata a kol., 2010). *Dunaliella salina* se vyznačuje vysokým obsahem karotenu (až 14%). Karoten má antioxidační vlastnosti. Dále obsahuje xanthofyly, které působí také proti rakovině. Proteiny *D. salina* mohou být použity v pekařství, biomasa jako krmivo pro zvířata. Až 30 % veškeré biomasy řas je v současnosti využíváno jako krmné aditivum (Varfolomeev a Wasserman, 2011). *Spirulina*, *Chlorella* a *Scenedesmus* jsou hlavními druhy používanými jako krmivo (Parmar a kol., 2011). Řasové suspenze pro krmné účely mohou být s výhodou využity přímo jako suspenze ve stadiu sklizňové hustoty nad 30 g sušiny v 1 litru suspenze. Tato suspenze není dlouhodobě skladovatelná a předpokládá se její přímé využití v krmné směsi (Straka a Doucha, 2009). *Arthrospira* a *Chlorella* jsou aplikovány v kosmetice. Extrakty jsou přidávány do krémů nebo pleťových masek, dále jsou také použity v opalovacích krémech a šamponech (Varfolomeev a Wasserman, 2011).

Potenciál řas je tedy značný s řadou výhod oproti konvenčním suchozemským rostlinám (Xu a kol., 2009). Řasy jsou nejrychleji rostoucí fotosyntetizující organismy (Mallick a kol., 2012). Vyšší účinnost fotosyntézy oproti suchozemským rostlinám, větší produktivita na jednotku plochy, rychlejší tempo růstu, vyšší schopnost fixace CO₂ a produkce O₂ určuje jejich vysoký potenciál. Komerční využití řas trvá již více než 40 let (Wahal a Viamajala, 2010).

3.10.2. Způsoby kultivace

Výběr správného způsobu kultivace je jeden z hlavních aspektů efektivity procesu (Li a kol., 2008). Masové pěstování v umělých systémech bylo aplikováno v otevřených nádržích v 50. letech 20. století. Jedním z průkopníků v kultivaci řas byl Stanford Research Institute, USA (Demibras, 2010). Mezi průkopníky pěstování *Chlorelly* patří také Japonsko (Smrčka, 2003). Varfolomeev a Wasserman (2011) přímo zdůrazňují, že Japonsko začalo jako první s komerční kultivací právě s řasou *Chlorella*. V současnosti je zaznamenáván rozmach v kultivaci řas ve státech jako je Izrael, Austrálie, Portugalsko (Cenciani a kol., 2011) nebo Taiwan (Feng a kol., 2011). Španělsko se stalo jedním z nejdůležitějších evropských hráčů v kultivaci řas především díky rozmachu od roku 2007 (Oltra, 2011). Velká a známá pěstírna se nachází např. v Alicante. Omezené možnosti kultivace jsou v severských státech. Hlavním limitujícím faktorem je nedostatek světla i v letních měsících a dlouhá zima (Zheng a kol., 2012). Naopak středomořské klima je velice vhodné díky dostatečné teplotě i světelné intenzitě po celý rok. Velký potenciál pro vysoké výnosy je dále v zemích jako je Maroko, Alžírsko, Tunisko, Egypt, Kypr nebo Turecko (Singh a Gu, 2010). První pokusy kultivace řas v bývalém Československu v Košicích jsou datovány k roku 1960. Za průkopníka tohoto odvětví u nás je považován profesor Ivan Šetlík. Výzkum laboratoře v Třeboni, v areálu bývalého Opatovického mlýna, byly založeny v lednu 1960 (Masojídek a Prášil, 2010). V počátcích byly pro kultivaci využívány přírodní neupravené stanoviště jako jezera, rybníky, laguny, či slepá ramena řek.

Existují dva základní systémy kultivace. Produkce řas v otevřených (rybníky a nádrže) nebo uzavřených (fotobioreaktory) systémech (Cenciani a kol., 2011). Venkovní otevřené systémy jsou především méně nákladné, ovšem náchylnější ke kontaminaci. Dlouhodobá produktivita otevřených systémů mimo tropické oblasti je nižší z důvodu omezené délky vegetačního období a především pro nedostatek slunečního záření (Wahal a Viamajala, 2010). Délka vegetačního období pro kultivaci se obecně v našich klimatických podmínkách stanovuje na 150 dní, v oblastech Středomořího moře (např. Řecko) trvá kultivační období přibližně 250 dní (březen – říjen) (Straka a Doucha, 2011). Uzavřené systémy představují technologické problémy, jako je výměna plynů (Demibras, 2010). Kultivace řas je prováděna v mnoha modifikacích reaktorů – otevřené, uzavřené, plošinové, deskové, trubkové atd. Jejich výhodou je kratší perioda sklizně – 2 až 4 týdny (Demibras, 2010).

Otevřené nádrže (rybníky)

Kultivace řas je celosvětově nejčastěji prováděna v otevřených kruhových nebo eliptických nádržích, které jsou nejčastěji postaveny z betonu, příp. z plastu, nazývaných také „raceways ponds“ (Cenciani a kol., 2011). Jednoznačnou nevýhodou ve srovnání s plošinovými fotobioreaktory je tlustá vrstva živného roztoku. V otevřených systémech probíhá kultivace ve vrstvě tlusté 15 – 35 cm (Demibras, 2010; Cenciani a kol., 2011). Vzhledem k omezené prostupnosti slunečního záření do hlubších vrstev dochází u dna nádrže k inhibici fotosyntézy a k omezení celkové produktivity systému. Při stoupající hustotě suspenze se tento problém samozřejmě prohlubuje, protože propustnost slunečního záření je ještě více omezena. Problémem je i náchylnost ke kontaminaci z atmosféry, kterými se zabývají Zheng a kol. (2012). Kontaminace z atmosféry má nejčastěji biotický charakter (bakterie, plísňe, houby, kvasinky, nežádoucí řasy, prvoci, vířníci atd.) (Mata a kol., 2010). Vypařování spolu s nižší hustotou zvyšuje nároky na množství potřebné vody (Xu a kol., 2009).

Otevřené systémy jsou používány např. v Izraeli, USA nebo Číně. Největší pěstírna se nachází ve městě Calipatria v USA.

Při kultivaci řas je nutné neustálé provzdušňování, které je nejčastěji prováděno otočným lopatkovým systémem. Tento způsob je velice náročný na spotřebu energie (Li a kol., 2008). Provzdušňování kultury je důležité pro homogenní distribuci buněk, metabolitů a tepla (Xu a kol., 2009). Homogenizace mícháním též ovlivňuje světelný režim. Mícháním dosáhneme krátkého času, kdy je buňka u stěny vystavena vysoké intenzitě světla. Extrémně vysoká intenzita je stejně jako nízká intenzita nežádoucí. Při dlouhé době setrvání buňky by došlo k jejímu nadměrnému zahřívání a tím k inhibici fotosyntézy, až k poškození (Eriksen, 2008). Bylo zjištěno, že teplota má významný vliv na složení mastných kyselin. Obecně dochází ke zvýšení nenasycenosti s klesající teplotou a rostoucí nasyceností mastných kyselin s rostoucí teplotou (Hu a kol., 2008). U otevřených systémů připadá na 1 m² 150 – 300 l suspenze (Masojídek a kol., 2011).

Pro kultivaci v nádržích jsou vhodné např. druhy *Dunaliella* nebo *Arthrospira*, tolerantní ke kontaminacím (Rodolfi a kol., 2008). Varfolomeev a Wasserman (2011) zase považují za nejvhodnější druhy *Chlorella*, *Dunaliella* a *Spirulina*.



Obr. 3.6. Kultivace řas v oválných otevřených nádržích (Cenciani a kol., 2011)



Obr. 3.7. Kruhové kultivační nádrže, Taiwan

(http://botany.natur.cuni.cz/algo/soubory/biochemie/07_Vyznamne_organismyII.pdf)

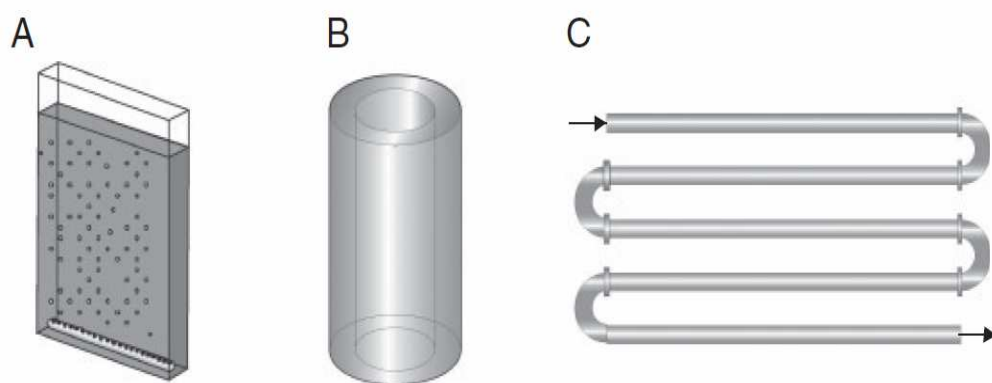
Uzavřené systémy

Tyto systémy se vyznačují malými náklady na výstavbu, snadným provozem a obsluhou. Na druhé straně problémy představuje výměna plynů, usazování buněk řas na stěnách a udržování vhodné teploty suspenze (Dembiras, 2010; M. Amaro a kol., 2011).

Největší evropská pěstírna *Chlorelly* v uzavřených systémech se nachází ve městě Klötze v Německu, kde probíhá kultivace na ploše přes 1 ha s délkou 500 km skleněných trubek (Posten, 2009). Maximální délka trubek není stanovena, mohlo by ovšem

docházet k zvyšování koncentrace O_2 až k toxickým hodnotám (Xu a kol., 2009). Další významné pěstírny se nacházejí např. v Izraeli nebo na Havaji.

Fotobioreaktory vyžadují mnohem menší plochu než rybníky. Produkce biomasy a lipidů je také výrazně vyšší ve srovnání s otevřenými systémy. Cenciani a kol. (2011) počítají, že při roční produkci 100 t biomasy poskytují fotobioreaktory vyšší výnos oleje ($136,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) než rybníky ($99,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$). V otevřených nádržích je dosahováno koncentrace biomasy $0,5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$, fotobioreaktory dosahují až $15 - 50 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ (Wijffels, 2008). Eriksen (2008) uvádí, že v plochých reaktorech je dosahováno koncentrace biomasy až $80 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Pro ekonomickou i technickou proveditelnost je nutné, aby bylo dosaženo alespoň koncentrace biomasy $20 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ (Posten, 2009).



Obr. 3.8. Nejčastější tvary uzavřených fotobioreaktorů (Posten, 2009)

Uzavřené systémy nejčastěji využívají umělý zdroj světla, což může zvyšovat náklady až o 50 %. Na druhé straně prakticky nedochází k odparu vody, což umožňuje kultivaci i ve velice suchých lokalitách s nedostatkem zásob vody (M. Amaro a kol., 2011).

Trubkové uzavřené bioreaktory (PBRs) se skládají z průhledných trubek, nejčastěji z plastu, skla nebo polykarbonátu (Demibras, 2010; Cenciani a kol., 2011). Trubky mohou být vzájemně uspořádány vertikálně, horizontálně, spádově či spirálovitě. Průměr trubek nepřesahuje 0,2 m pro maximální penetraci světla do středu. Větší průměr by znamenal problémy způsobené nehomogenním průnikem světla. V blízkosti reaktoru stěn by byly buňky vystaveny vysoké světelné intenzitě, zatímco centrální části by byly tmavé a docházelo by k inhibici fotosyntézy a produktivity (Eriksen, 2008). Kultura řas cirkuluje v uzavřeném

systemu trubek a sběrných nádrží (Demibras, 2010). Vhodná rychlost proudění suspenze je $0,2 - 0,5 \text{ m.s}^{-1}$. Při rychlostech nad 1 m.s^{-1} by mohlo dojít k poškození buněk (Posten, 2009).



Obr. 3.9. PBRs uzavřené trubkové kultivační systémy (Cenciani a kol., 2011)



Obr. 3.10. Kultivace řas v nádržích o objemu 300 litrů
(<http://www.akvarista.cz/web/clanky/clanek-376>)

Experimentální uzavřené trubkové PBRs systémy se na našem území nacházejí např. v Centru biologických technologií v Nových Hradech (Masojídek a kol., 2009).

Plošinové fotobioreaktory

Plošinový fotobioreaktor je českým patentem treboňského pracoviště (více informací v kapitole 4.4.). V porovnání s otevřenými nádržemi mají hned několik předností. Hustota řas je stonásobná, náklady na provoz jsou čtvrtinové, výnosy dvojnásobné a ve vztahu k jednotce plochy je dosahováno padesátkrát nižšího objemu. Plošinový fotobioreaktor byl úspěšně provozován např. v Austrálii nebo Řecku. Kultivační komplex vyprodukuje z 2000 m² za 150 dní v roce 6 tun sušiny řas (Straka a Doucha, 2009; Doucha a Lívanský, 2009).

3.10.3. Sklizeň a izolace řasové kultury

Dembiras (2010) i Li a kol. (2008) považují sklizeň a izolaci řas ze suspenze za složitý, energeticky i finančně náročný proces, především pro vysoký obsah vody v buňkách řas. Demibras (2010) uvádí, že sklizeň a izolace může představovat až 30 % celkových nákladů. Mata a kol. (2010) zase publikují hodnotu možných nákladů 20 – 30 % a Alabi a kol. (2009) 3,3 – 30 %.

Existuje řada technologických sklizňových postupů, které lze rozdělit do tří kategorií na fyzikální, chemické a biologické. Při hledání nejvhodnějšího způsobu desintegrace buněk je nutno brát v úvahu snadnost desintegrace buněk (pevnost buněčné stěny), ekologické aspekty procesu, stabilitu produktu, snadnost izolace produktu a ekonomiku procesu, včetně spolehlivosti zařízení. S ohledem na tyto aspekty desintegrace lze říct, že buňky jednobuněčných řas *Chlorella* mají kvůli přítomnosti celulózy relativně pevnou buněčnou stěnu, naopak velikost buněk přispívá k snadnější desintegraci (průměr cca 5 mikrometrů). Použití kteréhokoliv ze tří základních způsobů desintegrace by nemělo představovat riziko z hlediska poškození cílového produktu kultivace. Nicméně chemické způsoby desintegrace buněčných obalů jsou založeny na použití agresivních chemikálií (zejména anorganické kyseliny, hydroxidy alkalických kovů) a organických rozpouštědel (Novák a kol., 2011). Mezi používané metody patří centrifugace, flokulace, flotace membránová filtrace, separace ultrazvukem, magnetická separace (Li a kol., 2008; Xu a kol., 2011). Sedimentace je vhodná jen u kmenů s velkými buňkami, jako je *Spirulina spp.* Výhodou filtrace je zachycení i málo rozměrných buněk, nevýhodou časté zanášení a ucpávání filtrů (M. Amaro a kol., 2011). Typickým flokulantem je FeCl₃ (Demibras, 2010). Flokulace vyžadují nízké provozní

náklady, ovšem je časově náročná s rizikem biologického rozkladu produktu (Li a kol., 2008). Flokulanty je nutné pečlivě vybírat pro zamezení jejich případného toxického účinku (Xu a kol., 2011). Ostatní metody separace jsou účinnější, ale i dražší.

Výběr sklizňové metody závisí především na dalším využití produktu, koncentraci biomasy a velikosti buněk (Li a kol., 2008). Xavier Malcata (2011) uvádí, že nejúčinnější je separace tlakem a v mikrovlnné troubě, kde se získává často vyráběný produkt ve formě prášku. Sušení je ovšem energeticky nejnáročnější proces separace (Pokoo – Aikins a kol., 2010).

Vzhledem k vysokému obsahu vody v buňkách řas dochází k separaci nejčastěji v několika fázích (Mata a kol., 2010). V prvním kroku jsou řasy zahušťovány především flokulací do obsahu pevné složky 1 – 5 %. Ve druhém kroku následuje centrifugace, filtrace nebo mikrofiltrace do koncentrace pevné složky 15 – 25 % (Alabi a kol., 2009).



Obr. 3.11. Prášek získaný ze zelených řas
(<http://www.sciencephoto.com/media/434924/enlarge>)

3.10.4. Řasy – materiál s vysokým potenciálem

Pro řasy jsou typické až desetkrát vyšší výnosy než u běžných zemědělských plodin, přičemž nutriční kvalita vypěstované hmoty je mimořádně vysoká. Fotosyntéza, proces, při kterém se spotřebovává CO_2 a produkuje kyslík, probíhá u řas stejně jako u vyšších rostlin,

ovšem účinnost využití světelné energie je podstatně vyšší, a proto je také podstatně vyšší spotřeba CO₂ pro transformaci na biomasu (Straka a Doucha, 2009). Řasy jsou schopny dosáhnout až 10 % účinnosti konverze sluneční energie na chemickou (Posten, 2009). Další předností kultivace řas oproti běžným plodinám je fakt, že kultivaci řas lze provozovat téměř všude, kde je dostatek slunečního svitu. Pěstování řas není limitováno úrodností půdy. Nabízí se tak obrovský potenciál využití v oblastech s neúrodnou půdou, kde není možné pěstování zemědělských plodin (Demibras, 2010). Sklizeň je ve vhodných klimatických lokalitách možno praktikovat kontinuálně během celého roku bez závislosti na sezónnosti, lze vyselektovat kmeny pro výrobu bioethanolu i bionafty, řasy mají mnohonásobně nižší nároky na dodávku živin a především vody (v uzavřeném bioreaktoru je spotřeba vody 1 % ve srovnání s nároky suchozemských plodin), ze všech autotrofních organismů jsou řasy nejvíce rezistentní k extrémně vysokým koncentracím CO₂ a snižují bilanci emitovaného CO₂ (Štěrbá, 2007b, Novák A, 2010). Jelikož existují kmeny řas nejen sladkovodního původu, lze využít potenciálu i mořských řas např. v neúrodném semiaridním až aridním klimatu u pobřeží nebo v místech, kde konvenční zemědělství změnilo ráz mikroklimatu a ze zemědělsky využívaných ploch vzniká „měsíční krajina“ s nedostatkem zásob vody – viz. vysušení Aralského jezera (Li a kol., 2008).

Li a kol. (2008) dále uvádějí, proč výnosy řas mnohonásobně převyšují suchozemské plodiny. Zatímco rostliny dokáží využít jen přibližně 0,5 % dopadajícího slunečního záření, řasy jsou schopny dosahovat až 20 % účinnosti fotosyntézy. Suchozemské rostliny jsou k výrobě kapalných paliv málo vhodné i proto, že podstatnou část jejich těl tvoří stonky či kůra obsahující celulózu a lignin. Ty jsou hůře zpracovatelné a jejich přítomnost prodražuje výrobu biopaliv. Naopak řasy žádná podpůrná pletiva jako stonky nebo kůru nepotřebují, protože se volně vznášejí ve vodě (Novák A, 2010). Rodolfi a kol. (2008) i Singh a Gu (2010) popisují jako další výhodu kultivace řas nepotřebnost chemikálií (pesticidy, herbicidy aj.) nebo hnojiv ke kultivaci.

Na druhé straně nevýhodou kultivace řas je nízká koncentrace biomasy v kultuře pro ideální průnik slunečního záření do celého objemu a malá velikost buněk, což znesnadňuje a prodražuje sklizeň. Společně s vyššími vstupními náklady, nutností intenzivní péče o kultivační proces a potřebou velkokapacitních zařízení brání komerčnímu využití řas pro konverzi na biopaliva (Demibras, 2010; Štěrbá, 2007b; Li a kol., 2008). Další nevýhodou řasových kultivačních technologií je velká investiční a provozní nákladnost spolu s potřebou

velkých ploch. Řasové suspenze je nutno přes noc soustředit v zásobních nádržích, kde musí být trvale provzdušňovány. Kultivační žlaby je nutno každý den po spuštění suspenze umývat a trvale udržovat v čistotě. V našich zeměpisných šířkách je využitelnost řasové technologie nejvýše 150 dní ročně. Omezení kultivace neovlivňuje tolik nízká teplota, jako především nízký osvit fotosynteticky aktivním zářením v zimních měsících (Straka a Doucha, 2011).

3.10.5. Řasy a vysoká koncentrace CO₂

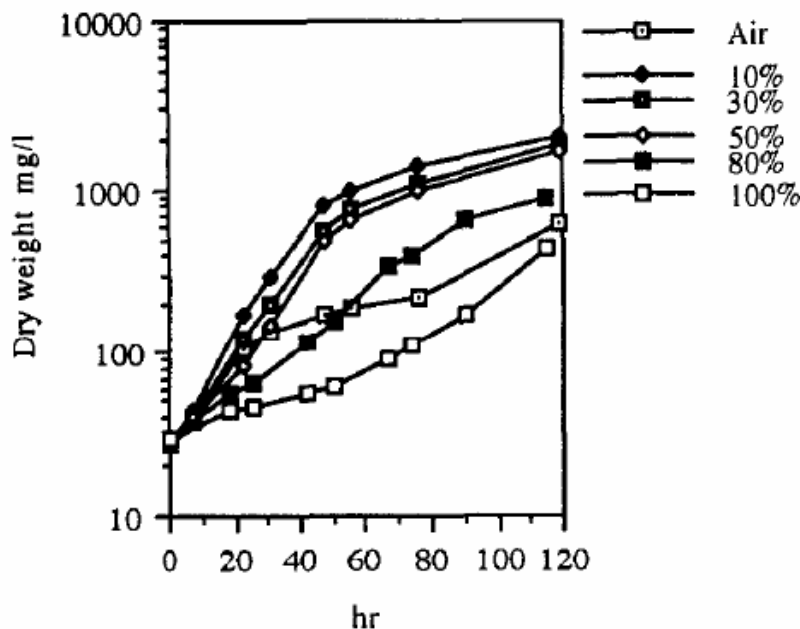
V současnosti probíhá řada studií týkajících se selekce rezistentních kmenů řas vůči vysokému obsahu látek ve spalinách. Jednu z nich provedli Maeda a kol. (1995), kteří uvádějí, že řasy jsou bez omezení tolerantní k obsahu CO₂ do 15 %. Jako nejvhodnější se jeví koncentrace 10 – 15 %, ovšem mnoho kmenů řas je odolných vůči koncentracím vyšším až o desítky procent, kdy dokonce není pozorována ani výrazná inhibice produkce biomasy – např. kmen *Chlorella* sp. T-1. (Maeda a kol., 1995) nebo *Chlorella vulgaris*, *Galdiera partita* a *Chlorococcum littorale* (Varfolomeev a Wasserman, 2011; Mata a kol., 2010).

Závislost produktivity na koncentraci CO₂ je patrná z grafu 3.7. Papazi a kol. (2009) zkoumali vliv koncentrace CO₂ na produktivitu řasy *Chlorella minutissima*. Zjistili maximální produktivitu této řasy při 20 – 40 % koncentraci CO₂. Vyšší koncentrace znamenaly snížení produktivity, ovšem nijak výrazně. Zvyšování koncentrace CO₂ vede ke snižování obsahu bílkovin a chlorofylu (Varfolomeev a Wasserman, 2011). *Chlorella kessleri* a *Scenedesmus obliquus* byly úspěšně použity pro fixaci CO₂ z uhelné elektrárny v Brazílii (Xavier Malcata, 2011). Papazi a kol. (2009) publikují důvod odolnosti řas vůči vysokým koncentracím CO₂. Řasy patří mezi nejstarší organismy z dob, kdy atmosféra obsahovala toxické látky a mnohonásobně vyšší koncentraci CO₂.

Řasy vypěstované na spalinovém CO₂, se neliší svým chemickým složením od řas vypěstovaných za standardních podmínek a splňují kritéria pro použití v krmivářství, ale i v potravinářství nebo kosmetice z hlediska limitů obsahu rizikových prvků i organických látek, zvláště sledovaných POPs (Novák a kol., 2011).

Straka (2010) uvádí, že při fotosyntéze řas platí, že pro biotransformaci CO₂ na 1 kg suché biomasy řas je zapotřebí přibližně 2 kg CO₂, přičemž se v procesu fotosyntézy do atmosféry uvolní přibližně 2,5 kg O₂. Naproti tomu M. Amaro a kol. (2011) uvádějí, že pro transformaci 1 kg biomasy je potřeba 1,83 kg CO₂, podle Lívanského a Douchy (2005) je

potřeba 2,73 kg CO₂. Podle Lívanského a Douchy (2005) odpovídá 1,115 g CO₂ pohlceného kulturou *Chlorella* 1g vyprodukovaného O₂. V článku dále uvádějí, že 80 % dodaného CO₂ je kulturou absorbováno během saturace.



Graf 3.7. Závislost produktivity kultury na koncentraci CO₂ (Maeda a kol., 1995)

3.10.6. Biopaliva

V současnosti se mluví o využití řas především v souvislosti s výrobou biopaliv. Celková světová produkce bionafty byla odhadnuta na 1,8 miliard litrů v roce 2003 (Huang a kol., 2010), což je v rozporu s údajem publikovaným Mata a kol. (2010), kteří odhadují roční světovou produkci biopaliv na 35 bilionů litrů, z kterých dominuje z 82 % bionafta. Alabi a kol. (2009) zase publikují, že v roce 2007 bylo vyrobeno 8 miliard litrů biopaliv.

Lipidy obsažené v buňkách řas mají některé fyzikální a chemické vlastnosti podobné těm z rostlinných olejů, a proto je lze považovat za potenciální surovinu pro výrobu biopaliv (Cenciani a kol., 2011). Výhodou je produkce několika typů biopaliv. Podle výběru vhodného kmene řas a kultivačních podmínek lze z řas získat biodiesel, bioethanol, methan nebo biovodík (Chisti, 2007). Bionafta z řas je obnovitelný zdroj energie, jehož použití nepřispívá ke zvýšení emisí skleníkových plynů v atmosféře, protože jeho výroba a použití představuje

uzavřený cyklus CO₂. Navíc je biologicky odbouratelný, netoxický a neobsahuje síru, benzen a další aromatické sloučeniny (Cenciani a kol., 2011).

První pokusy kultivace řas pro výrobu biopaliv probíhaly v 70. letech 20. stol. (Li a kol., 2008). Tuto problematiku v současnosti řeší řada vědců publikujících mnoho odborných studií a článků. Např. Mallick a kol. (2012) se zabývají studií řasy *Chlorella vulgaris* jako potencionálního zdroje pro výrobu biopaliv. Při optimalizaci podmínek zjistili obsah až 55 % lipidů ve srovnání s původními 7 %. Mallick a kol. (2012) dále uvádějí, že vlastnosti vyrobeného biopaliva (hustota, viskozita, kyselost, výhřevnost, cetanové číslo, obsah vody) jsou srovnatelné s vlastnostmi biopaliv 1. generace a splňují veškeré normy. Výhřevnost biopaliva vyrobeného z *Chlorella vulgaris* (55 % obsah lipidů) je 38,4 MJ.kg⁻¹, což je téměř stejná výhřevnost jako u ropy (Mallick a kol., 2012). Obsah vody je 0,01 %, popela 0,03 % a cetanové číslo 54,7. Cetanové číslo odpovídá americkým (> 47) i evropským (> 51) normám. Řasy mohou obsahovat až 50 % lipidů (Dembiras, 2010). Amagro a kol. (2011) publikují široké rozpětí obsahu oleje v buňkách řas a to mezi 1 – 70 %. Poněkud spektakulární hodnotu obsahu lipidů v rozmezí 1 – 85 % publikují ve své práci Rodolfi a kol. (2008). Cha a kol. (2011) považují hranici pro komerční využitelnost řas obsah lipidů alespoň 20 %.

Nevýhodou kultivace řas s vysokým obsahem lipidů bývá často pomalejší růst těchto kmenů (Amagro a kol., 2011), což je v souladu se závěry prací publikovanými Feng a kol. (2011), Rodolfi a kol. (2008) i Maršálkové a kol. (2010). Mezi řasy s vysokým obsahem lipidů v buňce, ovšem nízkou produktivitou, patří např. *Haematococcus pluvialis* a *Scenedesmus rubescens*. Lipidy těchto řas se skládají z vysoce nenasycených mastných kyselin (např. linoleové), které jsou náchylné k oxidaci během skladování (Cha a kol., 2011). Celkem je známo asi 300 vhodných druhů řas pro výrobu biopaliv. Kompromis mezi dostatečným obsahem lipidů (20 – 30 %) a příznivou rychlostí růstu dosahují *Chlorella*, *Dunaliella*, *Isochrysis*, *Nannochloris*, *Nannochloropsis*, *Neochloris*, *Nitzschia*, *Phaeodactylum* a *Porphyridium* (Xavier Malcata, 2011). Např. Cenciani a kol. (2011) považují za jednu z nevhodnějších řas *Botryococcus braunii*. Hu a kol. (2008) udávají možný obsah lipidů v buňkách *Botryococcus braunii* až 80 %. Novák A. (2010) zase uvádí, že podíl oleje v celé rostlině řepky je pouze několik procent (v samotném semeni ho je okolo 50 %), některé druhy řas obsahují až 60 % tuku z celé své hmotnosti. Dembiras (2010) uvádí, že kultivací řas lze získat z hektaru ročně 48 000 – 308 000 litrů oleje. Singh a Gu (2010) zase

publikují, že z 1 tuny řas lze získat 200 litrů oleje. Naproti tomu Štěrbá (2007b) uvádí, že z 1 ha následujících plodin lze získat 2500 litrů bioethanolu z kukuřice, 560 litrů bionafty ze sojových bobů, až 45 000 litrů biopaliv z řas. Tyto hodnoty se prakticky shodují s hodnotami, které publikují Mallick a kol. (2012). Štěrbá (2007a) v dalším článku uvádí, že ročně lze z 1 km² získat 600 m³ bionafty vyrobené z palmového oleje, naproti tomu 10 000 – 20 000 m³ bionafty z řas. Feng a kol. (2011) publikují výsledky zkoumáním produktivity lipidů u řasy *Chlorella zofingiensis* v mg lipidů v 1 litru suspenze za den. Během pokusu zjistili produktivitu lipidů 6,3 – 22,3 mg.l⁻¹.d⁻¹.

Plant source	Seed oil content (% oil by wt in biomass)	Oil yield (L oil/ha year)	Land use (m ² year/kg biodiesel)	Biodiesel productivity (kg biodiesel/ha year)
Corn/Maize (<i>Zea mays</i> L.)	44	172	66	152
Hemp (<i>Cannabis sativa</i> L.)	33	363	31	321
Soybean (<i>Glycine max</i> L.)	18	636	18	562
Jatropha (<i>Jatropha curcas</i> L.)	28	741	15	656
Camelina (<i>Camelina sativa</i> L.)	42	915	12	809
Canola/Rapeseed (<i>Brassica napus</i> L.)	41	974	12	862
Sunflower (<i>Helianthus annuus</i> L.)	40	1070	11	946
Castor (<i>Ricinus communis</i>)	48	1307	9	1156
Palm oil (<i>Elaeis guineensis</i>)	36	5366	2	4747
Microalgae (low oil content)	30	58,700	0.2	51,927
Microalgae (medium oil content)	50	97,800	0.1	86,515
Microalgae (high oil content)	70	136,900	0.1	121,104

Tab. 3.5. Výnosy lipidů plodin a řas (Mata a kol., 2010)

První pokusy týkající se produkce řas pro získání lipidů probíhaly v 80. letech minulého století (Demibras, 2010). Amagro a kol. (2011) vidí především v budoucnu výhodu řas kultivovaných v mořských či brakických vodách z důvodu zvyšujícího se nedostatku zásob pitné vody pro potřeby lidstva i komerčního masového pěstování řas pro výrobu biopaliv. Huang a kol. (2010) uvádějí řasu *Dunaliella* jako příklad řasy tolerující vysokou salinitu a tedy vhodnou ke kultivaci ve slané vodě. Na výrobě biopaliv z řas se nejvíce podílejí společnosti v Americe (78 % produkce) a v Evropě (13 %) (Singh a Gu, 2010).

Současné dělení biopaliv na 3 generace je známé, proto si je shrňme jen obecně. V současnosti se vyrábí prakticky jen biopaliva 1. generace z běžných zemědělských plodin. Bioethanol je v Evropě vyráběn především z cukrové řepy (*Beta vulgaris*) nebo z obilnin. V Americe dominuje výroba z kukuřice, resp. cukrové třtiny (*Saccharum officinarum*). Největším producentem bioethanolu je Brazílie (Demibras, 2010). Bionafta se získává transesterifikací olejů získaných z olejin. (M. Amaro a kol., 2011). Ve srovnání s jinými

termochemickými procesy používanými k přeměně biomasy na kapalná paliva, jako je např. pyrolýza, zplynování nebo Fischer – Tropsch syntéza, transesterifikace vyžaduje nižší energii a nižší ekonomické náklady na transformaci rostlinných olejů na bionaftu (Cenciani a kol., 2011). V Evropě dominuje výroba z řepky olejky, v Americe ze sojových bobů (Chisti, 2007). Dalším zdrojem pro výrobu bionafty může být palmový olej. Biodiesel se skládá z 90 – 98 % z triglyceridů. Zbytek tvoří mono- a diglyceridy, volné mastné kyseliny, fosfolipidy, karotenidy, sloučeniny síry a voda (M. Amaro a kol., 2011).

Bioethanol se získává biochemickou cestou – fermentací, příp. termochemicky – zplyňováním. Na kvašení cukrů se podílejí kvasinky (např. *Saccharomyces uvarum*, *Saccharomyces cerevisiae*). Kvašení probíhá za anaerobních podmínek za vzniku alkoholu (ethanolu), H₂O a CO₂. Sing a Gu (2010) uvádějí, že podle stechiometrického poměru vznikne z 1 kg glukózy 0,49 kg CO₂ a 0,51 ethanolu. Vzniklý CO₂ může být zpětně využíván pro další kultivaci řas.

Názory na biopaliva , především 1. generace, jsou různé a byla o nich publikována řada studií a článků. Např. Tohill (2011) píše o naději v alespoň částečnou náhradu ropy a její závislosti Ameriky na dovozu. Popisuje v dnešní době stále aktuálnější negativní postoj k výrobě biopaliv 1. generace z běžných zemědělských plodin. Zdůrazňuje často zmiňovanou kolizi ve využívání plodin pro výrobu biopaliv se současnou výrobou potravin. Tohill (2011) si je ale vědom, že přírodní materiály (biopaliva) nemohou zcela nahradit ropu. Biopaliva 2. generace jsou vyráběna ze zemědělských a lesních zbytků, které by byly považovány za odpad či vedlejší produkt. Biopaliva 3. generace zahrnují právě řasy. M. Amaro a kol. (2011) uvádí, že pouhá výroba biopaliv 1. generace spotřebuje 50 % energie obsažené ve využívaných plodinách.

Dále je důležité si uvědomit, že pokud produkujeme bioaliva vyrobená z řas s obsahem 50 % lipidů, stále zůstává 50 % materiálu k dalšímu možnému využití a zhodnocení především jako krmivo bohaté na bílkoviny pro hospodářská zvířata (Mallick a kol., 2012). Zbytkovou biomasu lze také podrobit fermentačnímu procesu pro získání energie v podobě bioplynu. Cena takového zbytkového materiálu se pohybuje v rozmezí 800 – 2500 dolarů za 1 tunu (M. Amaro a kol., 2011), což naprosto souhlasí s cenou udávanou Sing a Gu (2010). Z řas lze tedy získat energii nejen ve formě biopaliv (Varfolomeev a Wasserman, 2011).

	Řasa	Obsah lipidů (%)	Produktivita lipidů (mg.l ⁻¹ .d ⁻¹)
Sladkovodní	<i>Chaetoceros muelleri</i>	33,6	21,8
	<i>Chlorella emersonii</i>	25 – 63	10,3 – 50
	<i>Chlorella protothecoides</i>	14,6 – 57,8	1214
	<i>Chlorella vulgaris</i>	5 – 58	11,2 – 40
	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	2	–
	<i>Chlorella sp.</i>	18 – 57	18,7
	<i>Chlorococcum sp.</i>	19,3	53,7
	<i>Elipsoidion sp.</i>	27,4	47,3
	<i>Haematococcus pluvialis</i>	25	–
	<i>Scenedesmus sp.</i>	19,6 – 21,1	40,8 – 53,9
Mořská	<i>Dunaliella salina</i>	6 – 25	116
	<i>Dunaliella primolecta</i>	23,1	–
	<i>Isochrysis galbana</i>	7 – 40	33,5
	<i>Isochrysis sp.</i>	7,1 – 33	37,8
	<i>Nannochloris sp.</i>	20 – 56	60,9 – 76,5
	<i>Nannochloropsis oculata</i>	22,7 – 29,7	84 – 142
	<i>Nannochloropsis sp.</i>	12 – 53	60,9 – 76,5
	<i>Neochloris oleoabundans</i>	29 – 65	90 – 134
	<i>Pavlova salina</i>	30,9	49,4
	<i>Pavlova lutheri</i>	35,5	40,2
	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	18 – 57	44,8

Tab. 3.6. Obsah a výnos lipidů vybraných kmenů řas (M. Amaro a kol., 2011)

3.10.7. Extrakce lipidů z buněk řas

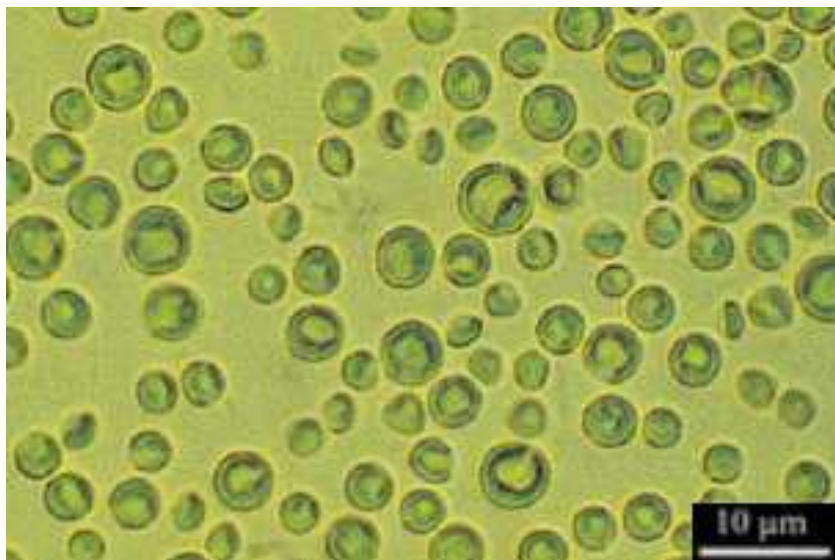
Typickou metodou extrakce olejů je lisování s účinností 75 %. Další metodou je extrakce rozpouštědlem (hexan, aceton, chloroform). Rozpouštědlo má hlavní funkci rozrušit buněčnou stěnu. Fluidní extrakce je další běžně využívanou metodou. Výhodou je krátký čas extrakce díky vysokému tlaku a teplotě (cca 600 barů, 50 °C). Další metodou je destrukce buněčné stěny ultrazvukem s účinností nad 90 %. Rázová vlna rozruší stěnu a uvolní složky buňky do roztoku (M. Amaro a kol., 2011).

3.11. Zelená řasa *Chlorella sp.*

Důvody využití právě zelených řas pro kultivaci na odpadním CO₂ uvádí např. Straka (2010). Vzhledem k vysokému obsahu CO₂ (cca 11 % obj., což je asi 300krát více než ve vzduchu) se pro využití odpadního CO₂ nabízí fotosyntéza. Ovšem jediné organismy s vysokým produkčním potenciálem a rezistencí k vysokým obsahům CO₂ jsou právě řasy. Sladkovodní řasa *Chlorella sp.* byla vybrána jako nejvhodnější pro kultivaci v experimentu. Kmen se vyznačuje vysokou růstovou rychlostí, tolerancí vůči vysoké koncentraci CO₂, vhodným chemickým složením řasové buňky pro další využití, vysokým obsahem chlorofylu a relativně snadnou technikou kultivace. Vysoké koncentrace látek obsažených ve spalinách ze spaloven komunálního odpadu, bioplynových stanic ani uhelných elektráren nepředstavují pro tuto řasu žádný inhibiční faktor. Pokoo – Aikins a kol. (2010) potvrzují vhodnost kmene *Chlorella* pro kultivaci na spalinách. Celkově je známo několik desítek kmenů řas *Chlorella* (Straka a Doucha, 2009; Straka 2010).

Název *Chlorella* je řeckolatinského původu a je odvozeno z řeckého slova “*chloros*“ = zelený a latinské zdrobňující přípony “*ella*”. Český ekvivalent pro název *Chlorella* je tedy zelenivka. Je to rod jednobuněčných zelených řas patřící do oddělení *Chlorophyta*. Buňky jsou samostatné, nejčastěji kulovitého tvaru o velikosti 2 až 10 μm v průměru. Při mikroskopickém pozorování uvidíme většinou kulovitý tvar buňky, laločnatý chloroplast a hladkou buněčnou stěnu (Nakahara a kol., 2003; Luo, 2006). Zástupce rodu *Chlorella* nejčastěji najdeme v půdě a ve sladkých vodách, mohou však být i endosymbionty hub, prvoků a bezobratlých. Životní cyklus je jednoduchý. Dospělá buňka se rozdělí na 4 – 8

buňek dceřinných. K zdvojnásobení hmotnosti buněk může dojít již za 3 – 6 hodin, což dokládá vysoký růstový potenciál a vysokou produktivitu (Smrčka, 2003).



Obr 3.12. Buňky řasy *Chlorella vulgaris* (Doucha a Lívanský, 2009)

3.11.1. *Chlorella sp.* – chemické složení

Až 60 % hmotnosti tvoří bílkoviny, obsahující ve vyváženém poměru všechny esenciální aminokyseliny. Sacharidy, nejčastěji škrob, tvoří asi 20 % suché hmoty řas a lipidy 15 % (Straka, 2010). Ovšem řasa *Chlorella* může obsahovat až 65 % lipidů (Feng a kol., 2011). Kromě obsahu 3 – 5 % chlorofylu, zeleného barviva s vysokým obsahem hořčíku, obsahuje *Chlorella* až 1 % karotenoidů. Důležitou složkou buňky jsou biologicky vázané a dobře využitelné minerální látky a stopové prvky, důležité pro průběh biochemických procesů organismu příjemce. Další látky, které obsahuje *Chlorella* významně více než jiné rostliny, jsou vitamíny (Straka, 2010). Dalšími cennými látkami jsou pigmenty a antioxidanty (Singh a Gu, 2010). Složení konkrétně *Chlorella sp.*, která byla k experimentu využita, popisují i Novák a kol., (2009). Biomasa řasy *Chlorella sp.* je cenným zdrojem bílkovin (podle kultivačních podmínek 20 – 60 % hm. sušiny), polysacharidů – škrobu (podle kultivačních podmínek 20 – 70 % hm. sušiny), vitamínů a minerálů (cca 10 % hm. sušiny), lipidů (až 20 % hm. sušiny), včetně polynenasycených mastných kyselin, karotenoidů – velmi účinných antioxidantů (cca 0,5 % hm. sušiny) a vlákniny (cca 5 % hm sušiny), které se uplatňují nejen

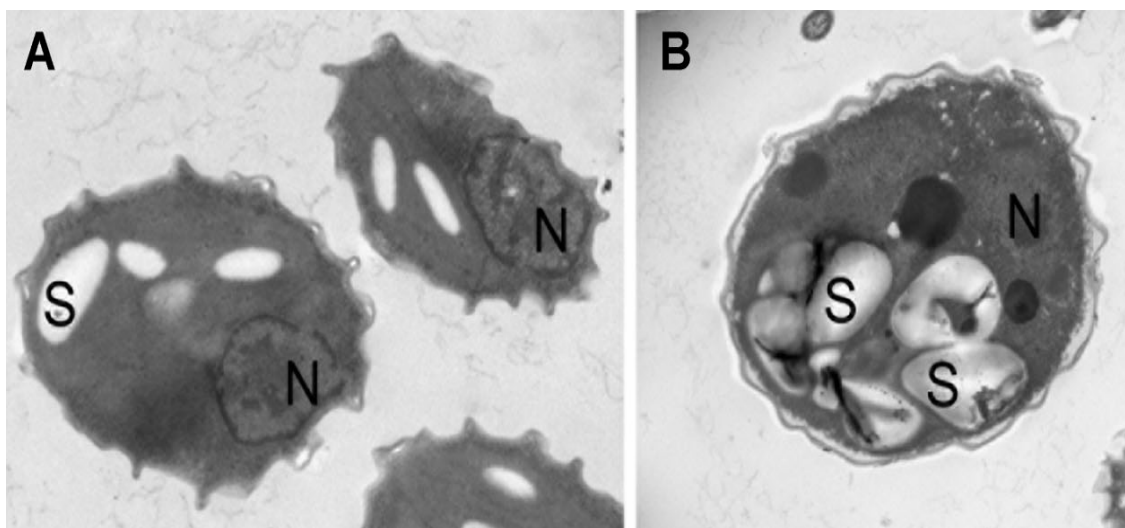
ve výživě lidí a zvířat, ale i ve farmacii a kosmetice. Složení lipidů *Chlorella vulgaris* popisuje Mallick a kol. (2012), kteří publikují, že dominují nasycené mastné kyseliny nad nenasycenými. Z nasycených mastných kyselin je hlavní složkou kyselina palmitová a stearová. Hlavní nenasycenou mastnou kyselinou je linolová. Vyšší podíl nenasycených mastných kyselin snižuje cetanové číslo bionafty (Cha a kol., 2011). Zelené řasy obsahují i prospěšné tzv. omega – 3 – mastné kyseliny, které se nachází např. v rybách (Singh a Gu, 2010).

	obsah v sušině (% hm.)		obsahy v sušině (g.kg ⁻¹)
Proteiny	55 – 58	Ca	2,3
Sacharidy	16 – 20	P	10,0
Lipidy	8 – 12	Mg	3,5
Popeloviny	6 – 8	Fe	0,7
Chlorofyl	2 – 4	Mn	0,14
Nukleové kyseliny	3 – 4	K	15,0
		N	85,0

Tab. 3.7. Složení řasové biomasy – majoritní složky; prvky v sušině (Straka a Doucha, 2009)

		Obsahy v sušině (mg.kg ⁻¹)
karotenoidy		3 500
z toho	β – karoten	1 050
	B – vitamíny (B1, B2, B6, B12)	90
	C – vitamín	650
	E - vitamín	42

Tab. 3.8. Složení řasové biomasy – minoritní složky



Obr. 3.13. Foto z elektronového mikroskopu dceřinné buňky *Chlorella* (A) a původní (B); N – jádro, S – škrobová zrna (Brányiková a kol., 2011)

3.11.2. Výnosy biomasy

V našich podmínkách mírného klimatu se výnosy biomasy *Chlorelly* pohybují v přepočtu na plochu 1 ha v rozmezí 25 – 30 tun suché hmoty řas za kultivační sezónu (asi 150 dní). V podmínkách klimatu, ve kterém je kultivační sezóna delší (např. Řecko), lze očekávat výnosy v rozmezí 80 – 100 tun. Pro srovnání výnos pšenice u nás je kolem 5 t, brambor 30 t, cukrovky 50 t, píce 7 t. Při výnosu 100 tun a obsahu škrobu 50 % lze získat 50 t škrobu pro výrobu 25 000 – 30 000 l bioethanolu oproti 2000 l bioethanolu získaného z 1 ha kukuřice (Doucha a Lívanský, 2009; Straka a Doucha, 2009).

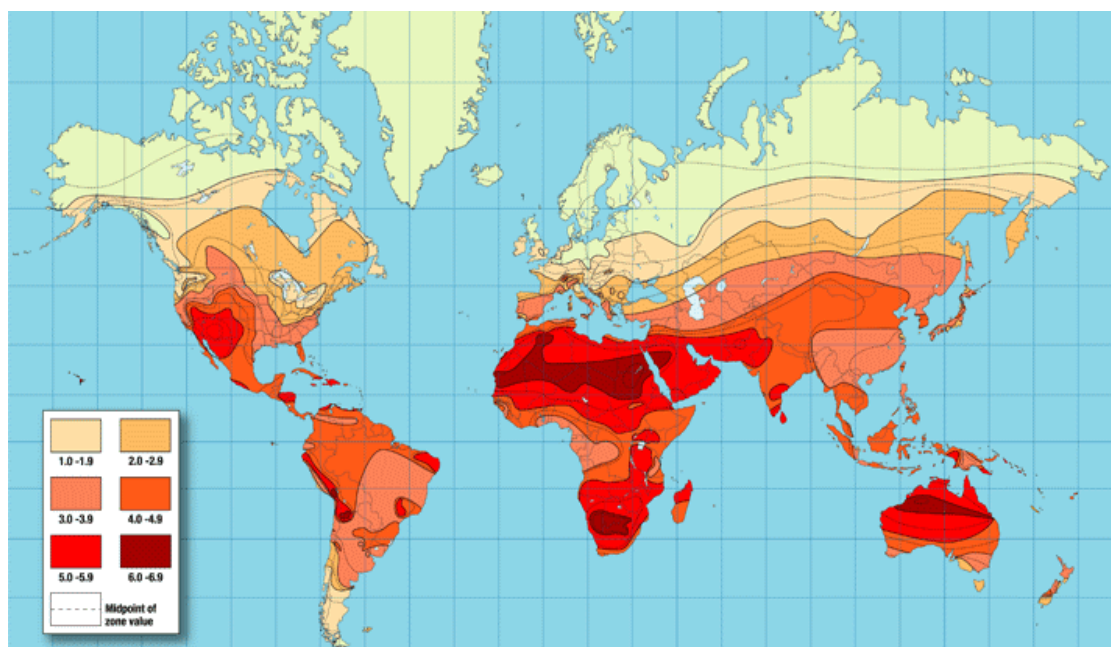
3.11.3. *Chlorella* růstový faktor (CRF)

Řasa *Chlorella* se vyznačuje tzv. *Chlorella* růstovým faktorem (CRF) známým také pod zkratkou CGF (z angl. *Chlorella* Growth Factor). Připravuje se z vodného extraktu buněk a má velmi komplexní složení. CRF faktoru je připisováno mnoho funkcí v organismu, např. omezení volných radikálů, snížení obsahu krevních lipidů, podpora celkové obranyschopnosti organismu (Novák a kol., 2009).

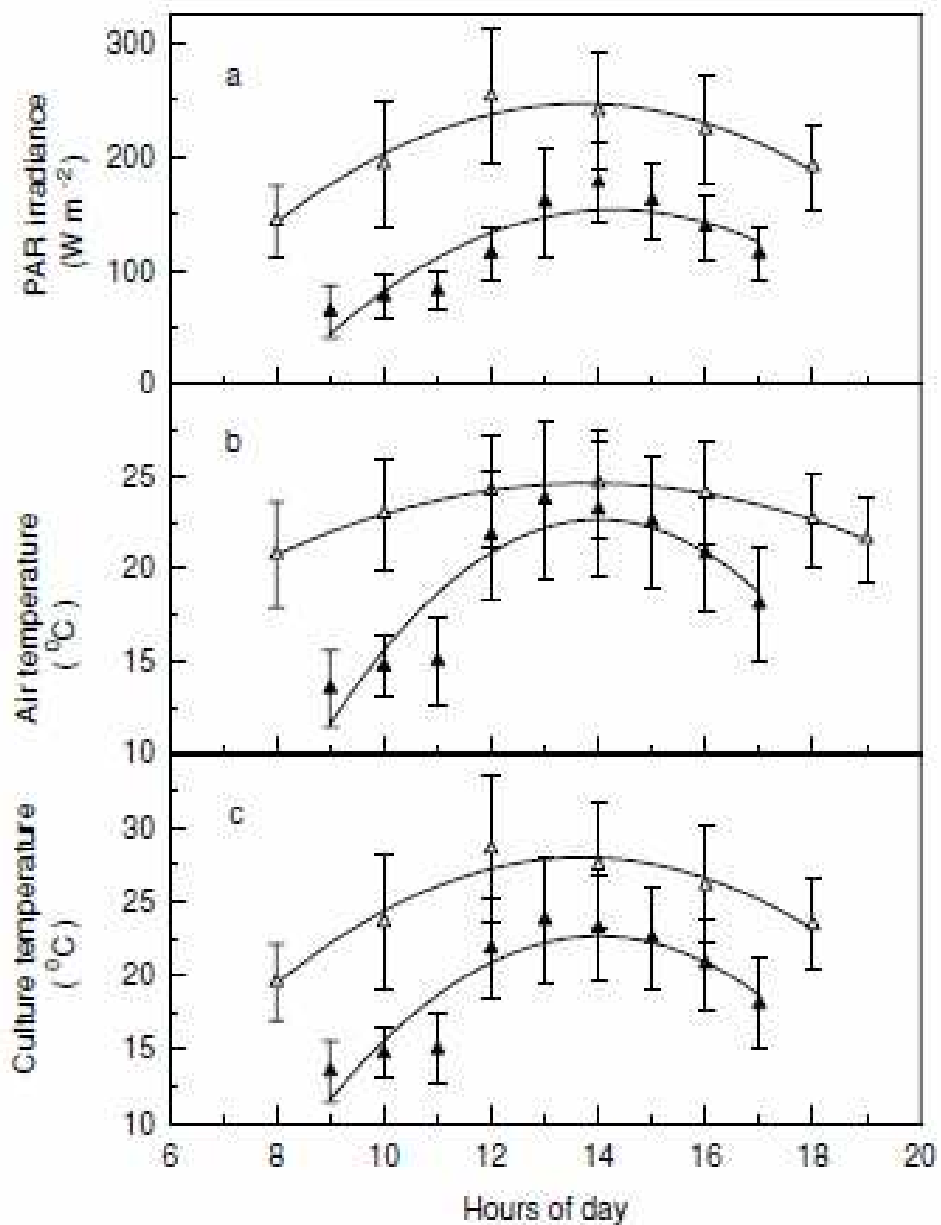
3.12. Intenzita energie fotosynteticky aktivního záření (PAR)

Transformace živin na biomasu řas probíhá díky procesu fotosyntézy. Intenzita energie fotosynteticky aktivního záření, dopadajícího na kultivační plochu, je základním parametrem, který ovlivňuje produktivitu a přírůstek biomasy. Pro porovnání a vyhodnocování dat bylo důležité tyto hodnoty zaznamenávat.

Pro fotosynteticky aktivní záření se používá zkratka PAR – Photosynthetically active radiation. Optimální hodnoty, vyjádřené jako fotosynteticky aktivní záření (PAR) se pohybují v rozmezí $250 - 450 \text{ W.m}^{-2}$. Pod hranicí 200 W.m^{-2} růst buněk rychle klesá (Straka a Doucha, 2009). Následující obr. 3.14., mapy intenzity solární radiace na Zemi, ukazuje roční součet globálního záření, které se liší v závislosti na zeměpisné oblasti. Hodnoty intenzity globálního záření se pohybují ročně mezi 500 a 2500 kWh.m^{-2} (Alabi a kol., 2009). Intenzita dostupného solárního záření je závislá na roční době, zeměpisné poloze, nadmořské výšce a na dalších geografických faktorech (Alabi a kol., 2009). Používaná jednotka PAR ve výsledcích je $\text{Wh.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$. Nejvyšší intenzity slunečního záření je dosahováno v poledne, příp. těsně po poledni. Graf 3.8. ukazuje vzájemnou závislost intenzity PAR, teploty suspenze a teploty vzduchu a porovnává jednotlivé charakteristiky v červenci a v srpnu.



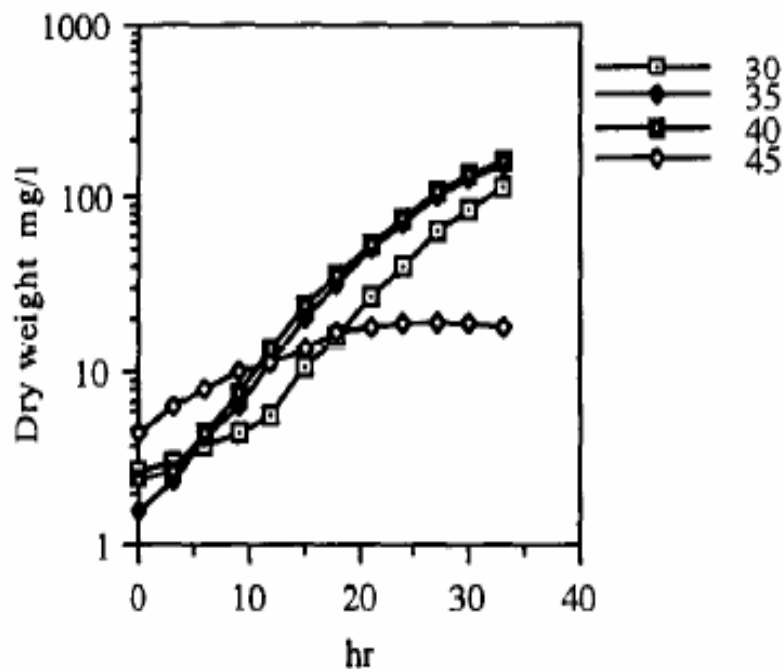
Obr. 3.14. Intenzita solární radiace na Zemi ($\text{kWh.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) (Alabi a kol., 2009)



Graf 3.8. Denní průběh intenzity PAR (a), teploty vzduchu (b) a teploty suspenze (c) v červenci (\triangle) a srpnu (\blacktriangle) (Doucha a Lívanský, 2006)

3.13. Teplota kultury

Vlivem teploty na produkci biomasy se zabývá řada prací. Např. Maeda a kol. (1995) uvádějí, že největší produktivity je dosahováno při teplotě suspenze okolo 35 °C. Při teplotě nad 40 – 45 °C dochází k inhibici růstu řas. Tato teze je v souladu s výsledky dosaženými během pokusu v Dublovicích. Straka a Doucha (2009) publikují, že pro konkrétní fotobioreaktor třeboňského typu je nevhodnější teplota suspenze v roumezí 20 – 35 °C. V následujícím grafu 3.9. znázorňují Maeda a kol. (1995) výsledky experimentu, kdy zkoumali závislost produktivity řas na teplotě suspenze. Graf 3.9. tedy potvrzuje inhibici fotosyntézy jako důsledek vysoké teploty suspenze řas nad 40 °C.



Graf 3.9. Závislost teploty kultury na produktivitě (Maeda a kol., 1995)

4. Materiál a metody

4.1. Vyhodnocení dat

Data získaná během experimentu byla zaznamenána do programu Microsoft Office Excel 2003 / 2007, pomocí kterého byly vytvořeny výsledné grafy. U vhodných grafů byla využita statistická funkce lineární regrese.

4.2. Úvod do experimentální části

Pro experiment byl vybrán produkční kmen *Chlorella sp.* P12, který byl vyselektován odborníky z třeboňského pracoviště.

Experimentální kultivační pokus probíhal v létě roku 2011 na plošinovém fotobioreaktoru v areálu Zemědělské společnosti Dublovice, a.s. (dále jen ZS Dublovice), okres Příbram. Pokus byl zahájen 12. 7. 2011 a ukončen 26. 8. 2011. Experiment tedy probíhal celkem 47 kultivačních dní. Po ukončení měření kultivace dále probíhala, ovšem již pouze pracovníky ZS Dublovice pro produkci biomasy s využitím jako doplňku krmiva pro skot. Již nebyly měřeny žádné ukazatele. Společně s plošinovým fotobioreaktorem třeboňského typu v Duvlovicích jsou v provozu ještě další dva. Druhý fotobioreaktor se nachází v areálu Botanického ústavu AV ČR v Třeboni (2 x 8 x 1 m) a třetí ve spalovně Termizo, Liberec (2 x 4 x 1 m), který využívá jako zdroj CO₂ vyčištěné a jinak emitované spaliny produkované spalovacím procesem.

Kultivační pokus, který je součástí této diplomové práce, byl řešen v rámci mezinárodního projektu EUREKA ALGANOL. Tento projekt probíhá v letech 2009 – 2012 a jeho hlavním cílem je modifikace způsobu růstu řas s vysokým obsahem škrobu a lipidů pro ověření možnosti využití na výrobu biopaliv – bioethanolu a biodieselu. Projekt EUREKA ALGANOL navazuje na předchozí projekt EUREKA BIOFIX (v letech 2006 – 2009), který potvrdil možnost využití odpadního CO₂ z vyčištěných spalin pro transformaci biomasy rychle rostoucí kulturou řas vybraného kmene *Chlorella sp.* Hlavním zadavatelem a řešitelem bylo Termizo, a.s., Liberec společně s dalšími níže uvedenými institucemi.

Identifikační číslo projektu: OE09025, název projektu: EUREKA ALGANOL

Řešitelé:

- Termizo, a.s., Liberec
- Mikrobiologický ústav Akademie věd ČR, Laboratoř buněčných cyklů řas, Třeboň
- Vysoká škola chemicko – technologická v Praze, Ústav kvasné chemie a bioinženýrství, Praha
- Ústav pro výzkum a využití paliv a.s., Praha – Běchovice
- Centre of Biological Engineering, University of Minho, Braga, Portugalsko
- Institute of Biotechnology, Zurich University of Applied Sciences, Wädenswil, Švýcarsko (Termizo, 2011; Novák 2008; Novák a kol., 2010).

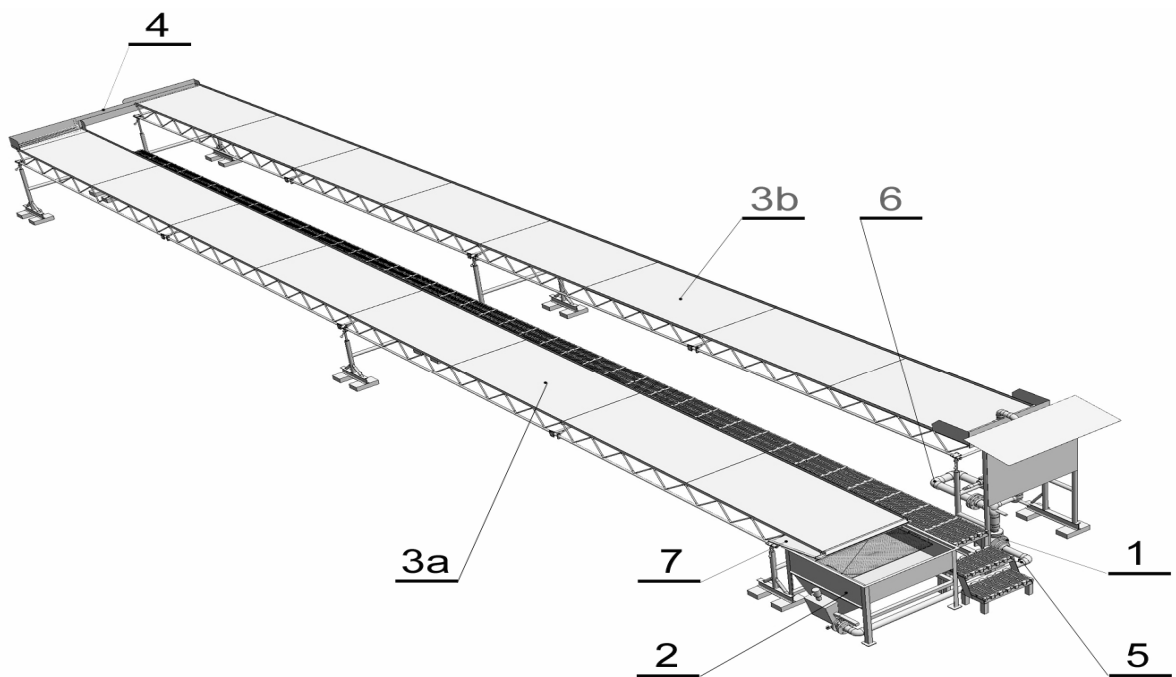
4.3. Popis kultivačního zařízení

Projekt a experiment byl realizován na plošinovém fotobioreaktoru, který je českým vynálezem, pochází z pracoviště Mikrobiologického ústavu v Třeboni a je chráněn ochrannou patentní známkou, vydanou 21. března 1995. Patent je registrován v patentovém spisu č. 279579 pod názvem vynálezu „Způsoby solární kultivace mikroskopických řas a zařízení k provádění tohoto postupu“ (Úřad průmyslového vlastnictví, 2005).

Plošinový fotobioreaktor se skládá ze dvou na sebe protilehlých spádových ploch (3a,3b) se sklonem 1,6 %, na kterém je dosahováno koncentrace desítek gramů biomasy v 1 litru suspenze. Spádové plochy, po kterých suspenze stéká, se skládají ze skleněných desek. Každá plocha je 16 m dlouhá a 1 m široká. Celková kultivační plocha reaktoru je tedy 32 m².

Čerpadlo (1) nasává suspenzi řas potrubím (5) na počátek kultivační plochy. U čerpadla lze nastavit otáčky dle potřeby a tím regulovat množství biomasy vytlačované na kultivační plochu pro regulaci výšky suspenze v rozmezí 6 – 10 mm. Suspenze stéká samospádem po ploše 3b do spojovacího žlabu (4), kterým je převáděna suspenze na plochu 3a. Rychlost proudění suspenze je dána sklonem plochy (1,6 – 1,7 %) a optimálně se pohybuje v rozmezí 0,5 – 0,8 m.s⁻¹. Sklon plochy je nastavitelný. Doba, po kterou se suspenze nachází na plošině reaktoru a tedy fotosyntetizuje, se pohybuje v rozmezí 40 – 60 vteřin. Na konci plochy 3a stéká suspenze do sběrné nádrže (2) přes síto. Síto má za cíl především zachytit drobné nečistoty v suspenzi a snížit koncentraci rozpuštěného O₂, aby nedocházelo k fotorespiraci a tedy k inhibici fotosyntézy.

Sběrná nádrž slouží k uložení řas v době, kdy kultivace neprobíhá (v noci a za nepříznivého počasí) a je chráněna výsuvným víkem. Pokud neprobíhá kultivace, suspenze nezůstává „ležet“ ve sběrné nádrži. Pomocí čerpadla suspenze proudí noční cirkulací přes perforovanou trubku zpět do sběrné nádrže. Účelem noční cirkulace je, aby nedocházelo k sedimentaci řas na dně nádrže a aby došlo ke zpomalení metabolických procesů pro minimalizaci ztát organické hmoty snížením teploty suspenze. Výsuvné víko (7) slouží k zakrytí sběrné nádrže mimo dobu kultivace, aby se do suspenze nedostávaly nečistoty a případné dešťové srážky.



Obr. 4.1. Schéma plošinového fotobioreaktoru (Novák a kol., 2010).



Obr. 4.2. Experimentální pošinový fotobioreaktor v areálu spalovny Liberec využívající reálné spaliny Autor: Ing. Petr Novák

4.4. Charakteristika využívaných spalin

Analýza spalin pro konkrétní bioplynovou stanici byla popsána Novákem a kol. (2010), potvrzuje relativně vysoký obsah kyslíku ve spalinách, v průměru 7,38 % obj. O₂, stabilní koncentraci CO₂ v úzkém rozmezí 12,8 – 13,0 % obj. Atmosférický N₂ a vodní pára jsou dalšími složkami spalin.

Mezi znečišťující látky patří především SO₂, CO a NO_x. Koncentrace SO₂ odpovídá různému obsahu H₂S v bioplynu a pohybuje se od 230 do 687 mg SO₂.m⁻³ (průměr 339 mg SO₂.m⁻³). Koncentrace CO od 616 do 1459 mg CO m⁻³ (průměr 813 mg CO.m⁻³). Obsah NO_x od 559 do 876 mg NO_x.m⁻³ (průměr 655 mg NO_x.m⁻³).

4.5. Průběh prací během kultivačního dne

- očištění spádové plochy – omytí skleněných tabulí tlakovou vodou od nečistot (především usazené a zaschlé zbytky biomasy a prach)
- zjištění celkového aktuálního objemu suspenze
- spuštění zařízení
- odběr vzorku suspenze pro stanovení optické hustoty a ranní sušiny (odběr cca 30 minut po zahájení kultivace)
- zjištění optické hustoty a ranní sušiny
- aplikace živin – množství v závislosti na počasí a produkci biomasy
- každé 2 hodiny zaznamenávání sledovaných parametrů (kap. 4.6.)
- kontrola správné funkčnosti fotobioreaktoru a průběhu kultivace během dne
- odběr vzorku suspenze pro stanovení večerní sušiny na konci kultivace
- ukončení kultivace – vypnutí zařízení
- očištění plochy – smytí zbytků suspenze do sběrné nádrže pro minimalizaci ztrát kultury
- stanovení večerní sušiny

Za příznivého počasí byla kultivace zahájena v 7:00 a ukončena v 19:00.

4.6. Přehled sledovaných parametrů, metody

Parametry měřené a zaznamenávané během kultivace každé dvě hodiny mezi 8 – 18 hod.:

- teplota kultury
- hodnota pH
- koncentrace rozpuštěného O₂
- objem dodávaných spalin (CO₂)
- parciální tlak pCO₂

Další sledované parametry:

- přírůstek sušiny
- intenzita energie fotosynteticky aktivního záření (PAR)

- optická hustota
- množství dodaných živin
- objem suspenze ve sběrné nádrži

Parciální tlak rozpuštěného CO₂ byl měřen iontově selektivní elektrodou OP 9353, Radelkis (viz. příloha 9.2., Foto 8.), která byla připojena k přenosnému pH metru. Koncentrace rozpuštěného kyslíku byla měřena oximetrem, model 330, WTW Weilheim (viz. příloha 9.2., Foto 10.). Sušina řas byla stanovena gravimetricky. Denní dávka energie fotosynteticky aktivního záření (PAR) dopadajícího na 1 m² kultivační plochy byla měřena integrátorem Detego (viz. příloha 9.2., Foto 9.), vyvinutým v třeboňském pracovišti AV ČR. Integrátor, hovorově označovaný jako polarimetr, zaznamenával počet impulzů. Podle počtu impulzů zaznamenaných integrátorem byla vypočtena PAR podle koeficientu 0,0715 (Doucha a Koudelová in verb, 2011). Teplota kultury je dalším důležitým kultivačním parametrem, který byl měřen pomocí pH staty, příp. jako doplňující údaj oximetru a zaznamenáván každé 2 hodiny.

4.7. Dodávání spalínového CO₂ z bioplynové stanice k bioreaktoru

Vzdálenost výstupu spalín z bioplynové stanice od plošiny byla přibližně 60 metrů. Na tuto vzdálenost tedy bylo nutné zajistit tok spalín. Konstrukční řešení pro danou bioplynovou stanici popsali Novák a kol. (2010). Teplota spalín se pohybuje okolo 550 °C. Teplotu před aplikací je nutné snížit na max. 50 °C a zbavit přebytku kondenzátu. Odběr spalín byl zajištěn odbočením z průlezu na komín a oddělený proud spalín byl vyveden na kombinaci vzdušný – vodní chladič. První část chladicí cesty byla provedena jako vzdušný nerezový chladič. Uvedené vzdušné chlazení snížilo teplotu spalín na 380 – 400 °C a vzdušný chladič byl dále šroubením napojen na trubkový chladič vodní. Tento chladič měl vnitřní trubku z mědi uloženou v ocelovém plášti. Vstupní chladicí voda o teplotě 15 °C po průtoku chladičem vykazovala oteplení na max. 35 – 38 °C, přičemž teplota vystupujících spalín se pohybovala v rozmezí 25 – 45 °C. Výstup z vodního chladiče byl vybaven samočinným oddělovačem kondenzátu zajišťujícím plný odtok zkondenzované vody. Pro čerpání spalín byl přidán

přídavný kompresor pro požadovaný průtok s tlakem 100 kPa. Ten byl sériově zařazen do trasy spalin.

Běžnějším způsobem je sycení kultury CO₂ obsaženým přímo ve směsi spalin (spalinový CO₂) z bioplynové stanice v obsahu 10 – 13 % obj. Během pokusu nebyl využit čistý CO₂.

Spalinový CO₂ byl přiváděn do systému perforovaných trubic ve výtlačném potrubí za cirkulační čerpadlo dopravující suspenzi na kultivační plochu. Kontinuální udržování optimální koncentrace oxidu uhličitého rozpuštěného v řasové suspenzi během růstu řas bylo prováděno pomocí tzv. pH statů.

Sycení kultury oxidem uhličitým bylo zajišťováno nepřetržitě přes jeden průtokoměr (tzv. rotametr) a druhým průtokoměrem periodicky, pokud bylo dosahováno vysoké spotřeby CO₂ (tedy pokud kultura dosahovala vysoké produktivity). Tento druhý průtokoměr byl ovládán automaticky pH statem podle jeho nastavení. Na pH statů byl nastaven požadovaný rozsah pH. Pokud hodnota pH kultury překročila horní nastavenou hodnotu, pH stat automaticky sepnul tzv. solenoidový ventil a spalinový CO₂ byl dávkován i druhým průtokoměrem. V této chvíli byla kultura přesycována CO₂ pro snížení hodnoty pH. V okamžiku dosažení minimální nastavené hodnoty pH došlo k deaktivaci solenoidového ventilu a množství dodávaného CO₂ bylo sníženo a aplikováno opět jen přes jeden průtokoměr.

4.8. Objem suspenze

Kalibrovaná sběrná nádrž byla na výtoku do čerpadla vybavena sondou, která zajišťovala, že suspenze v nádrži, která nebyla vystavena slunečnímu svitu, tvořila pouze 10 – 15 % celkového objemu suspenze v bioreaktoru. Sonda rovněž kontrolovala a automaticky vyrovnávala ztráty vody způsobené odparem při kultivaci. Kapacita sběrné nádrže byla 400 l. Standardní objem suspenze, na který byl přepočítáván aktuální obsah sušiny, byl 290 l.

4.9. Stanovení obsahu sušiny

Hmotnost sušiny řas byla stanovena gravimetricky. Do 3 Eppendorfových zkumavek byly pipetou aplikovány 3 x 2 ml suspenze řas odebrané na konci kultivační plošiny. Vzorky

byly ve zkumavkách vloženy do centrifugy, odstředivou silou zahuštěny (10 000 g, 3 min) a následně vysušeny v sušárně za teploty 105 °C po dobu 8 hodin. Po vysušení byla zvážena hmotnost sušiny obsažené ve 3 vzorcích. Porovnáním s hmotností prázdných zkumavek byla zjištěna hmotnost sušiny ve 2 ml suspenze. Z hmotností byla vypočtena průměrná hodnota ve 2 ml, z které se jednoduše vypočetla hmotnost sušiny v g.l^{-1} . Aktuální celkovou hmotnost sušiny řas v suspenzi bylo možné snadno stanovit (hmotnost sušiny $\text{g.l}^{-1} \times$ aktuální celkový objem suspenze ve sběrné nádrži).

Netto denní ($\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) produktivita vztažená na 1 m^2 kultivační plochy byla stanovena z přírůstku celkového množství biomasy řas v kultivační jednotce: $P24 = (M2 - M1) / A$, kde M1 je množství biomasy (g) v kultivační jednotce na počátku denní kultivace, M2 je množství biomasy (g) v kultivační jednotce po 24 hodinách (zahrnuje tedy denní kultivaci a noční periodu, kdy je kultura řas přechovávána a provzdušňována v nádrži bioreaktoru). Velikost kultivační plochy byla $A = 32 \text{ m}^2$.

Ráno a večer byly odebírány vzorky pro stanovení obsahu škrobu v buňkách. Odebrané vzorky byly zahuštěny nejprve centrifugací v Eppendorfových zkumavkách a následně skladovány při teplotě cca $-16 \text{ }^\circ\text{C}$ v mrazícím boxu.

4.10. Inokulace kultury, dávkování živin

Pro zahájení kultivace bylo nutné nakultivovat požadovaný kmen o dostatečné hustotě. Pokus byl zahájen při obsahu sušiny $1,6 \text{ g.l}^{-1}$. Celkově tedy bylo potřeba pro zahájení pokusu 464 g sušiny ($1,6 \text{ g.l}^{-1} \times$ standardní objem 290 l).

Hlavním substrátem pro řasy vstupujícím do procesu fotosyntézy je CO_2 . Kromě toho je nutno dodávat další živiny makro a mikroelementů, uvedených v tab. 4.1. Mikroelementy a makroelementy byly aplikovány do kultivační jednotky ve formě roztoku jednou až dvakrát denně v závislosti na počasí a tedy na předpokládané produktivitě kultury. První dávkování probíhalo přibližně 2 hodiny po zahájení kultivace. V případě příznivého počasí po celý den (tedy i vysoké produktivity) byla dodána po poledni ještě jedna dávka roztoku živin. Podle počasí byla odhadnuta předpokládaná produktivita kultury ($\text{g.m}^{-2}.\text{den}^{-1}$) a dle tohoto odhadu bylo dávkováno množství jednotlivých nutrientů. Dané množství živin bylo přidáno do přibližně dvou litrů vody. Tento roztok byl následně aplikován do kultury před spojovací žlab

po malých dávkách pro snadnější homogenizaci v celém objemu suspenze. Rozpis množství dávkování živin pro různou produktivitu je patrný v následující tabulce 4.1.

Dávkování živin bylo upraveno během pokusu o rok dříve. Analýzou byl totiž zjištěn vyšší obsah hořčíku a síranů v používané vodě z Dublovic – 150 mg $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{l}^{-1}$ a 19 mg $\text{Mg} \cdot \text{l}^{-1}$.

Produktivita ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$)	10	15	20	25	30	Jednotky
Močovina	0,138	0,202	0,28	0,35	0,41	Litry
KH_2PO_4	0,11	0,15	0,2	0,25	0,31	Litry
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	–	–	5	42	54	Mililitry
MgCl_2	–	–	3,9	32,1	41,5	Mililitry
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1,91	2,87	3,82	4,78	5,73	Gramy
Mikroelementy 1	2,34	3,51	4,68	5,85	7,02	Mililitry
Mikroelementy 2	2,34	3,51	4,68	5,85	7,02	Mililitry

Tab. 4.1. Dávkování živin do kultivační jednotky

Složení a koncentrace mikroelementů 1

- H_3BO_4 18,5 $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$
- $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 21 $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$
- $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 73,2 $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$
- $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 13,7 $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$
- $\text{ZnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 59,5 $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$

Složení a koncentrace mikroelementů 2

- $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 3,8 $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$
- NH_4VO_3 0,31 $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$

Koncentrace makroelementů

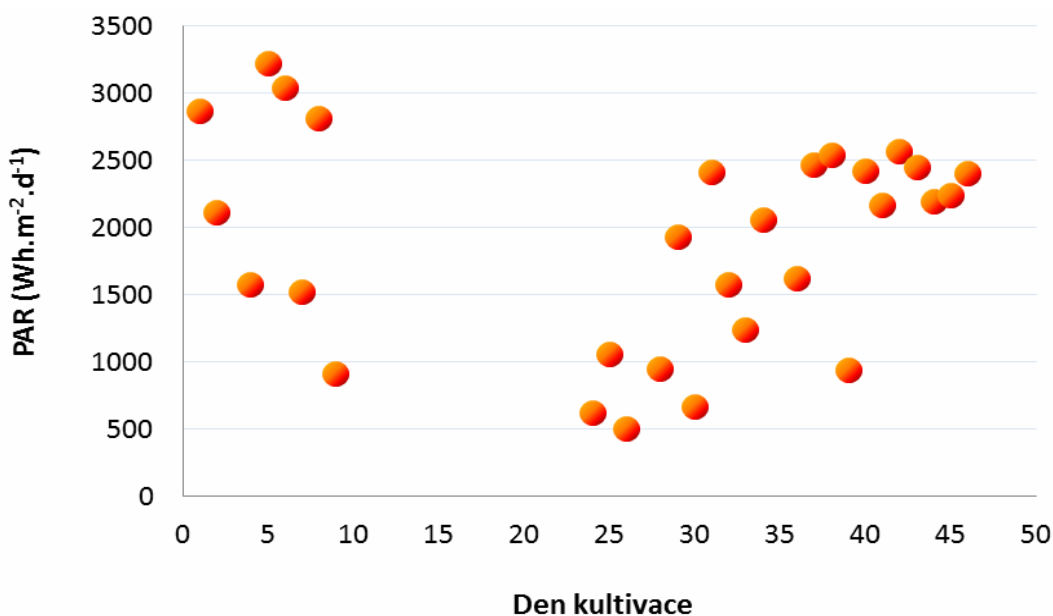
- Močovina 400 $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$
- KH_2PO_4 125 $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$
- $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 200 $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$
- MgCl_2 100 $\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$

5. Výsledky

5.1. Energie PAR

Intenzita energie fotosynteticky aktivního záření (PAR) je klíčovým faktorem ovlivňujícím aktivitu fotosyntézy řas a tedy produktivitu celé kultury. Z grafu 5.1. je patrné, že intenzita slunečního záření během 2. dekády srpna nedosahovala již takových hodnot jako v polovině července, přestože okolo 20. srpna bylo celý den jasno a teplota vzduchu se pohybovala kolem 30 °C.

Maximální intenzita PAR = 3224 Wh.m⁻².d⁻¹ byla zaznamenána 16. 7. 2011, naopak minimální hodnota PAR = 1519 Wh.m⁻².d⁻¹, kdy kultivace probíhala celý den, byla zaznamenána 18.7.2011. Nejnižších hodnot PAR, pod 1000 Wh.m⁻².d⁻¹, bylo dosaženo ve dnech s nepříznivým počasím, kdy kultivace neprobíhala celý den a integrátor nezaznamenával impulzy po celý den. Za těchto okolností nemoha být zaznamenána hodnota srovnatelná s celodenní kultivací. Dopoledne, mezi 9 – 11 hodinou, byl zaznamenán největší nárůst intenzity energie PAR. Pro poruchu integrátoru, zaznamenávajícího denní dávku energie fotosynteticky aktivního záření, chybí data mezi 10. – 23. dnem kultivace.

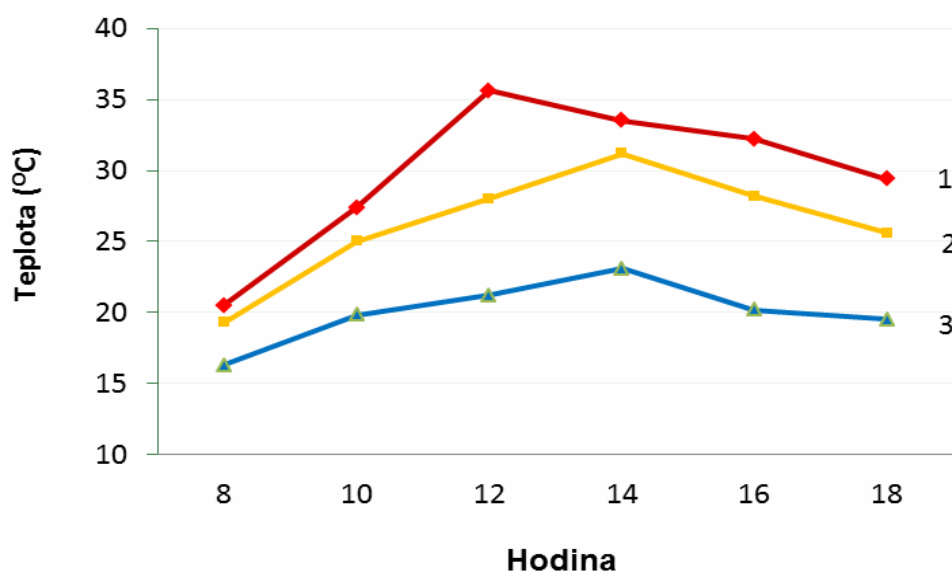


Graf 5.1. Energie fotosynteticky aktivního záření PAR během kultivace

5.2. Teplota kultury

Průběh teploty kultury je znázorněn v grafu 5.2., z kterého je patrné, že teplota dosahuje svého maxima okolo poledne (těsně po poledni) a během odpoledních hodin postupně klesá. Teplota je tedy závislá především na intenzitě slunečního záření PAR dopadajícího na jednotku plochy. Maximálních hodnot dosahuje za slunečného a teplého počasí. Teplota kultury také významně závisí na poměru velikosti kultivační plochy (A) a objemu kultury (V). Čím je tento poměr vyšší, tím menší je teplotní setrvačnost kultury, tzn. při změně ozáření kultivačního povrchu rychleji reaguje teplota kultury na tuto změnu. Pro kultivační jednotku v Dublovicích je poměr $A / V = 32 \text{ m}^2 / 0,29 \text{ m}^3$. Teplota kultury je dále ovlivněna množstvím odpařené vody (objem odpařené vody z 1 m^2 kultivační plochy v Dublovicích byl cca 3 l.d^{-1} v červenci a srpnu) a výměnou tepla mezi kulturou a okolním prostředím.

Během kultivačního pokusu byla naměřena maximální teplota suspenze $35,8 \text{ }^\circ\text{C}$ dne 22. 8. 2011 ve 14 hod. Obecně lze konstatovat, že při intenzivní sluneční aktivitě se teplota pohybovala vysoko nad $30 \text{ }^\circ\text{C}$, za polojasného počasí s občasným slunečním svitem v rozmezí $25 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$ a za nepříznivých oblačných až zatažených podmínek dosahovala teplota kultury $20 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$ během dne. Teploty nad $37 \text{ }^\circ\text{C}$ je dosahováno jen vyjíměčně díky efektu odpařování, při kterém dochází ke snižování teploty.

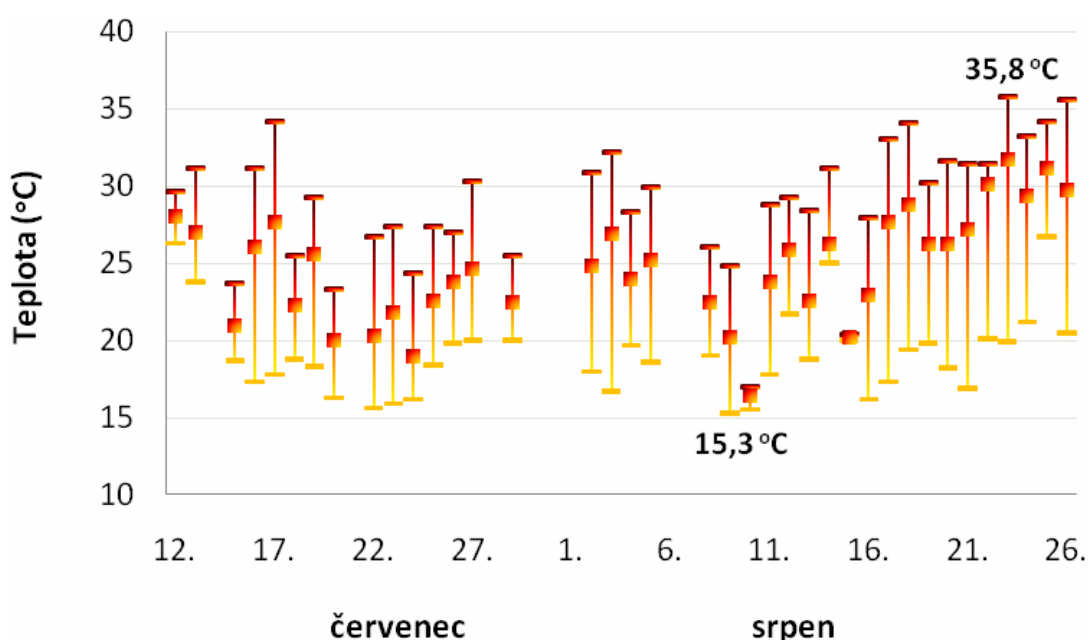


1 – $908 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ (20. 8. 2011) 2 – $2058 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ (14. 8. 2011) 3 – $2404 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ (20. 7. 2011)

Graf 5.2. Průběh teploty suspenze během dne v závislosti na intenzitě PAR

Následující graf 5.3. znázorňuje průběh teploty suspenze během celého experimentu. Diagram za jednotlivý den se skládá z celkem 8 hodnot. V grafu je znázorněna maximální, minimální a průměrná teplota suspenze za daný den. Z přidaných popisků je patrné, že během celého kultivačního experimentu byla naměřena maximální teplota suspenze 35,8 °C (ve 14. hod.; PAR 2452 Wh.m⁻².d⁻¹) a minimální 15,3 °C. Pokud probíhala kultivace celý den od rána, nejnižší teplota během dne byla naměřena téměř výhradně právě ráno v 8 hodin po zahájení kultivace. Rozptyl v minimálních ranních teplotách není tak výrazný jako u maximálních teplot naměřených v průběhu dne. Důvodem je především vliv fotosyntézy a energie PAR. Maximálních teplot je dosahováno při vysoké denní intenzitě PAR. Vzhledem k tomu, že ranní teploty suspenze se pohybovaly nejčastěji v rozmezí 15 – 20 °C, největší rozpětí mezi min. a max. teplotou v průběhu dne, bylo dosahováno ve dnech s vysokou energií PAR.

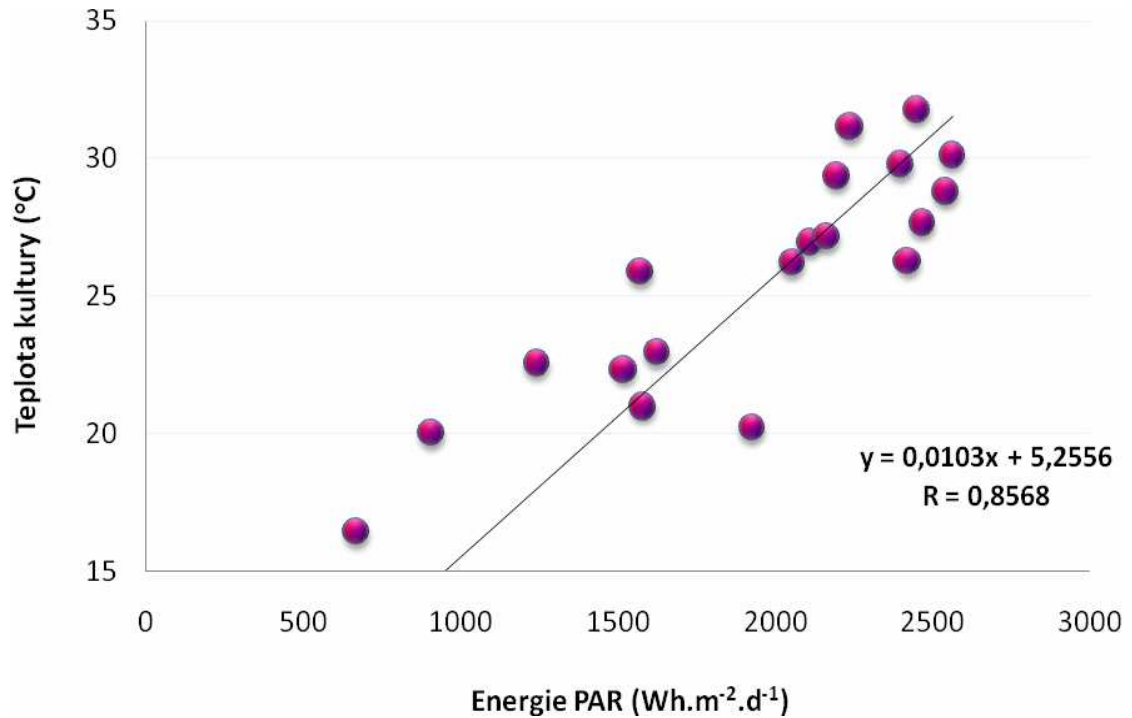
Ranní teplota suspenze je ovlivněna především teplotou okolního vzduchu před zahájením kultivace. Vzhledem k tomu, že v letním období nebyly příliš vysoké ranní rozdíly teploty vzduchu, nedocházelo ani k výrazným výkyvům ranní teploty kultury.



Graf 5.3. Průběh maximálních, průměrných a minimálních teplot během kultivace

5.3. Závislost energie PAR a teploty kultury

Průměrná denní teplota kultury vzrůstala prakticky lineárně s energií fotosynteticky aktivního záření PAR dopadajícího na 1 m² kultivační plochy. Nejvyšší průměrná teplota kultury 31,77 °C byla naměřena 23. 8. (min. 19,9 °C; max. 38 °C během daného dne) během dne při celkové energii PAR = 2452 Wh.m⁻².d⁻¹.



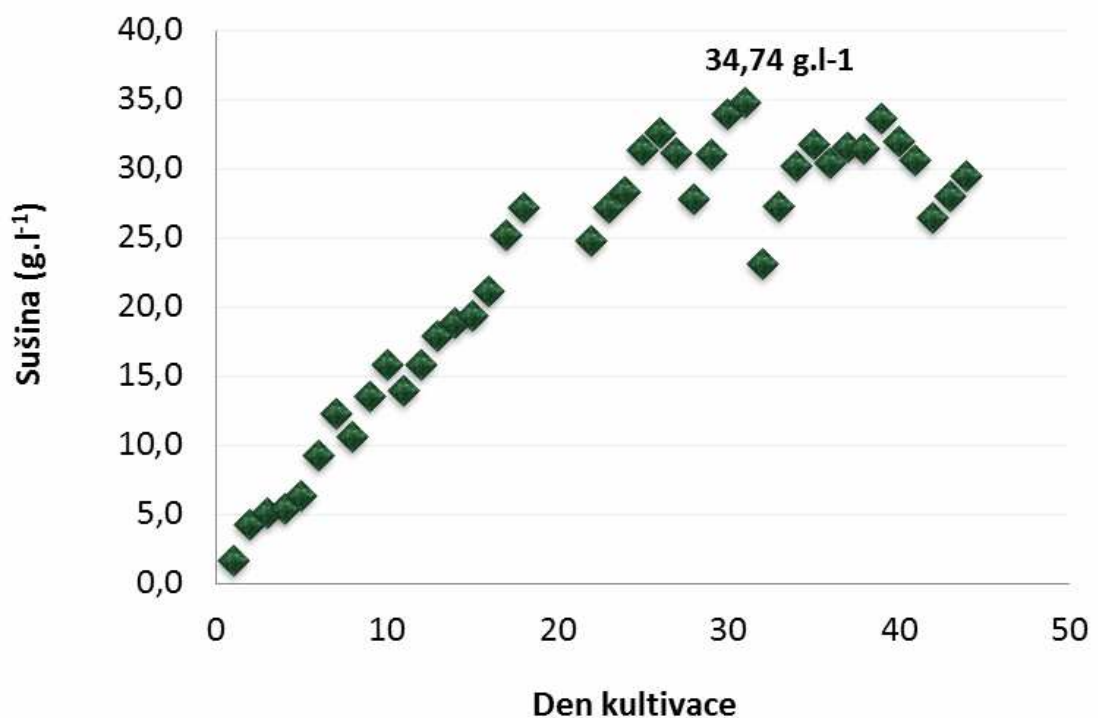
Graf 5.4. Závislost průměrné teploty kultury na energii fotosynteticky aktivního záření PAR

Na intenzitě PAR závisí také odpar vody. Během letního období při vysoké intenzitě PAR dojde během dne k odparu přibližně 3 litrů vody na 1 m².

Omezení daná pro kultivační období jsou mnohem více ovlivněna slunečním svitem než teplotou vzduchu. Suspenze řas lze přehřívát tak, že v chladnějších úsecích dne je možné kultivaci provozovat. Je – li však nedostatek slunečního záření, lze jej jen velmi těžko nahradit. Umělý osvit spotřebovává naprosto neúnosně velké množství energie.

5.4. Vývoj obsahu sušiny – růst řas

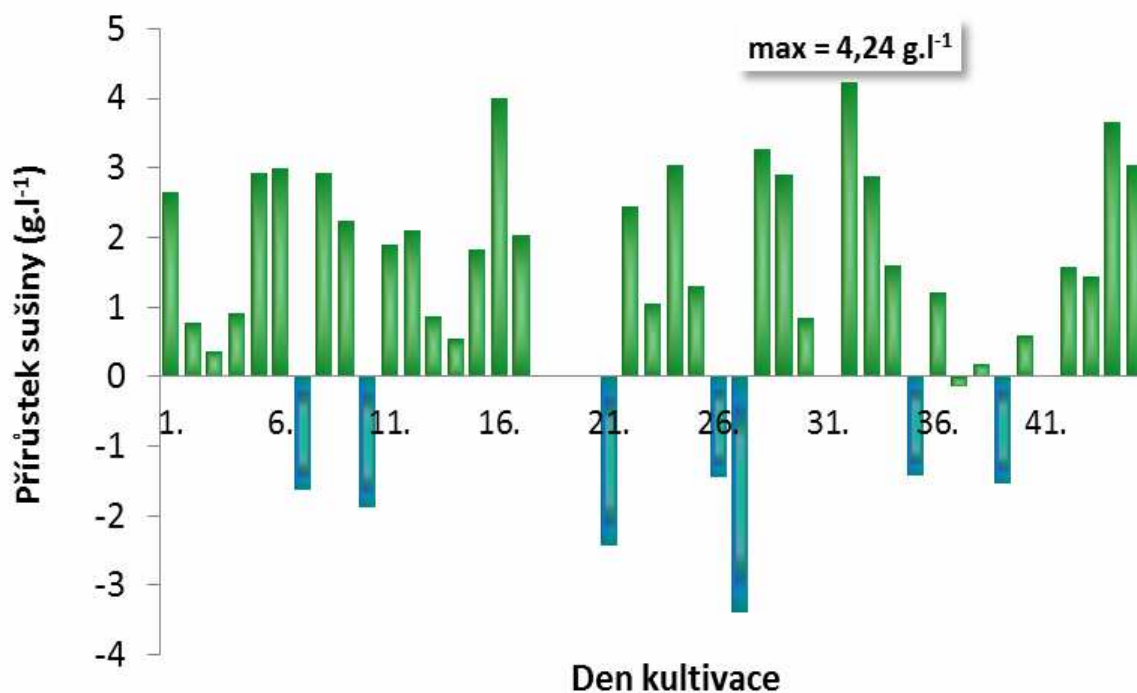
Na následujícím grafu 5.5. je vidět průběh množství vyprodukované biomasy řas. Z grafu je patrný téměř pravidelný nárůst obsahu biomasy během úvodních 20 dnů kultivačního experimentu. První výraznější úbytek biomasy byl způsoben třemi dny nepříznivého počasí. Další dva větší poklesy (12.8. a 24.8.) byly způsobeny sklizní kultury řas. V prvním případě bylo odebráno 100 litrů suspenze (tzn. $11,72 \text{ g.l}^{-1}$ sušiny, čili celkem 1172 g sušiny) do rezervy pro nenadálé události (případný úhyn kultury). V druhém případě šlo opět o plánovaný odběr vyprodukované biomasy, která byla využita jako doplňkové krmivo pro skot z farmy Dublovice. Řasy byly aplikovány přímo do krmiva v surovém stavu ve formě suspenze. Během celé kultivace bylo dosaženo maximálního obsahu sušiny $34,74 \text{ g.l}^{-1}$, což odpovídá celkové hmotnosti řas 10,07 kg sušiny (ve standardním objemu 290 l).



Graf 5.5. Průběh obsahu sušiny řas během kultivace

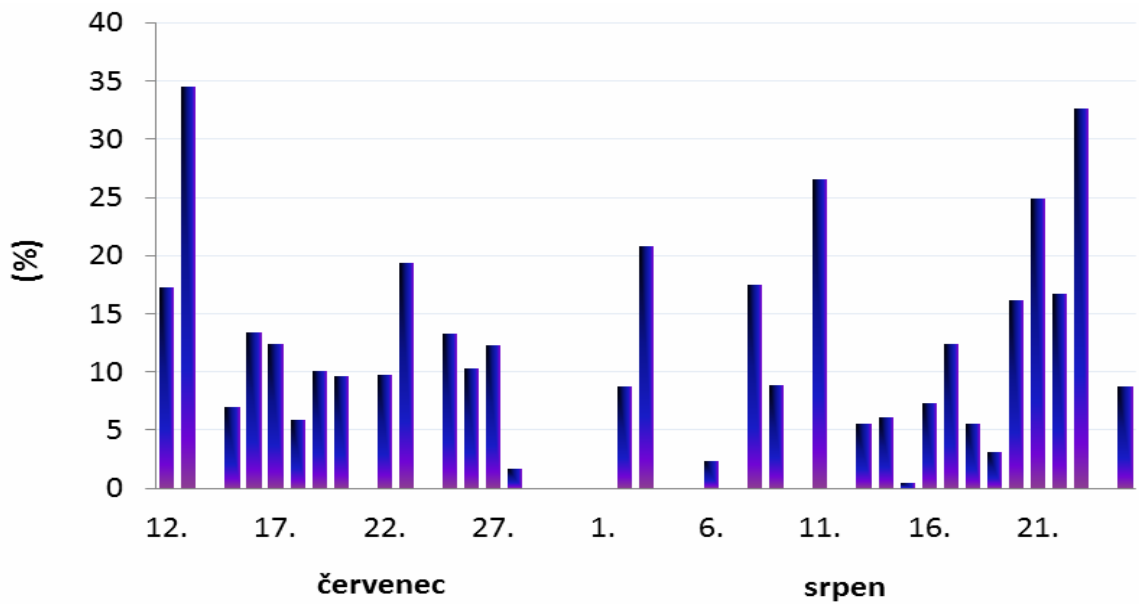
Celkově bylo zaznamenáno 7 záporných přírůstků, tedy úbytků sušiny. Důvodem bylo nepříznivé počasí, kvůli kterému nebyla kultivace v daný den vůbec zahájena nebo kultivace probíhala jen malou část kultivačního dne. Kultura tedy nemohla za tak krátký časový úsek

vyprodukovat větší množství biomasy, než kolik činil úbytek prodýcháním během předešlé noci, tak aby se dostala do kladné hodnoty přírůstku. Průběh denních přírůstků (úbytků) biomasy je patný v následujícím grafu 5.6. Maximální přírůstek za 1 kultivační den byl během celého experimentu $4,24 \text{ g.l}^{-1}$, což odpovídá produktivitě $38,45 \text{ g sušiny.m}^{-2}$. Celkový průměrný denní přírůstek sušiny byl $1,26 \text{ g.l}^{-1}$ (do výpočtu aritmetického průměru započítány i záporné přírůstky).



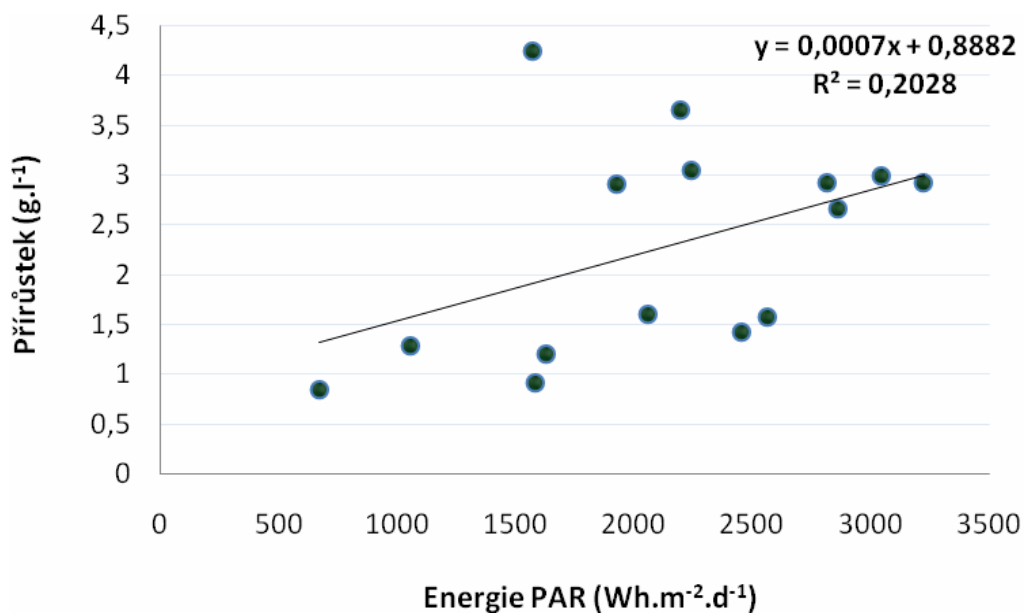
Graf 5.6. Denní přírůstky / úbytky sušiny

Kromě ranní sušiny byly pro účel zjištění množství biomasy, které řasy prodýchají během nočního režimu, odebírány i večerní vzorky po ukončení kultivace. Průměrná hodnota úbytku sušiny během noci, ve srovnání s množstvím biomasy večer na konci kultivace, byla 12,53 %. Druhý nejvýraznější úbytek naměřený 21.7. byl způsoben zastavením kultivace po celé předchozí 3 dny z důvodu nepříznivého počasí. Kultura tedy nemohla fotosyntetizovat, pouze docházelo k úbytkům biomasy.



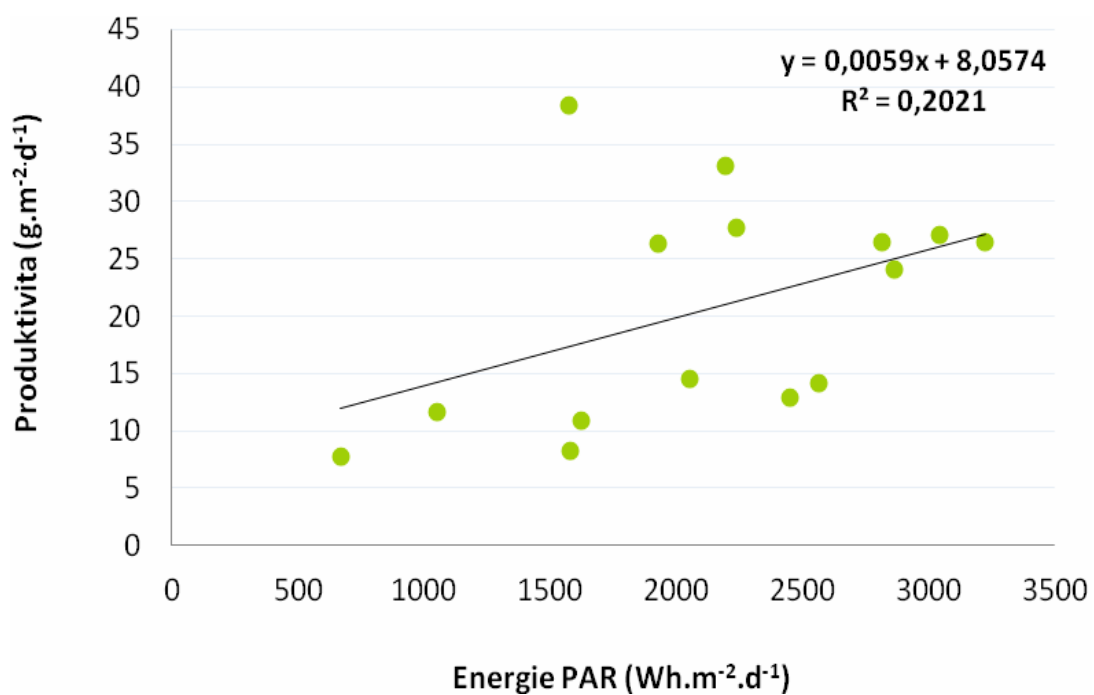
Graf 5.7. Noční úbytky sušiny (%)

Jak již bylo zmíněno, intenzita fotosyntézy a tedy i produktivity kultury je závislá především na intenzitě energie fotosynteticky aktivního záření PAR. Vzájemný vztah přírůstek biomasy a PAR je znázorněný na následujícím grafu 5.8. Závislost by měla být za ideálních podmínek téměř lineární. Z grafu je ovšem patrné, že ne vždy vysoká intenzita znamenala i vysoký přírůstek. Příčinou je nepříznivé a často se měnící počasí.



Graf 5.8. Vztah mezi energií PAR a přírůstkem sušiny

Množství vytvořené biomasy kulturou řas za jednotku času můžeme charakterizovat kromě přírůstku i produktivitou kultury. Z grafu 5.8. a 5.9. je patný vzájemný vztah, který je dán výpočtem jedné charakteristiky na základě druhé. Nejčastěji je vypočítávána produktivita z již známého přírůstku. Vzájemný vztah a výpočet je uveden v kapitole 4.9.

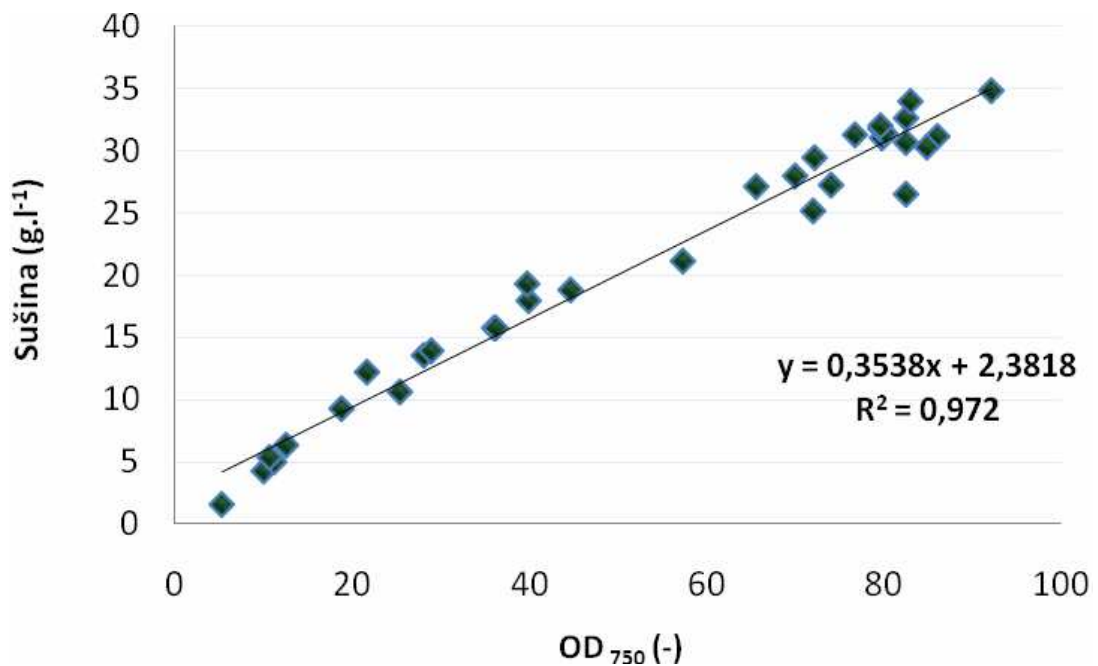


Graf 5.9. Vztah mezi energií PAR a produktivitou kultury

5.5. Optická hustota (OD₇₅₀)

Optická hustota (OD) suspenze řas je závislá na koncentraci biomasy v suspenzi a byla stanovena spektrofotometriky při vlnové délce 750 nm v kyvetách. Měřené vzorky byly řaděny tak, aby měření proběhlo v rozsahu OD = 0,15 – 0,20. Hodnota OD vzorku byla určena vynásobením naměřené hodnoty OD na spektrofotometru a hodnotou naředění vzorku.

Jak je vidět na následujícím grafu 5.10., optická hustota roste prakticky lineárně s obsahem sušiny v suspenzi a nejvyšších hodnot dosahuje při vysokých koncentracích sušiny obsažené v suspenzi. Přibližnou koncentraci sušiny a tedy optickou hustotu lze také odvodit jednoduše podle barvy suspenze. Světle zelená barva charakterizuje minimální obsah sušiny na jednotku objemu suspenze, naopak tmavě zelená barva indikuje vysoký podíl sušiny a tedy i vysokou hodnotu optické hustoty.



Graf 5.10. Vztah mezi koncentrací sušiny řas a optickou hustotou OD₇₅₀

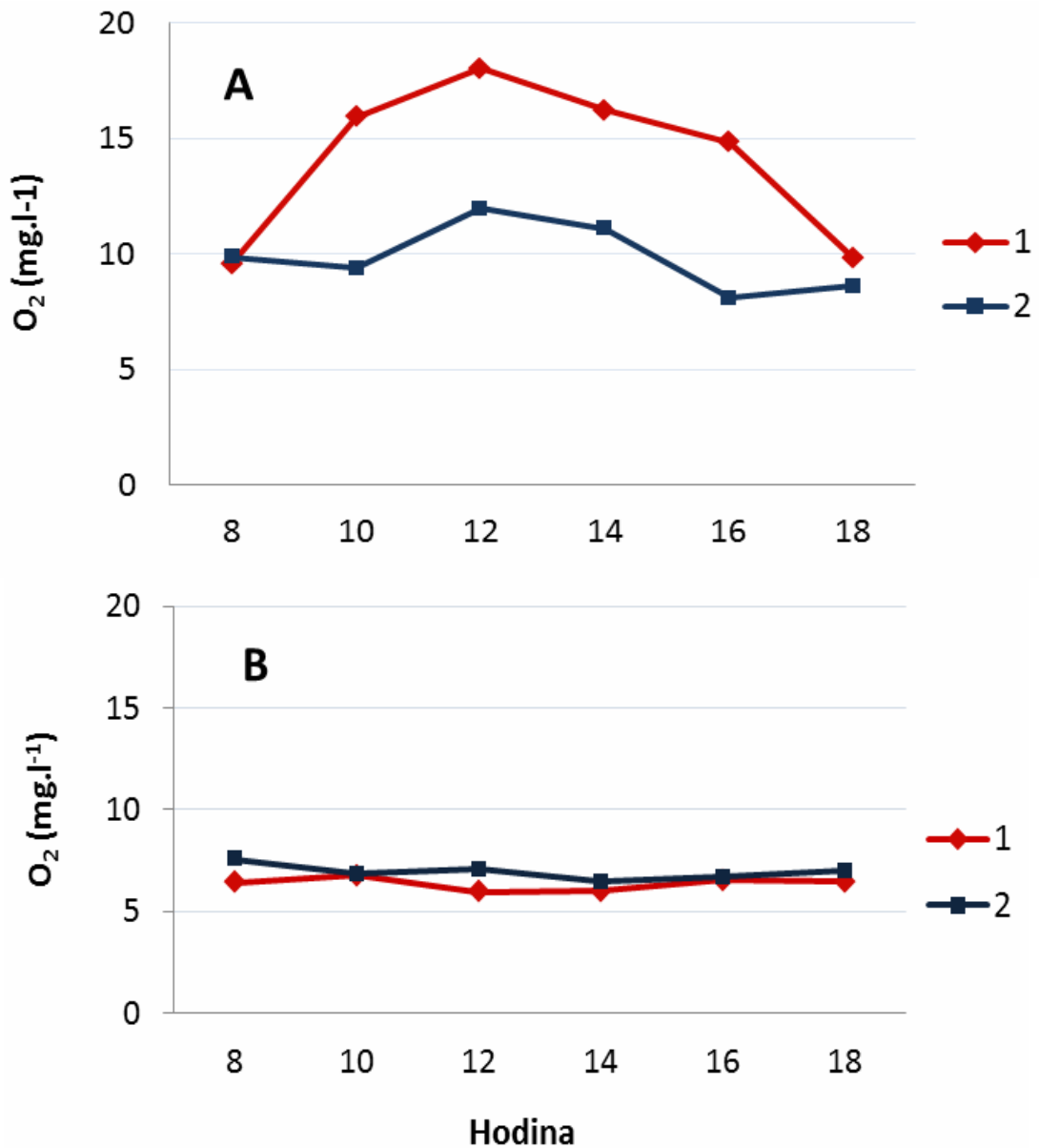
5.6. Koncentrace rozpuštěného O₂

Indikátorem koncentrace rozpuštěného kyslíku v kultuře řas je fotosyntetická aktivita buněk řas, která se mění během dne v závislosti především na ozáření kultivační plochy a na teplotě kultury. Koncentrace rozpuštěného O₂ (mg.l⁻¹) byla měřena na počátku a na konci kultivační plochy. Hodnota na počátku je vždy nižší než na konci. Dle rozdílu hodnot lze stanovit přibližnou produkci biomasy. Velikost rozdílu mezi obsahem rozpuštěného O₂ na začátku a na konci plošiny koreluje s celkovou vyšší produktivitou kultury v daný okamžik. Hodnoty na počátku plošiny se pohybují v užším rozmezí než hodnoty na konci. Byla pozorována prakticky okamžitá odezva obsahu rozpuštěného O₂ na intenzitě slunečního záření a tedy na okamžité produktivitě kultury. Pokud intenzitu slunečního záření dopadajícího na kulturu řas omezila oblačnost, byl pozorován úbytek O₂ v řádu několika jednotek mg.l⁻¹ v intervalu vteřin od poklesu sluneční aktivity.

Během kultivačního pokusu byl zjištěn maximální obsah rozpuštěného O₂ 21,72 mg.l⁻¹ dne 12. 8. 2011 ve 14 hodin za jasného a teplého počasí. Nejvyšší rozdíl koncentrace O₂ na počátku a na konci plošiny byl zaznamenán ve stejný okamžik a to 13,48 mg.l⁻¹ (počátek 8,22 mg.l⁻¹, konec 21,72 mg.l⁻¹). Maximální zjištěná koncentrace O₂ je v souladu s nároky kultury. Dosažením koncentrace nad 30 mg.l⁻¹ dochází k inhibici fotosyntézy a k nežádoucímu poklesu produktivity, koncentrace nad 35 mg.l⁻¹ je pro kulturu toxická. Snížení koncentrace bylo dosaženo pomocí síta na konci kultivační plochy.

Z grafu 5.11. je patrná závislost množství O₂ na intenzitě PAR, kdy jsou měřeny větší rozdíly na konci kultivační plochy, než na počátku. Tento fakt je dán rozdílnou aktivitou řas a tedy jinými hodnotami koncentrace O₂ na konci plošiny. Na počátku plošiny jsou rozdíly malé z důvodu minimálního vlivu fotosyntézy na výstupu kultury čerstvě nasycené CO₂. Na počátku kultivační plochy bylo dosahováno vyšší koncentrace O₂ při nižší intenzitě PAR během dne.

V noční (respirační) periodě je část kyslíku spotřebovávána. Objem spotřebovaného kyslíku v respirační periodě je však menší než objem kyslíku vyprodukovaného ve fotosynteticky aktivní (denní) periodě.



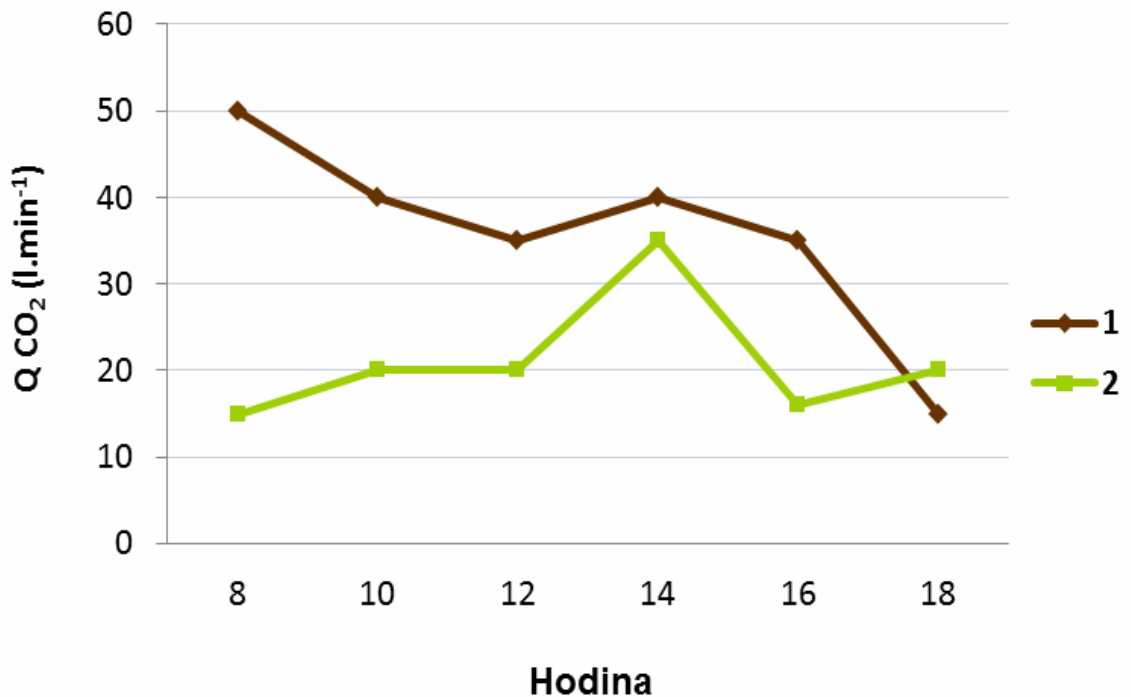
A – konec kultivační plochy; B – počátek kultivační plochy

1 – PAR = 2196 Wh.m⁻².d⁻¹ (24. 8. 2011); 2 – PAR = 908 Wh.m⁻².d⁻¹ (20. 7. 2011)

Graf 5.11. Průběh koncentrace rozpuštěného O₂ na konci plošiny za různé PAR

5.7. Objem dodávaného CO₂

Objem dodávaného CO₂ do kultury byl opět závislý především na množství energie fotosynteticky aktivního záření. Vysoká produkce biomasy při vysokých dávkách PAR odpovídá i velké spotřebě a dodávce CO₂, což je patrné z grafu 5.12., který porovnává množství potřebného CO₂ při odlišných hodnotách PAR. Za příznivého a stálého počasí objem dodaného CO₂ vzrůstal během dopoledních hodin s vzrůstem množství energie fotosynteticky aktivního záření. Nejvyšší spotřeby CO₂ bylo dosahováno po poledni. S klesajícím množstvím dopadající energie fotosynteticky aktivního záření docházelo během odpoledních hodin k poklesu spotřeby a dodávky CO₂.



1 – PAR = 3224 Wh.m⁻².d⁻¹ (16. 7. 2011); 2 – PAR = 908 Wh.m⁻².d⁻¹ (20. 7. 2011)

Graf 5.12. Závislost intenzity PAR na průtoku CO₂ během dne

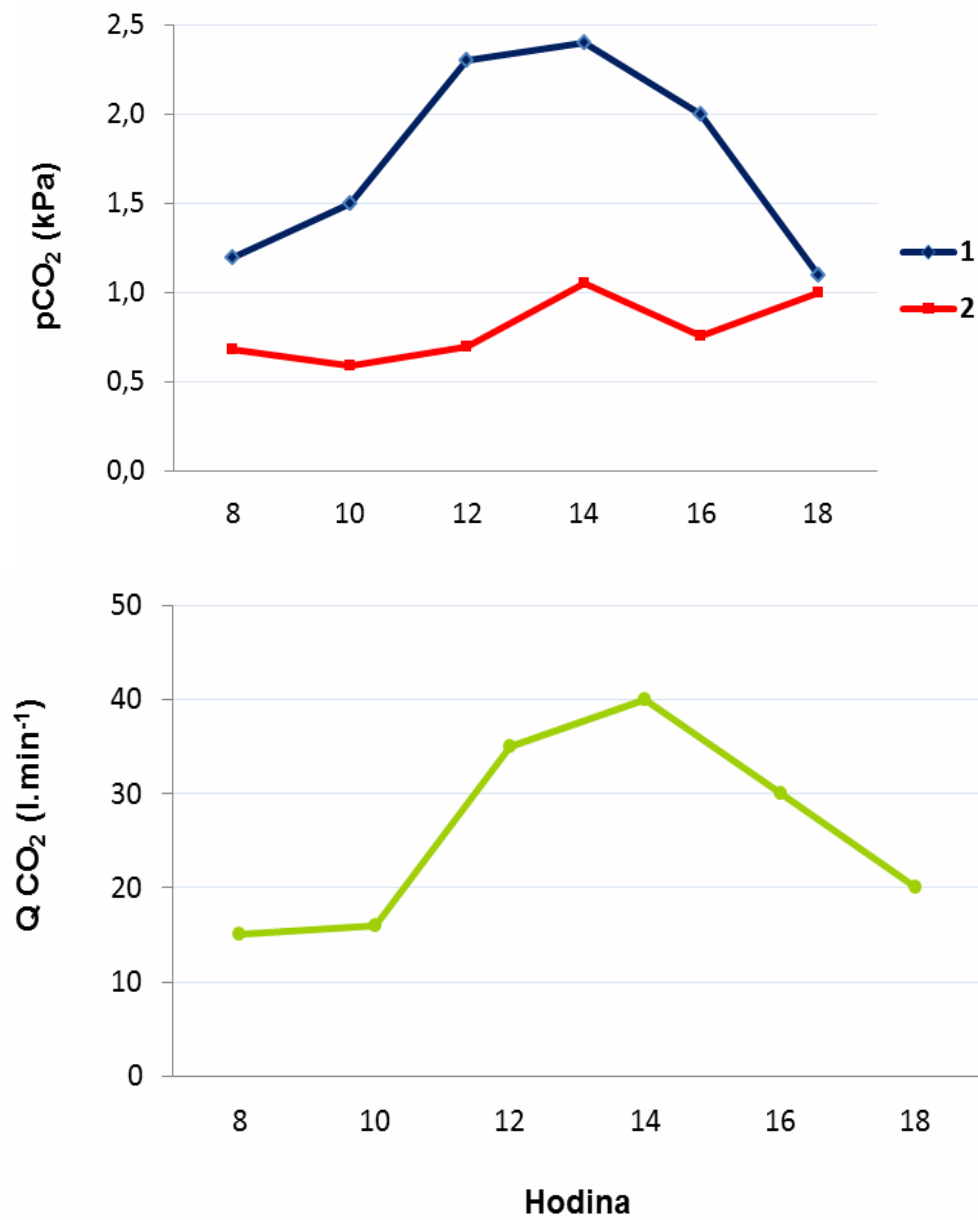
5.8. Sycení kultury CO₂ ve vztahu k hodnotě pH

Oxid uhličitý lze dodávat v čisté podobě z tlakových lahví umístěných u čerpadla a připojených na vytlačové potrubí. Čistý CO₂ lze využít pro nezávislost kultivace na dodávce spalin z bioplynové stanice při případných poruchách. Během experimentu tato možnost využita nebyla a jako zdroj CO₂ byly využívány pouze spaliny z bioplynové stanice.

Příklad průběhu průtoku CO₂ a pCO₂ na začátku a na konci kultivační plochy je uveden na grafu 5.13. Zvýšení koncentrace CO₂ vedlo ke snižování pH, protože CO₂ má kyselé vlastnosti. Při vysoké produktivitě a stejném objemu dodávaného CO₂ kultura fotosyntetizuje aktivněji, spotřebovává větší množství CO₂ a dochází ke zvyšování hodnoty pH úbytkem látky kyselé povahy. Podle stupnice na průtokoměru byla snadno odečtena aktuální spotřeba spalinového CO₂. Koncentrace CO₂ je přímo úměrná parciálnímu tlaku pCO₂. Větší koncentrace a tedy i většího pCO₂ je logicky dosahováno na začátku plošiny (po nasycení kultury v potrubí). „Cestou“ kultury po plošině dochází ke spotřebě CO₂, produkci biomasy a tedy k dosahování nižších hodnot pCO₂ na konci plošiny.

Jak je z grafu 5.13. patrné, automatická regulace přidavného sycení pH – statem zajišťovala hodnoty pCO₂ na konci kultivační plochy vyšší než pCO₂ = 0,1 – 0,2 kPa. Při poklesu pod tuto hodnotu začíná docházet k inhibici růstu buněk řas vlivem nedostatku CO₂. Aby k tomuto poklesu nedocházelo a zároveň aby koncentrace nebyla příliš vysoká, bylo nutné udržovat hodnotu pH v intervalu 7,8 – 8,0.

Zatímco změny v koncentraci rozpuštěného O₂ v závislosti na okamžitých změnách intenzity PAR byly pozorovány téměř okamžitě po několika vteřinách, pozorované odezvy pCO₂ na tyto změny byly pomalejší, v řádu několika minut. To je způsobeno tím, že v živném roztoku je CO₂ vázán ještě v karbonátech, které významně tlumí změny pH a tím i změny pCO₂. Změny pCO₂ jsou doprovázeny změnami pH.



1 – počátek kultivační plochy; 2 – konec kultivační plochy

Graf 5.13. Vztah závislosti průběhu $p\text{CO}_2$ na objemu dodaných spalín během dne

5.9. Živiny, produktivita

Postup dávkování živin je popsán v kapitole 4.12. Množství dodaných živin by mělo korelovat s čistým přírůstkem sušiny.

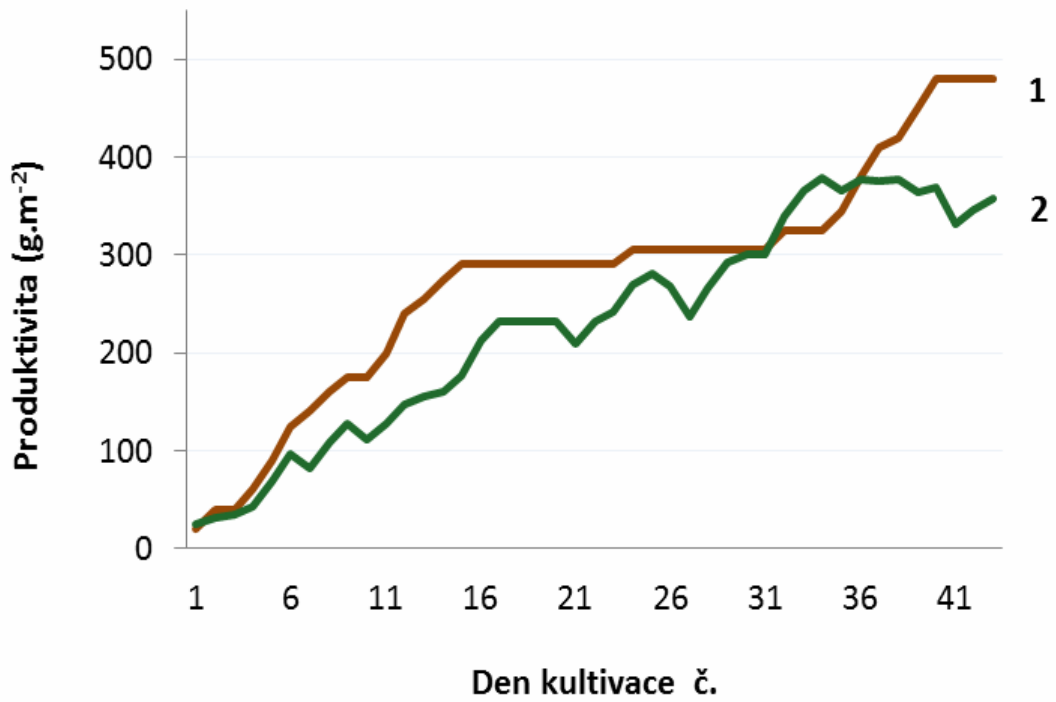
Z grafu 5.14. je zřejmý vliv nepříznivého počasí na tvorbu biomasy. Produktivita kultury přibližně mezi 15. – 31. dnem pokusu byla nízká, nevyrovnaná a dokonce záporná (úbytek biomasy). Jednoznačným potvrzením této teze je fakt, že během 10 dnů v tomto období probíhala kultivace celý den pouze ve 2 případech. Tři dny od 30.7. do 1.8. kultivace neprobíhala vůbec a plošina byla uzavřena. Úbytek lze tedy snadno vysvětlit nemožností kultury produkovat biomasu. Docházelo pouze k prodýchávání ve sběrné nádrži a úbytku biomasy. Tomuto trendu odpovídá i další fakt patrný z grafu 5.14. Během tohoto patnáctidenního období byly aplikovány živiny pouze jednou.

Během kultivace byl zjištěn možný negativní vliv některých živin na okamžitou produkci. Za ideálních podmínek při vysoké intenzitě slunečního záření byl pozorován úbytek rozpuštěného O_2 po aplikaci živin. Tento inhibiční efekt byl sledován 1 – 2 hodiny po aplikaci živin. Délka trvání tedy není nezanedbatelná. Metodou „pokusu, omylu“ byly aplikovány jednotlivé živiny samostatně za postupného sledování zpětné reakce kultury pomocí měření množství rozpuštěného O_2 . Případná inhibice danou živinou zatím nebyla prokázána z důvodu nemožnosti porovnání účinku pro nestálé počasí (po aplikaci jedné živiny bylo jasno, po aplikaci další bylo oblačno).

Bylo zaznamenáváno množství dodaných živin. Tato hodnota byla následující den porovnána s čistou produktivitou (bez nočního úbytku biomasy). Pokud se obě hodnoty přibližně shodují, bylo dodáno odpovídající množství živin. Vyšší produktivita vypovídá o nedostatku dodaných živin. Kultura by za této situace mohla v následujících dnech strádat vlivem nedostatku živin a docházelo by tedy ke zbytečnému a nežádoucímu úbytku produktivity kultury. Vyšší množství dodaných živin naopak charakterizuje přesycení kultury a hromadění nutrientů v buňkách řas. Tento jev je vzhledem k hospodárnosti také negativní a nežádoucí.

V problematice dodávání živin během kultivace lze vyvodit závěr, že během pokusu bylo dodáno více živin než kultura vzhledem k celkové čisté produktivitě vyžadovala, jak je patrné z grafu 5.14. Tento závěr lze odůvodnit nepříznivým počasím. Řada kultivačních dnů probíhala následujícím způsobem. Ráno byla zahájena kultivace a dodány živiny. Ovšem v průběhu dne několikrát začalo pršet a kultivaci bylo nutno přerušit. Kultura řas tedy neměla

možnost dodané živiny transformovat na biomasu a docházelo k akumulaci živin do buněk řas.

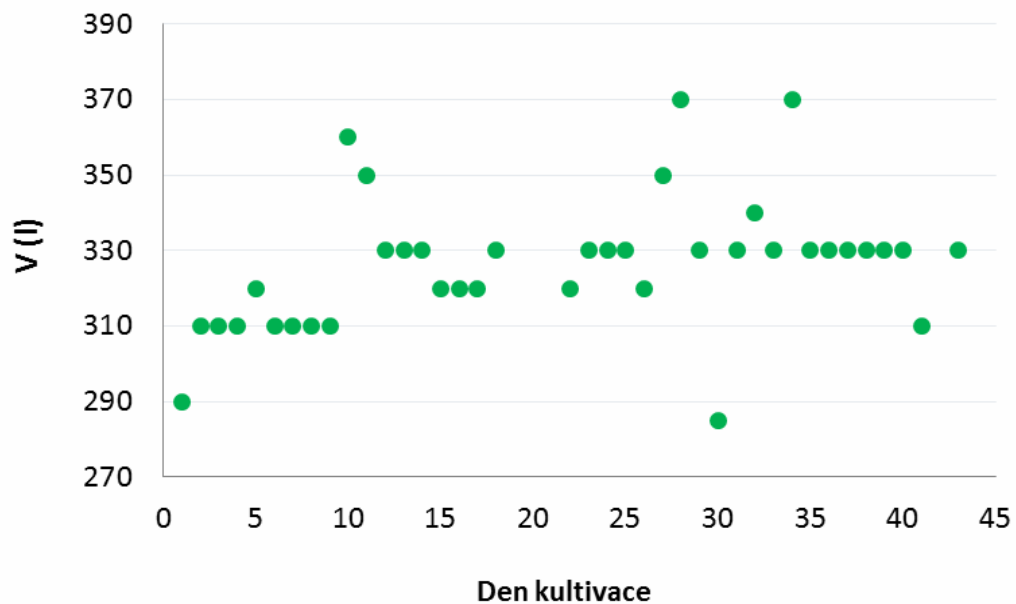


1 – dodané živiny; 2 – dosažená produktivita

Graf 5.14. Vztah mezi množstvím dodaných živin a reálnou produktivitou během kultivačního pokusu

5.10. Celkový objem suspenze

Objem suspenze v nádrži byl měřen každé ráno před zahájením kultivace a po vypnutí nočního režimu cirkulace, když se nacházel veškerý objem suspenze pouze v sběrné nádrži. Od 12. srpna byl zaznamenáván objem suspenze i večer, aby došlo k minimalizaci naředění způsobeného smytím zbytků suspenze na plošině proudem čisté vody. V potrubí bylo přibližně 15 – 20 litrů suspenze v závislosti na nastavení intenzity provzdušňování. Popis automatického doplňování vody je uveden v kapitole 4.8. Vzhledem k automatické kontrole celkového objemu suspenze, objem byl za standardních podmínek podobný. V grafu 5.15. můžeme vidět několik odchylek nahoru i dolů. Vyšší naměřené hodnoty mají následující dvě příčiny. Po ukončení kultivace byla každý večer očištěna plošina od zbylé suspenze pomocí proudu vody. Pokud se na vyčištění plošiny využilo více vody než bylo potřeba, vzrostl celkový objem. Druhou příčinou bylo nepříznivé počasí. Během pokusu byla kultivace celkem šestkrát přerušena z důvodu deště, 19. srpna dokonce dvakrát. Po zastavení kultivace bylo nutné smýt zbylou suspenzi z plošiny proudem vody. V případě, že by zůstal zbytek řas na plošině, došlo by k zaschnutí buněk řas a tedy ke ztrátě napěstované biomasy. Pokud bylo nutno kultivaci dokonce dvakrát za jeden den přerušit a vždy omýt plochu, došlo i k naředění suspenze a zvýšení celkového objemu z důvodu nemožnosti dalšího výparu během kultivace. Nejnižší naměřený objem 258 litrů během 30. dne kultivace byl způsoben odběrem 100 litrů suspenze do zásoby pro případ, že by došlo k úhynu kultury.



Graf 5.15. Ranní objem suspenze ve sběrné nádrži (l)

6. Diskuze

Experiment prokázal, že růstová rychlost řas kultivovaných na spalínovém CO₂ je srovnatelná s rychlostí růstu řas kultivovaných za standardních podmínek. Byl tedy splněn cíl ověření možnosti kultivace řasy *Chlorella sp.* technologií na otevřeném plošinovém fotobioreaktoru v tentké vrstvě suspenze (6 – 10 mm), kde zdrojem CO₂ jsou spaliny produkované bioplynovou stanicí. Ke konci roku 2010 bylo v ČR evidováno 174 bioplynových stanic a do roku 2020 má přibýt dalších 400 (Bauman, 2012). Významný počet bioplynových stanic tedy předurčuje vysoký potenciál kultivace řas, kde zdrojem CO₂ je bioplynová stanice.

Objektivní srovnání výsledků této práce s publikacemi jiných autorů je obtížné, protože plošinový fotobioreaktor je patentem českých vědců, o který začíná být v cizině zájem až v poslední době. Srovnatelné experimenty tedy dosud neprobíhaly. Kultivace na plošinovém fotobioreaktoru již několik let úspěšně probíhá v Třeboni, ovšem zde se nepoužívá spalínový CO₂ produkovaný kogenerační jednotkou bioplynové stanice.

Dosažené denní přírůstky biomasy jsou vyšší ve srovnání s prací ZhaoSheng a kol. (2011), kteří uvádějí maximální denní přírůstek řasy *Chlorella minutissima* 1,78 g.l⁻¹. Během experimentu bylo dosaženo průměrného denního přírůstku 1,26 g.l⁻¹, ovšem do této průměrné hodnoty byly započítány i úbytky sušiny vlivem nepříznivých klimatických podmínek (kultivace neprobíhala nebo pouze omezeně část dne) a především maximální denní přírůstek dosáhl 4,24 g.l⁻¹, což je o 2,5 g.l⁻¹ více při porovnání s maximálním dosaženým přírůstkem publikovaným ZhaoSheng a kol. (2011). Během experimentální kultivace v Třeboni bylo dosaženo maximálního denního přírůstku biomasy 4,3 g.l⁻¹ (Doucha a Lívanský, 2009), což je prakticky ve shodě s dosaženým přírůstkem 4,24 g.l⁻¹ v Dublovicích. Toto srovnání je nejobektivnější a nejvíce vypovídající, protože v Třeboni byla použita totožná technologie kultivace, pouze způsob aplikace CO₂ kultuře byl rozdílný. V experimentálním uzavřeném systému v Nových Hradech bylo dosaženo průměrného denního přírůstku 0,4 g.l⁻¹. Ke kultivaci byla použita řasa *Haematococcus pluvialis* (Masojídek a kol., 2009).

Jedny z prvních kultivačních systémů řasy *Chlorella* byly použity v USA. Kultivace probíhala v plochých plastových kanálech s hloubkou suspenze 7 – 8 cm, kde bylo dosaženo maximální koncentrace biomasy 1,5 g.l⁻¹ (Masojídek a Prášil, 2010), což je mnohonásobně

méně při porovnání s maximální dosaženou koncentrací sušiny $34,74 \text{ g.l}^{-1}$ během experimentu v Doublovicích.

Během experimentu bylo dosaženo průměrné denní produktivity systému $11,42 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$. Přírůstek $4,24 \text{ g.l}^{-1}$ odpovídá maximální dosažené denní produktivitě $38,43 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, která je více než maximální dosahovaná produktivita $12 - 13 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ u otevřených nádrží (raceways rybníků), publikovaná Douchou a Lívanským (2009). Alabi a kol. (2009) zase uvádějí rozmezí produktivity otevřených nádrží od $14 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ($0,07 \text{ g.l}^{-1}$) až do $50 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ($0,42 \text{ g.l}^{-1}$). Během kultivace v tubulárních uzavřených fotobioreaktorech bylo dosahováno denní produktivity $26,6 - 31 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ (Xu a kol., 2009). Trubkové bireaktory dosahují dle Eriksena (2008) produktivity $20 - 40 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$.

Průměrná hodnota úbytku sušiny během noci, ve srovnání s množstvím biomasy večer na konci kultivace, byla $12,53 \%$, což je v souladu s experimenty prováděnými v Třeboni na stejném typu plošného fotobioreaktoru, kde bylo dosahováno nočního úbytku sušiny $9 - 14 \%$ (Doucha a Lívanský, 2009).

Dosažené hodnoty dalších sledovaných parametrů byly v předpokládaném rozsahu, který potvrdil vhodnost použité technologie pro kultivaci řas. Průběh koncentrace rozpuštěného O_2 , stejně jako objem dodávaných spalin byl standardní a očekávaný. Byl potvrzen dominantní vliv intenzity energie PAR na průběhu sledovaných parametrů. Obecně je dosahováno maximálních hodnot v poledne při nejvyšší intenzitě PAR. Vyšších hodnot bylo dosahováno za podobného počasí v červenci. Tyto tvrzení dokládají grafy publikované ve výsledcích. Experimenty zabývající se závislostí intenzity dopadajícího světla na produktivitu publikují např. Wahal a Viamajala (2009).

Během experimentu byl zjištěn maximální obsah rozpuštěného O_2 $21,72 \text{ mg.l}^{-1}$ dne 12. 8. 2011 ve 14 hod. za jasného a teplého počasí. Nejvyšší rozdíl koncentrace O_2 na počátku a na konci plošiny byl zaznamenán ve stejný okamžik a to $13,48 \text{ mg.l}^{-1}$. Maximální zjištěná koncentrace O_2 je v souladu s nároky kultury. Xu a kol. (2009) totiž publikují, že koncentrace O_2 nad 35 g.l^{-1} je pro řasy toxická.

Teplota suspenze během dopoledních hodin stoupala, maximální teplota byla zaznamenávána v poledne, příp. těsně po poledni a s postupujícím odpolednem opět klesala. Potvrdila se tedy závislost teploty suspenze na intenzitě energie fotosynteticky aktivního záření PAR. Vyšší hodnoty PAR byly zaznamenány v červenci (nejvyšší $3225 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ a to 16. července). Větších rozdílů mezi minimální a maximální teplotou suspenze během dne

bylo dosahováno ve dnech s vysokou intenzitou energie PAR, která suspenzi více ohřála, čímž bylo dosahováno vyšší maximální teploty kolem poledne. Nejvyšší naměřené teploty suspenze 35,8 °C bylo dosaženo za slunného dne. Tato teplota je v rozmezí nejvhodnější kultivační teploty, kdy je dosahováno nejvyšší produktivity kultury. Zároveň je tato teplota v souladu s maximální dosaženou teplotou 38,5 °C suspenze během experimentů na stejném typu plošinového fotobioreaktoru v Třeboni (Doucha a Lívanský, 2009) a s teplotou 35 °C, kterou považuje Masojídek a kol. (2011) za nejvhodnější pro kultivaci řasy *Chlorella sp.* Brányiková a kol. (2011) zase uvádějí, že *Chlorella* bez problémů toleruje teplotu 40 °C.

Během experimentu bylo celkově dodáno více živin, než byla reálná dosažená produktivita. To bylo dle mého názoru jednoznačně způsobeno nepříznivým počasím, kdy byly ráno aplikovány živiny, ovšem během dopoledne začalo pršet a kultura nestihla dodané živiny transformovat na biomasu.

Dalšího cíle – ověření produkce škrobu v buňkách řas, bohužel dosaženo nebylo. Hlavní příčinou byly extrémně nepříznivé klimatické podmínky během kultivačního experimentu v červenci a srpnu 2011. Pro ověření produkce škrobu a vlivu jednotlivých ukazatelů na jeho tvorbu bylo potřeba několik dní za sebou s „ideálním“ a především co nejvíce stálým počasím. Doklad o nepříznivém počasí potvzují následující příklady. Experiment probíhal celkem 47 dní, z kterých nebyla kultivace celý jednotlivý den vůbec zahájena ve 4 dnech nebo byla během dne přerušena a zastavena v dalších 8 dnech. Na přelomu července a srpna přelo téměř každý den, z deseti dnů probíhala kultivace celý den pouze dvakrát a teplota vzduchu se pohybovala pod 15 °C.

Vypěstovaná biomasa řas během experimentu byla využita jako doplněk stravy skotu, která byla aplikována ve formě surové suspenze do krmiva. Dosud se ověřují i možnosti využití filtrovaných fugátových vod z bioplynových stanic jako zdroje nutrientů (hlavně dusíku i dalších prvků) pro řasové kultivace.

Dalším důležitým poznatkem experimentu je fakt, že kultivace řasy *Chlorella sp.* probíhá bez problému na spalínách z bioplynové stanice, kde je dosahováno koncentrace CO₂ 10 – 13 % obj. Tuto koncentraci tedy řasy bez problému tolerují a nijak neovlivňuje produktivitu kultury.

Zařízení na energetické využití odpadů (které jsou podobně jako bioplynové stanice potencionálním zdrojem CO₂ pro kultivaci řas, která již byla úspěšně ověřena ve spalovně komunálního odpadu v Liberci) se stále potýkají s odporem proti provozu a výstavbě nových

zařízení. Dle mého názoru bude zásadním krokem především osvěta veřejnosti za účelem změnit dosavadní odpor a předsudky vůči tomuto způsobu využívání odpadu při porovnání všech pro a proti. Tato snaha ale nebude trvat krátkou dobu a nebude jednoduchá. V současnosti je u nás v plánu výstavba několika nových ZEVO. Příkladem je Karviná (v areálu bývalého dolu Barbora) nebo Plzeň – Chotíkov, kde ovšem zastánci bojují s masivní nevolí obyvatel a ekologických organizací. Projekty na výstavbu v Pardubicích a v Mydlovarech u Českých Budějovic jsou v současnosti pohřbeny (Zajíček, 2010).

6.1. Ekonomika projektu, srovnání

Porovnání ekonomické nákladnosti jednotlivých technologií kultivace řas v různých státech je obtížná a závisí na řadě místních faktorů, jako je cena půdy, dostupnost vody, živin nebo na produktivitě závslé především na intenzitě PAR dostupného v dané lokalitě. Alabi a kol. (2009) publikují náklady na produkci 1 tuny sušiny v Izraeli kolem 340 dolarů. Tato kalkulace je vztažena na kultivaci v otevřených nádržích, pro separaci biomasy byly použita flokulace a zdrojem CO₂ byla uhelná elektrárna.

Objektivní srovnání ekonomické nákladnosti kultivační technologie, použité při experimentu, s jinými technologiemi je velice komplikované. Plošinový fotobioreaktor třeboňského typu byl doposud provozován jen v experimentální fázi, kdy je obecně dosahováno vyšší ceny provozu. Zároveň ještě nejsou k dispozici srovnatelné publikace a analýzy. Straka a Doucha (2009) provedli přibližnou kalkulaci nákladů této technologie kultivace. Do výpočtu byla zahrnuta délka kultivační sezóny 150 dní a kultivační plocha 0,2 ha. Elektrická energie 416 tis. Kč, voda 16 tis. Kč, nutrienty 25 tis. Kč, ostatní náklady 185 tis. Kč. Celková suma tedy činí 642 000 Kč. Zároveň dále odhadli cenu 1 kg sušiny řas na 107 Kč, což je srovnatelné s cenou jiných kultivačních technologií publikovanou Alabi a kol. (2009).

Kultivaci lze dále významně zlevnit využitím odpadního spalínového CO₂, který tvoří až 50 % ceny všech potřebných živin (Doucha a Lívanský, 2009).

Straka a Doucha (2009) uvádějí, že ušetřením zdroje CO₂ dojde ke snížení nákladů na živiny až o polovinu. Největší podíl nákladů tvořilo zajištění fotobioreaktoru. Náklady na výstavbu plošinového fotobioreaktoru v Dublovicích, včetně zařízení jako čerpadlo, pH – stat,

potrubí, byly přibližně 500 tis. Kč. Náklady na vlastní provoz zařízení byly minimální. Vzhledem k tomu, že projekt byl realizován v objektu bioplynové stanice, elektrická energie potřebná na provoz zařízení (čerpadlo, pH – stat) a zdroj CO₂ byly kryty z vlastních zdrojů. Největší podíl nákladů bylo vynaloženo na vodu a živiny. Ekonomickou stránku projektu tedy lze především z důvodu ušetření elektrické energie (jinak vyráběné z obnovitelných zdrojů) a snížení emisní bilance CO₂ zhodnotit jako velice kladnou s minimálními náklady na provoz.

Alabi a kol. (2009) ve své práci porovnávají produktivitu i náklady různých technologií kultivace řas. Potvrzují nejvyšší náklady u uzavřených PBRs systémů (7,32 dolaru na 1 kg biomasy řas a 24,6 dolarů na 1 litr bionafty) a nižší nákladnost u technologií otevřených nádrží (2,66 dolarů na 1 kg biomasy řas a 14,44 dolarů na 1 litr bionafty). Cena 1 litru bionafty získané PBRs technologií kultivace tedy dosahuje 447 Kč (nákup dolaru za 18,2 Kč dne 31. 3. 2011). Při srovnání ceny bionafty z řas s cenou běžné nafty fosilního původu je patrný více jak desetinásobný rozdíl. Náklady na výrobu biopaliv 3. generace a jejich konečná cena je tedy hlavním limitujícím faktorem rozvoje výroby biopaliv z řas a to i přesto, že dochází v současnosti k neustálému zvyšování světové ceny „fosilní“ ropy, která dosahuje historického maxima. Náklady publikované Alabi a kol. (2009) jsou prakticky ve shodě s Singh a Gu (2010), kteří uvádějí náklady na výrobu biopaliv z řas v rozmezí 9 – 25 dolarů v otevřených nádržích a 15 – 40 dolarů v uzavřených fotobioreaktorech.

Náklady na výrobu bionafty z řas bude nutné snížit alespoň na polovinu, aby se stala pro investory atraktivní nejen z pohledu větší šetrnosti k životnímu prostředí, ale také z pohledu ekonomického (Varlomeef a Wasserman, 2011). Posten (2009) dále uvádí, že aby mohla být výroba ekonomicky dostupná, nesmí být náklady vyšší než 40 euro na m². Uzavřené systémy tuto cenu stále několikrát překračují M. Amaro a kol. (2011).

Dle Xavier Malcata (2011) se v současnosti náklady na výrobu barelu biopaliv z řas pohybují okolo 3000 dolarů. Pro konkurenceschopnost vůči ropě by bylo potřeba snížit cenu desetinásobně na přibližně 300 dolarů, což je v souladu s desetinásobně vyšší cenou biopaliv 3. generace, publikovanou Alabi a kol. (2009).

7. Závěr

Zařízení na energetické využití odpadu patří mezi environmentálně šetrné způsoby nakládání s odpady. To bylo potvrzeno porovnáním emisí v literární rešerši. Produkty spalovacího procesu lze využít ve stavebnictví. Například škváru lze použít jako náhradu primárních surovin, šterku, písku nebo vápence. Vyseparovaný železný šrot šetří rudy kovů v ocelárnách a železárnách. Spalováním odpadu dochází také k úspoře neobnovitelných surovin, používaných pro výrobu tepla a elektřiny. Kultivace řas, využívajících jako zdroj uhlíku odpadní plyn, dokládá maximální eliminaci škodlivin ve spalinách.

V provedeném experimentu byla ověřena možnost kultivace řas na plošinovém fotobioreaktoru, kde zdrojem CO₂ byly spaliny vzniklé z kogenerační jednotky bioplynové stanice. Za vhodných kultivačních podmínek (příznivé počasí s důrazem na vysokou intenzitu slunečního svitu) byla dokázána vysoká produktivita kultury, když byl naměřen maximální denní přírůstek 4,24 g sušiny v jednom litru kultivační suspenze.

U dalších sledovaných parametrů (průběh koncentrace O₂, parciálního tlaku pCO₂, objemu dodávaných spalin, závislosti intenzity PAR na průběhu teploty a produktivity kultury atd.) byly zaznamenány očekávané hodnoty. Výsledky potvrdily předpoklad vhodnosti tohoto kultivačního systému.

Extrémně nepříznivé počasí zabránilo splnit další cíl, a to ověřit vysokou produkci škrobu. Ta je podmíněna konstantním počasím několik dnů za sebou a vyšší koncentrací biomasy řas (cca 35 g l⁻¹). V průběhu léta 2011 nebylo možné uvedený předpoklad splnit. Na přelomu července a srpna přšelo, alespoň část dne, 10 dní za sebou, teplota vzduchu se některé dny pohybovala jen nad 10 °C a kultivace během těchto deseti dnů proběhla po celý den jen třikrát. Počasí tedy průběh celého projektu významně ovlivnilo a znehodnotilo použitelnost výsledků obsahu škrobu.

Experiment, který byl součástí mezinárodního projektu EUREKA ALGANOL lze závěrem zhodnotit na straně jedné potvrzením vhodnosti kultivačního zařízení, vybraného kmene řas a použitého zdroje CO₂ pro kultivaci s vysokými výnosy biomasy. Na straně druhé se nepotvrdil předpoklad výnosů škrobu pro využití k výrobě biopaliv z důvodu nepříznivých a nestálých klimatických podmínek. Pokusy, týkající se problematiky výnosů škrobu, budou probíhat opět v létě 2012.

8. Seznam literatury

- [1] Anonymus. 2004. Závislost spalování tuhého komunálního odpadu na ekonomické úrovni. *Odpady*. 2. 8.
- [2] Bauman, M. 2012. Bioplynové stanice na vzestupu. *Technický týdeník*. 6. 20.
- [3] Bogdálék, J., Moskalík, J. 2008. Těžké kovy v tuhých spalovenských zbytcích. *Energie z biomasy IX. – odborný seminář*. Brno. 6 s.
- [4] Brányiková, I., Maršálková, B., Doucha, J., Brányik, T., Bišová, K., Zachleder, V., Vítová, M. 2011. Microalgae – Novel Highly Efficient Starch Producers. *Biotechnology and Bioengineering*. 108 (4). 766 – 776.
- [5] Cenciani, K., Bittencourt – Oliveira, M. C., Feigl, B. J., Cerri, C. C. 2011. Sustainable production of biodiesel by microalgae and its application in agriculture. *African Journal of Microbiology Research*. 5 (26). 4638 – 4645.
- [6] Cieslar, S. 2009. Konference spalovny komunálního odpadu. *Odpadové fórum*. 5. 8.
- [7] Desortová, B. 2010. Algologie. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka. Praha. 15 s.
- [8] Dohnal, R. 2011. Budoucnost energetického zhodnocení odpadů v Evropě. *Odpady*. 10. 10.
- [9] Doucha, J., Lívanský, K. 2006. Productivity CO₂/O₂ exchange and hydraulics in outdoor open high density microalgal (*Chlorella* sp.) photobioreactors operated in a Middle and Southern European climate. *Journal of Applied Phycology*. 18 (6). 811 – 826.
- [10] Doucha, J., Lívanský, K. 2009. Outdoor open thin-layer microalgal photobioreactor : potential productivity. *Journal of Applied Phycology*. 21 (1). 111 – 117.
- [11] Demibras, A. 2010. Use of algae as biofuel sources. *Energy Conversion and Management*. 51 (12). 2738 – 2749.

- [12] Eriksen, N. T. 2008. The technology of microalgal culturing. *Biotechnology Letters*. 30 (9). 1525 – 1536.
- [13] Feng, P., Deng, Z., Hu, Z., Fan, L. 2011. Lipid accumulation and growth of *Chlorella zofingiensis* in flat plate photobioreactors outdoors. *Bioresource Technology*. 102 (22). 10577 – 10584.
- [14] Huang, G., Chen, F., Wei, F., Zhang, X., Chen, G. 2010. Biodiesel production by microalgal biotechnology. *Applied Energy*. 87 (1). 38 – 46.
- [15] Horák, J., Hopan, F. 2009. Může celá vesnice vyprodukovat tolik dioxinů jako velká spalovna odpadů? *Topenářství, instalace*. 6. 36 – 38.
- [16] Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M., Darzins, A. 2008. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant Journal*. 54 (4). 621 – 639.
- [17] Cha, T., Chen, J., Goh, E., Aziz, A., Loh, S. 2011. Differential regulation of fatty acid biosynthesis in two *Chlorella* species response to nitrate treatments and the potential of binary blending microalgae oils. *Bioresource Technology*. 102 (22). 10633 – 10640
- [18] Karásek, R. 2011. Transfer těžkých kovů při spalování odpadů. *Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Brno*. 123 s.
- [19] Kuraš, M. 2008. *Odpadové hospodářství. Vodní zdroje Ekomonitor, spol. s.r.o. Chrudim*. 143 s. ISBN: 978-80-86832-34-0.
- [20] Lívanský, K., Doucha, J. 2005. Utilization of carbon dioxide by *Chlorella kesleri* in outdoor open thin – layer culture units. *Algological Studies*. 116 (12). 201 – 212.
- [21] Luo, W., Pflugmacher, S., Pröschold, T., Walz, N., Krienitz, L. 2006. Genotype versus phenotype variability in *Chlorella* and *Micractinium* (Chlorophyta, Trebouxiophyceae). *Protist*. 157 (3). 315 – 333.
- [22] M. Amaro H., Catarina Guedes A., Xavier Malcata F. 2011. Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. *Applied Energy*. 88 (10). 3402 – 3410.

- [23] Maeda, K., Owada, M., Kimura, N., Omata, K., Karube, I. 1995. CO₂ Fixation from the flue gas on coal – fired thermal power plant by microalgae. *Energy Conversion and Managemet.* 36 (6 – 9). 717 – 720.
- [24] Mallick, N., Mandal, S., Kumar Singh, A., Bishai, M., Dash, A. 2012. Green microalga *Chlorella vulgaris* as a potencial feedstock for biodiesel. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology.* 87 (1). 137 – 145.
- [25] Maršálková, B., Širmerová, M., Kuřec, M., Brányik, T., Brányiková, I., Melzoch, K., Zachleder V. 2010. Microalgae *Chlorella* sp. as an Alternative Source of Fermentable Sugars. *Chemical Engineering Transactions.* 21. 1279 – 1284.
- [26] Masojídek, J., Sergejevová, M., Rottnerová, K., Jirka, V., Kolečko, J., Kopecký, J., Zaťková, I., Torzillo, G., Štys, D. 2009. A two – stage solar photobioreactor for cultivation of microalgae. *Journal of Applied Phycology.* 21 (1). 55 – 63.
- [27] Masojídek, J., Kopecký J., Giannelli, J., Torzillo, G. 2011. Productivity correlated photobiochemical performance of *Chlorella* mass cultures grown outdoors in thin–layer cascades. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology.* 38 (2). 307 – 317.
- [28] Masojídek, J., Prášil, O. 2010. The development of microalgal technology in the Czech Republic. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology.* 37 (12). 1307 – 1317.
- [29] Mata, T. M., Martins, A. A., Caetano, N. S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Rewies.* 14 (1). 217 – 232.
- [30] Nakahara, M., Handa, S., Nakano, T., Deguchi, H. 2003. Culture and pyrenoid structure of a symbiotic *Chlorella* species isolated from *Paramecium bursaria*. *Symbiosis.* 34 (3). 203 – 214.
- [31] Novák, P. 2008. Informace o provozu spalovny komunálního odpadu Liberec. Termizo a.s., Liberec. 47 s.

- [32] Novák, P., Bernát, P., Pěničková, J. 2010. Využívání a vlastnosti pevných zbytků ze spalovny komunálního odpadu. Termizo a.s., Liberec.
- [33] Novák, P., Bernát, P., Pěničková, J., Skálová, J., Doucha, J., Zachleder, V., Lívanský, K., Branyiková, I., Melzoch, K., Branyik, T., Maršálková, B., Straka, F., Mysliveček, J., Teixeira, J., Kovář, K. 2010. Výroba biopaliv z řas s vysokým obsahem škrobu a lipidů při využití spalínového oxidu uhličitého jako zdroje uhlíku. Příloha k průběžné výzkumné zprávě za rok 2010. Termizo, a.s. Liberec. 74 s.
- [34] Oltra, Ch. 2011. Stakeholder perceptions of biofuels from microalgae. *Energy Policy*. 39 (3). 1774 – 1781.
- [35] Papazi, A., Makridis, P., Divanach, P., Kotzabasis, K. 2008. Bioenergetic changes in the microalgal photosynthetic apparatus by extremely high CO₂ concentrations induce an intense biomass production. *Physiologia Plantarum*. 132 (3). 338 – 349.
- [36] Parmar, A., Singh, N. K., Pandey, A., Gnansounou, E., Madamwar, D. 2011. Cyanobacteria and microalgae: Positive prospect for biofuels. *Bioresource Technology*. 102 (22). 10163 – 10172.
- [37] Peroutka, K., Suzová, J. 2009. Energetické využívání odpadů – podmíněné předsudky a skutečnosti z pohledu provozovatele. *Ochrana ovzduší*. 3. 31–35.
- [38] Pokoo – Aikins, G., Nadim, A., El – Halwagi, M. M., Mahalec V. 2010. Design and analysis of biodiesel production from algae grown through carbon sequestration. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 12 (3). 239 – 254.
- [39] Posten, C. 2009. Design principles of photobioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering in Life Sciences*. 9 (3). 165 – 177.
- [40] Řezníček, T., Procházka, O. 2010. Energetické využití odpadů – odpad jako nevyčerpatelný zdroj energie. Tématická informační příručka, část A – program EFEKT. České ekologické manažerské centrum. Praha, září 2010. 19 s.

- [41] Rodlofi, L., Chini Zittelli, G., Bassi, N., Padovani, G., Biondi, N., Bonini, G., Tredici, M. R. 2008. Microalgae from oil: Strain Selection, Introduction of Lipid Synthesis and Outdoor Mass Cultivation in a Low Cost Photobioreactor. *Biotechnology and Bioengineering*. 102 (1). 100 – 112.
- [42] Singh, J., Gu, S. 2010. Commercialization potential of microalgae for biofuels productions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (9). 2596 – 2610.
- [43] Straka, F., Doucha J. 2009. Kultivace autotrofních zelených řas na spalínovém CO₂ – Nové možnosti pro kombinované využití zemědělských bioplynových stanic. Ústav pro výzkum a využití paliv, a.s. 6 s.
- [44] Šťastná, J. 2011a. Odpad jako podporovaný energetický zdroj. *Odpady*. 3. 8 – 9.
- [45] Šťastná, J. 2011b. Spalovna Schwandorf – náhradní řešení se osvědčilo. *Odpady*. 12. 24.
- [46] Van den Berg, M. 1998. Toxic Equivalency Factors for PCBs, PCDDs, PCDF/s for Humans and Wildlife. *Environmental Health Perspectives*. 2. 775 – 792.
- [47] Varfolomeev, S. D., Wasserman, L. A. 2011. Microalgae as of Biofuel, Food, Fodder and Medicines. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 47 (9). 789 – 807.
- [48] Vyšejnová, J. 2011. Za odpady platíme víc než Švýcaři, ale dostáváme méně. *Odpady*. 4. 12.
- [49] Wahal, S., Viamajala, S. 2010. Maximalizing Algal Growth in Batch Reactors Using Sequential Change in Light Intensity. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 161 (1 – 8). 511 – 522.
- [50] Wijffels, R. 2008. Potential of sponges and microalgae for marine biotechnology. *Trends in Biotechnology*. 26 (1). 26 – 31.
- [51] Xavier Malcata, F. 2011. Microalgae and biofuels: A promising partnership? *Trends in Biotechnology*. 29 (11). 542 – 549.

- [52] Xu, L., Weathers, P. J., Xiong, X., Liu, Ch. 2009. Microalgal bioreactors: Challenges And Oppurtinities. *Engineering in Life Sciences*. 9 (3). 178 – 189.
- [53] Xu, L., Guo, Ch., Wang, F., Zheng, S., Liu, Ch. 2011. A simple and rapid harvesting method for microalgae by in situ magnetic separation. *Bioresource Technology*. 102 (21). 10047 – 10051.
- [54] Li, Y., Horsman, M., Wu, N., Lan, Ch. Q., Dubois – Calero, N. 2008. Biofuels from microalgae. *Biotechnology Progress*. 24 (4). 815 – 820.
- [55] Chisti, Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*. 25 (3). 294 – 306.
- [56] Zajíček M. 2010. Jsou spalovny komunálních odpadů opravdu tak nebezpečné? *Odpadové fórum*. 10. 17 – 18.
- [57] ZhaoSheng, L., HongLi, Y., JinShui, Y., BaoZhen, L. 2011. Optimization of the biomass production of oil algae *Chlorella minutissima*. *Bioresource Technology*. 102. 9128 – 9134.
- [58] Zheng, Y., Chi, Z., Lucker, B., Chen, S. 2012. Two – stage heterotropic and phototropic culture strategy for algal biomass and lipid production. *Bioresource Technology*. 103 (1). 484 – 488.

Internetové zdroje

- [59] Alabi, A. O., Tampier, M, Bibeau E. *Microalgae Technologies & Processes for Biofuels / Bioenergy Production in British Columbia: Current Technology, Suitability & Barriers to Implementation* [online]. Final Report The British Columbia Innovation Council. 14. ledna 2009 [cit. 2012–03–31]. Dostupné z <http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0901_Seed_Science_-_Microalgae_technologies_and_processes_for_biofuelsbioenergy_production_in_British_Columbia.pdf>.
- [60] Bertolini, G. Spalování komunálního odpadu v různých zemích světa [online]. 13. února 2004. *Odpady*. Aktualizace z 4. března 2004 [cit. 2012–01–20]. Dostupné z

<<http://odpady.ihned.cz/c1-13970710-spalovani-komunalniho-odpadu-v-ruznych-zemich-sveta>>.

- [61] Cieslar, S. Odpadová a energetická společnost města Amsterdam [online]. All for Power. 4. dubna 2010 [cit. 2012-02-07]. Dostupné z <<http://www.allforpower.cz/clanek/odpadova-a-energeticka-spolecnost-mesta-amsterdam-nejvetsi-spalovna-na-svete/>>.
- [62] Česká informační agentura životního prostředí, n.d. PCDD + PCDF (dioxiny + furany) jako TEQ [online]. Integrovaný registr znečišťování. Ministerstvo životního prostředí ČR [cit. 2012-2-10]. Dostupný z <<http://www.irz.cz/node/81>>.
- [63] Doing, M. The Worldwide Market for waste incineration plants [online]. Ecoprog Oberhausen. 15. dubna 2010 [cit. 2012-02-07]. Dostupné z <<https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbnxz aGVra3d1Y2hhdXxneDpmYzhmMDI0YTgxNjRlMzg>>.
- [64] Johnke, B. Emissions from waste incineration [online]. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories [cit. 2012-02-07]. Dostupné z <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/5_3_Waste_Incineration.pdf>.
- [65] Johnston, J. Ski Slope On The Roof Of a Waste-To-Energy Incineration Plant [online]. Business Technology. 9. března 2011 [cit. 2012-02-25]. Dostupné z <<http://www.the9billion.com/2011/03/09/ski-slope-on-roof-of-incineration-plant/>>.
- [66] Lederer, J. Energetické využití obnovitelných a alternativních zdrojů z hlediska celkových emisí [online]. Biom. 16. ledna 2010 [cit. 2012-02-08]. Dostupné z <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energeticke-vyuziti-obnovitelnych-a-alternativnich-zdroju-z-hlediska-celkovych-emisi>>.
- [67] Novák, P., Doucha, J., Straka F. Biopaliva 2. generace z plyných produktů spalovny [online]. Biom. 7. prosince 2011 [cit. 2012-03-17]. Dostupné z <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biopaliva-2-generace-z-plynych-odpadu-spalovny>>.

- [68] Novák, A., J. Řasy jsou palivem budoucnosti [online]. Hospodářské noviny. 9. března 2010 [cit. 2012-03-04]. Dostupné z <<http://hn.ihned.cz/c1-41069050-rasy-jsou-palivem-budoucnosti>>.
- [69] Poncarová, J. Spalování odpadu: kolik vyrobíme tepla a elektřiny [online]. Nazeleno. 24. července 2009 [cit. 2011-12-27]. Dostupné z <<http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/spalovani-odpadu-kolik-vyrobime-tepla-a-elektriny.aspx>>.
- [70] Termizo, a.s. Výroční zpráva za rok 2010 [online]. Termizo, a.s. Liberec. 12. dubna 2011 [cit. 2012-02-07]. Dostupné z <http://www.termizo.mvv.cz/php/docs/vyr_zprava_2010.pdf>.
- [71] Smrčka, V. Chlorella je novým podnikatelským hitem [online]. Profit. 16. února 2003 [cit. 2012-03-04]. Dostupné z <<http://profit.tyden.cz/clanek/chlorella-je-novym-podnikatelskym-hitem/>>.
- [72] Spalovna a komunální odpady Brno, a.s. 2009. Výroční zpráva 2008 ve zkráceném rozsahu. SAKO Brno, a.s. Brno. 38 s. Dostupné také z <<http://www.sako.cz/spolecnost/vyrocnizpravy/vyr2008.pdf>>.
- [73] Stengler, E. Waste to energy in Europe
Where are we and where are we going? Conference „ The future of residual waste management in Europe 2005“. [online]. [cit. 2010-02-07]. Dostupné z <<http://www.orbitonline.net/orbit2005/vortraege/stengler-doc.pdf>>.
- [74] Straka, F. Výrobu biopaliv z odpadu spalovny umí jenom řasy ? (II) [online]. Biom. 20. ledna 2010 [cit. 2012-02-23]. Dostupné z <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyrobu-biopaliv-z-odpadu-spalovny-umi-jenom-rasy-ii>>. ISSN: 1801-2655.
- [75] Straka, F., Doucha J. Nové možnosti energetického využití bioplynu [online]. Biom. 11. července 2011 [cit. 2012-02-23]. Dostupné z <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/nove-moznosti-energetickeho-vyuziti-bioplynu>>. ISSN: 1801-2655.

- [76] Štěřba, M. Biopaliva – světlo na konci tunelu. Pro Atom Web. 9. února 2007 [cit. 2012–03–02]. Dostupné z <<http://proatom.luksoft.cz/view.php?cisloclanku=2007020901>>.
- [77] Štěřba, M. Biopaliva z řas. Pro Atom Web. 4. prosince 2007 [cit. 2012–03–02]. Dostupné z <<http://proatom.luksoft.cz/view.php?cisloclanku=2007120401>>.
- [78] Tohill, J.. Viable Oil Replacement, Must Be Synthetic, Not From Nature [online]. Business Earth Technology 24. října 2011 [cit. 2012–02–25]. Dostupné z <<http://www.the9billion.com/2011/10/24/viable-oil-replacement-must-be-synthetic-not-from-nature-venter-says/>>.
- [79] Úřad průmyslového vlastnictví. Patent č. 279579 – Způsoby solární kultivace mikroskopických řas a zařízení k provádění tohoto postupu [online]. 21. prosince 2005 [cit. 2012–03–20]. Dostupné také z <<http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/279/279579.pdf>>.
- [80] Zafar, S. Negative Impacts of Incineration – based Waste – to – Energy Technology. Alternative Energy [online]. 8. září 2008 [cit. 2012–03–03]. Dostupné z <<http://www.alternative-energy-news.info/negative-impacts-waste-to-energy/>>.

Legislativa

- [81] Nařízení vlády č. 354/2002 Sb., kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu. Dostupné také z <<http://www.i-poradce.cz/SubPages/OtvorDokument/Clanok.aspx?idclanok=712>>.
- [82] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/28/ES, o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů
- [83] Nařízení komise EU č. 1259/2011 ze dne 2. prosince 2011, kterým se mění nařízení (ES) č. 1881/2006, pokud jde o maximální limity pro dioxiny, PCB s dioxinovým efektem a PCB bez dioxinového efektu v potravinách. Dostupné také z <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:320:0018:0023:EN:PDF>>.

9. Seznam příloh

- 9.1. Přehled grafů, obrázků a tabulek
- 9.2. Fotografie z experimentu
- 9.3. Doplnující grafy, obrázky a tabulky
- 9.4. Fotografie WTE spaloven v různých zemích světa

9.1. Přehled grafů, obrázků a tabulek

Literární rešerše

- Graf 3.1. Způsoby nakládání s odpady v uvedených státech
- Graf 3.2. Složení spalin 2010
- Graf 3.3. Produkty spalování SKO (% hmot.) ve vztahu k množství spáleného odpadu
- Graf 3.4. Distribuce prvků a látek do výstupních proudů
- Graf 3.5. Složení spalin (%) na výstupu po vyčištění
- Graf 3.6. Antropogenní produkce PCDD/F v ČR za rok 2004
- Graf 3.7. Závislost produktivity kultury na koncentraci CO₂
- Graf 3.8. Denní průběh intenzity PAR (a), teploty vzduchu (b) a suspenze (c)
- Graf 3.9. Závislost teploty kultury na produktivitě
- Obr. 3.1. Cyklus energetického využívání odpadu v EU, 2006
- Obr. 3.2. Úspora neobnovitelných zdrojů využitím odpadů ve spalovně Liberec
- Obr. 3.3. Tabule s aktuálními emisními hodnotami před ZEVO Malešice
- Obr. 3.4. Klasifikace prvků dle chování během spalovacího procesu
- Obr. 3.5. Schéma postupu a eliminace spalin na katalytickém filtru
- Obr. 3.6. Kultivace řas v oválných otevřených nádržích
- Obr. 3.7. Kruhové kultivační nádrže, Taiwan
- Obr. 3.8. Nejčastější tvary uzavřených fotobioreaktorů
- Obr. 3.9. PBRs uzavřené trubkové kultivační systémy
- Obr. 3.10. Kultivace řas v nádržích o objemu 300 litrů
- Obr. 3.11. Prášek získaný ze zelených řas
- Obr. 3.12. Buňky řasy *Chlorella vulgaris*
- Obr. 3.13. Foto z elektronového mikroskopu dceřinné buňky *Chlorella* (A) a původní (B)
- Obr. 3.14. Intenzita solární radiace na Zemi
- Tab. 3.1. Průměrné emise škodlivin ze spalování vybraných paliv
- Tab. 3.2. Porovnání denních limitů a naměřených hodnot
- Tab. 3.3. Výstupní pevné materiály vzniklé spálením 98 tis. tun SKO
- Tab. 3.4. Roční produkce PCDD/F vybraných zdrojů znečišťování v ČR za rok 2007

- Tab. 3.5. Výnosy lipidů plodin a řas
- Tab. 3.6. Obsah a výnos lipidů vybraných kmenů řas
- Tab. 3.7. Složení řasové biomasy – majoritní složky; prvky v sušině
- Tab. 3.8. Složení řasové biomasy – minoritní složky

Metodika

- Obr. 4.1. Schéma plošinového fotobioreaktoru
- Obr. 4.2. Experimentální pošínový fotobioreaktor v areálu spalovny Liberec
- Tab. 4.1. Dávkování živin do kultivační jednotky

Výsledky

- Graf 5.1. Energie fotosynteticky aktivního záření PAR během kultivace
- Graf 5.2. Průběh teploty suspenze během dne v závislosti na intenzitě PAR
- Graf 5.3. Průběh maximálních, průměrných a minimálních teplot během kultivace
- Graf 5.4. Závislost teploty kultury na energii fotosynteticky aktivního záření PAR
- Graf 5.5. Průběh obsahu sušiny řas během kultivace
- Graf 5.6. Denní přírůstky / úbytky sušiny
- Graf 5.7. Noční úbytky sušiny
- Graf 5.8. Vztah mezi energií PAR a přírůstkem sušiny
- Graf 5.9. Vztah mezi energií PAR a produktivitou kultury
- Graf 5.10. Vztah mezi koncentrací sušiny řas a optickou hustotou OD_{750}
- Graf 5.11. Průběh koncentrace rozpuštěného O_2 na konci plošiny za různé PAR
- Graf 5.12. Závislost intenzity PAR na průtoku CO_2 během dne
- Graf 5.13. Vztah závislosti průběhu pCO_2 na objemu dodaných spalin během dne
- Graf 5.14. Vztah mezi množstvím dodaných živin a reálnou produktivitou
- Graf 5.15. Ranní objem suspenze ve sběrné nádrži

9.2. Fotografie z experimentu



Foto 1. Plošinový fotobioreaktor v Dublovicích (v popředí sběrná nádrž, vpravo řídící panel a čerpadlo)



Foto 2. Pohled na bioreaktor z fermentační nádrže



Foto 3. Konec kultivační plochy, přepad suspenze přes síto do sběrné nádrže



Foto 4. Barva suspenze při různém obsahu sušiny, nahoře cca $30 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$, dole cca 2 g^{-1} . Autor:
Ing. Petr Novák



Foto 5. Řídící panel

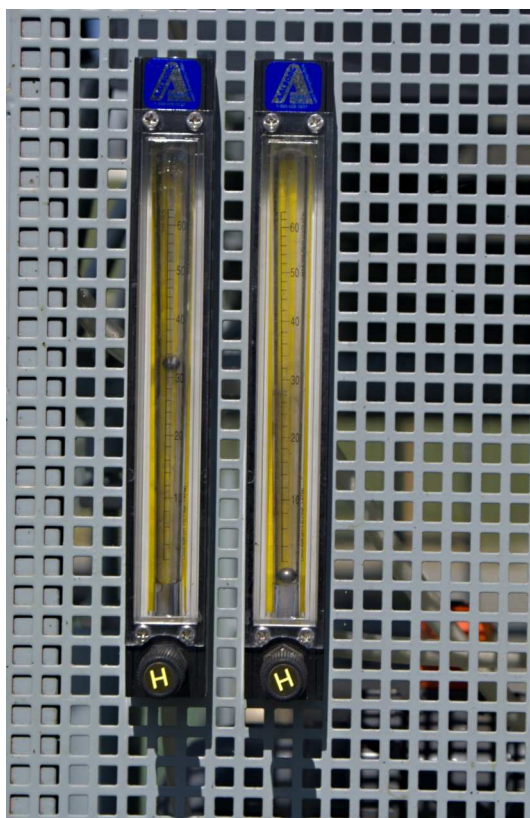


Foto 6. Rotametry regulující objem dodávaných spalin



Foto 7. pH – stat



Foto 8. Iontově selektivní elektroda měřící pCO₂

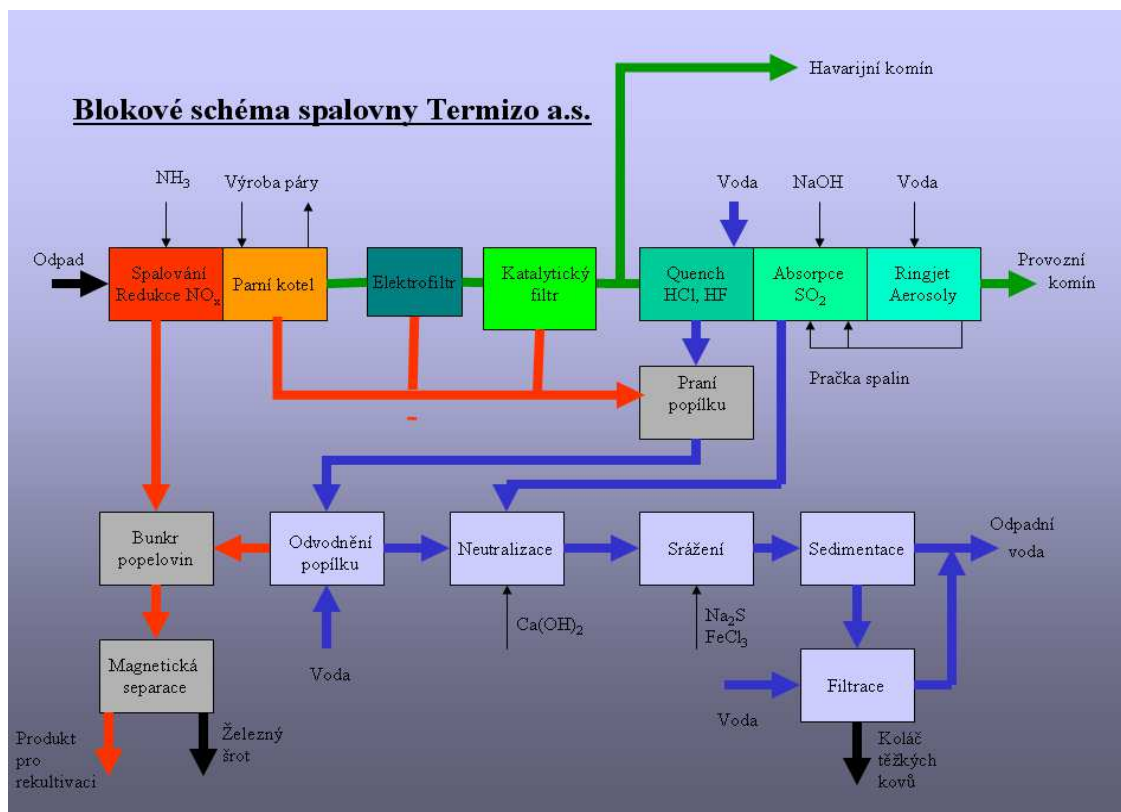


Foto 9. Integrátor měřící energii fotosynteticky aktivního záření (PAR). Autor: Ing. Soňa Koudelová



Foto 10. Oximetr. Autor: Ing. Soňa Koudelová

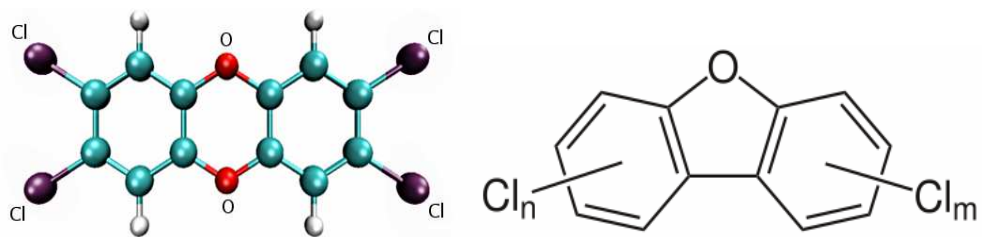
9.3. Doplňující grafy, obrázky a tabulky



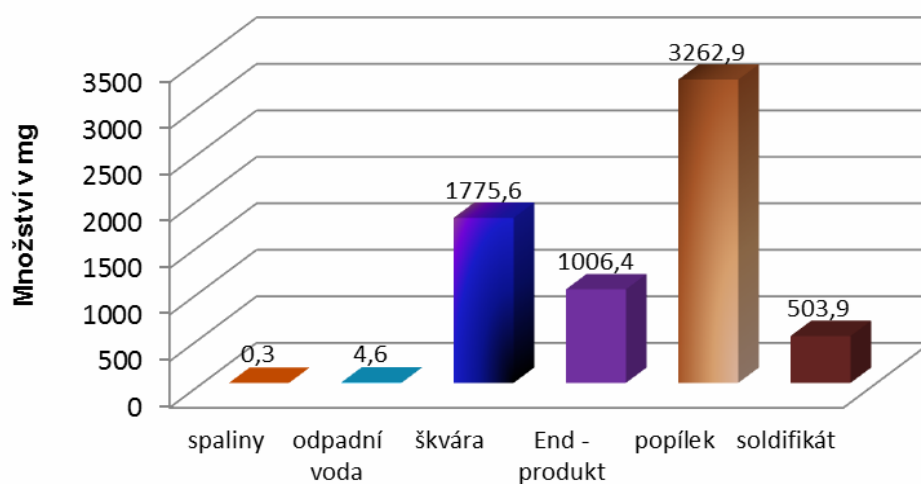
Obr. 1. Blokové schéma spalovny Termizo, a.s., Liberec
(<http://www.termizo.mvv.cz/php/index.php?p=21>)

	Koeficient ekvivalentu toxicity (TE)
2,3,7,8 - tetrachlordibenzodioxin (TCDD)	1
1,2,3,7,8 - pentachlordibenzodioxin (PeCDD)	0,5
1,2,3,4,7,8 - hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1,2,3,7,8,9 - hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1,2,3,6,7,8 - hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1,2,3,4,6,7,8 - heptachlordibenzodioxin (HpCDD)	0,01
- oktachlordibenzodioxin (OCDD)	0,001
2,3,7,8 - tetrachlordibenzofuran (TCDF)	0,1
2,3,4,7,8 - pentachlordibenzofuran (PeCDF)	0,5
1,2,3,7,8 - pentachlordibenzofuran (PeCDF)	0,05
1,2,3,4,7,8 - hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1

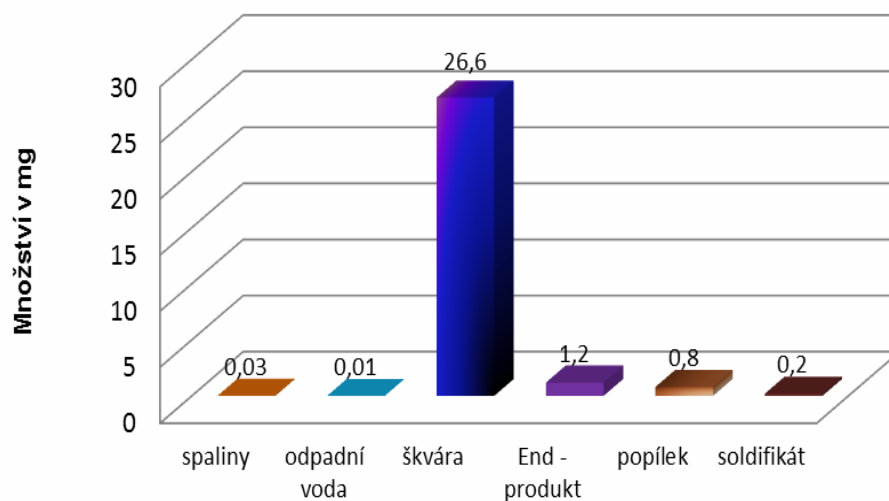
Obr. 2. Ekvivalenty toxicity PCDD a PCDF (Nařízení vlády č. 354/2002 Sb., příloha č. 1)



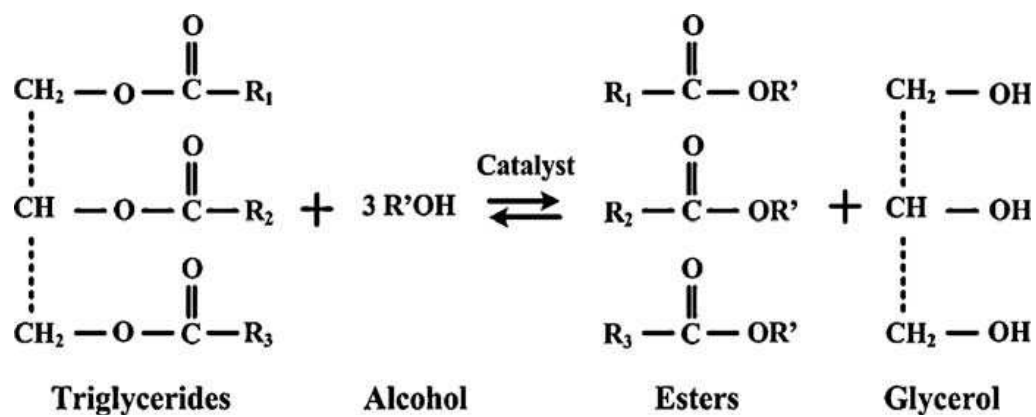
Obr. 3. Strukturní vzorec 2,3,7,8-TCDD a PCDF obecně
 (http://en.wikipedia.org/wiki/File:PCDF_general_structure.svg;
http://sv.wikipedia.org/wiki/Fil:Dioxine_pcdd.png)



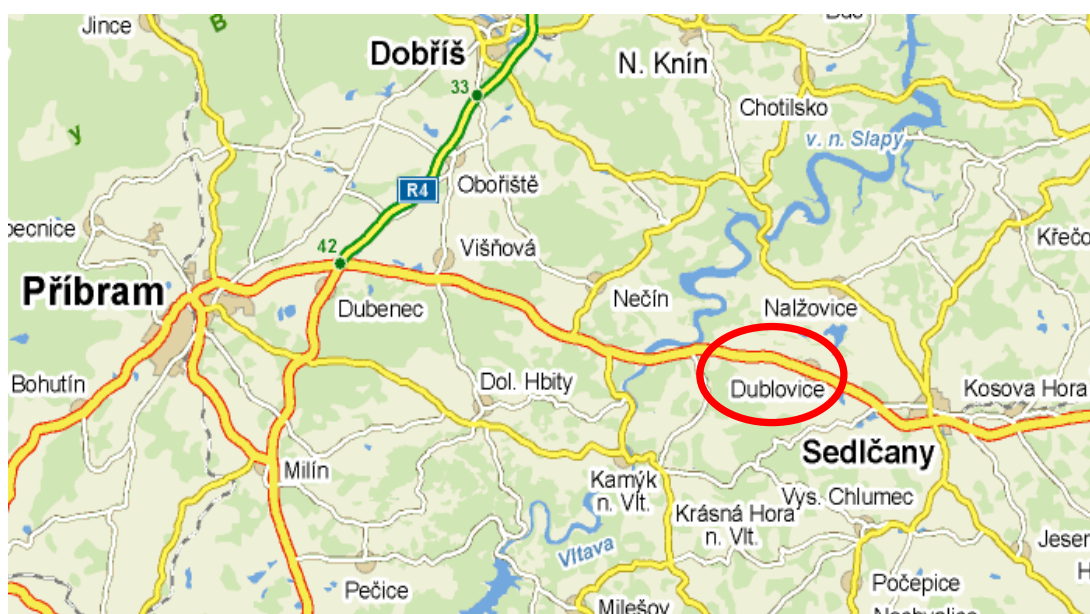
Obr. 4. Distribuce Cd do produktů využitím 1 t SKO (SAKO Brno, 2009)



Obr. 5. Distribuce Ni do produktů využitím 1 t SKO (SAKO Brno, 2009)



Obr. 6. Proces transesterifikace (Mata a kol., 2010)



Obr. 7. Lokalizace místa experimentu (www.mapy.cz)

9.4. Fotografie WTE spaloven v různých zemích světa



Foto 1. Westelijck, Amsterdam, Nizozemsko – spalovna s největší kapacitou na světě

[cit. 2012–02–12]. (<http://www.afvalenergiebedrijf.nl/home.aspx>)



Foto 2. Saugus, Massachusetts, USA [cit. 2012–02–12].

(<http://www.energyrecoverycouncil.org/waste-energy-steward-environment-a2983>)

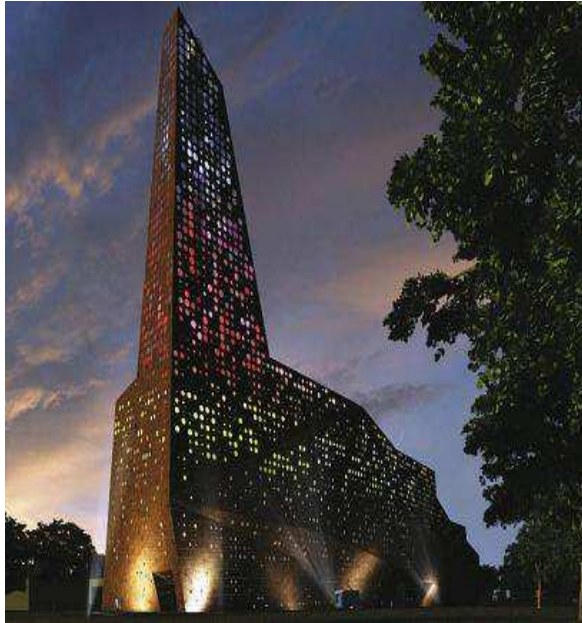


Foto 3. Roskilde, Dánsko

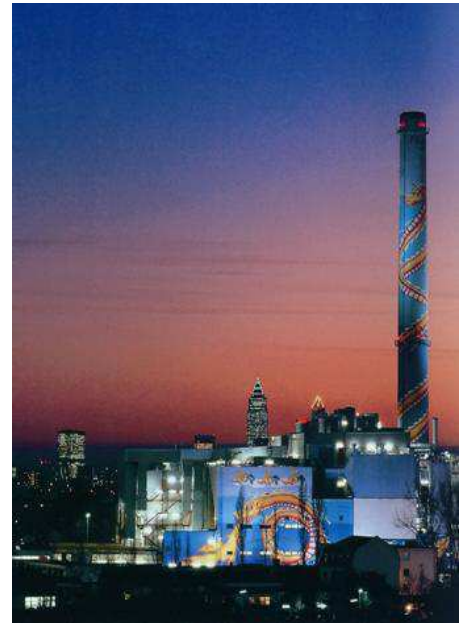


Foto 4. Nordweststad,
Frankfurt, Německo



Foto 5. Peking, Čína



Foto 6. Beitou, Taiwan



Foto 7. Spittelau, Vídeň



Foto 8. Maishima, Osaka, Japonsko

Zdroj pro foto 3 – 8:

http://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/waste/prob_solutions/WFdev_overseas.html [cit. 2012-02-12].