

Univerzita Hradec Králové
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyziky

Disertační práce

Univerzita Hradec Králové
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyziky

**Moderní měřicí technika a modelování
ve vysokoškolské výuce
fyzikálně-technických oborů**

Disertační práce

Autor: Mgr. Jan Loskot
Studijní program: P1701 Fyzika
Studijní obor: Didaktika fyziky
Školitel: Doc. RNDr. Jan Kříž, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval pod vedením školitele samostatně a uvedl jsem veškerou použitou literaturu.

V Hradci Králové dne 19. 4. 2019

Jan Loskot

Poděkování

Děkuji svému školiteli doc. RNDr. Janu Křížovi, Ph.D. za jeho vedení při studiu, ochotu a cenné rady, které mi pomohly ke zdárnému dokončení této práce.

Anotace

LOSKOT, Jan. *Moderní měřicí technika a modelování ve vysokoškolské výuce fyzikálně-technických oborů*. Hradec Králové, 2019. Disertační práce. Univerzita Hradec Králové, Přírodovědecká fakulta.

Předmětem disertační práce je začleňování moderní měřicí přístrojové techniky a matematického modelování do vysokoškolské výuky fyzikálně-technických oborů v bakalářských studijních programech přírodovědeckých a příbuzných fakult. Zvláštní pozornost je věnována Ramanově spektroskopii a environmentálním aplikacím matematického modelování, protože výuku těchto témat autor zavádí na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. V rešeršní části jsou zpracovány oblasti Ramanovy spektroskopie, modelování produkce bioplynu v bioplynových stanicích a modelování rozptylu znečišťujících látek v ovzduší. Většina těchto textů bude využita jako materiály pro výuku, jednotlivé kapitoly rešeršní části jsou navíc doplněny o návrhy praktických úloh na tato témata. Na rešeršní část navazuje popis autorova předvýzkumu, v němž byly zjišťovány názory studentů a absolventů oboru Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika na tento obor, který je v současné době zaveden na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Následující částí výzkumu je vyhodnocení výuky Ramanovy spektroskopie, do níž byly zařazeny autorem navržené praktické úlohy. Disertační práce obsahuje též porovnání pěti bakalářských fyzikálně-technických oborů zavedených v České republice, které jsou svým zaměřením blízké nové fyzikálně-technické specializaci studia, připravované na Univerzitě Hradec Králové. Na závěr jsou stručně popsány výsledky dalších autorových výzkumů. V environmentální oblasti se jedná o modelování rozptylu znečišťujících látek (konkrétně rtuti) v ovzduší a související monitorování kontaminace životního prostředí rtutí; dalším výzkumným tématem byla charakterizace kovových mikro- a nanočástic vznikajících při laserovém řezání kovových materiálů.

Klíčová slova: vysokoškolská výuka, měřicí technika, matematické modelování, Ramanova spektroskopie, bioplyn, znečištění ovzduší, SYMOS'97.

Obsah

1	Úvod	8
2	Formulace disertačního projektu	10
3	Ramanova spektroskopie	12
3.1	Fyzikální princip Ramanovy spektroskopie	12
3.2	Ramanův spektrometr	17
3.3	Spektrum Ramanova rozptylu	19
3.4	Možnosti využití Ramanovy spektroskopie	22
3.5	Povrchem zesílená Ramanova spektroskopie	25
3.6	Vzdělávání v oblasti Ramanovy spektroskopie	26
3.6.1	Školní výuka Ramanovy spektroskopie	26
3.6.2	Kurzy Ramanovy spektroskopie	29
3.6.3	Autorem navržené úlohy na Ramanovu spektroskopii	30
4	Modelování produkce bioplynu v bioplynových stanicích	32
4.1	Teoretické základy tvorby bioplynu	32
4.2	Základy reakční kinetiky tvorby bioplynu	34
4.2.1	Vsádkový proces výroby bioplynu	34
4.2.2	Kontinuální proces výroby bioplynu	36
4.3	Výuka modelování tvorby bioplynu	37
5	Modelování rozptylu znečišťujících látek v ovzduší	42
5.1	Znečišťující látky v ovzduší	42
5.2	Faktory ovlivňující rozptyl ZL v atmosféře	44
5.2.1	Faktory zdroje ZL	44
5.2.2	Faktory ovzduší	45

5.3	Druhy matematických modelů	48
5.3.1	Rozdělení modelů podle velikosti výpočetní oblasti	48
5.3.2	Rozdělení modelů podle jejich matematicko-fyzikálního přístupu	49
5.4	Zdroje dat pro modelování znečištění ovzduší v ČR	51
5.5	Metodika SYMOS'97	53
5.5.1	Vstupní údaje	54
5.5.2	Výstupy modelování	55
5.6	Modelování šíření zápachu podle metodiky SYMOS'97	57
5.7	Výuka modelování rozptylu ZL podle metodiky SYMOS'97	59
6	Názory studentů a absolventů na obor FTMB	62
6.1	Základní údaje o vzorku respondentů	62
6.2	Důvody respondentů pro studium oboru FTMB	63
6.3	Názory respondentů na studium obecně	64
6.4	Hodnocení učebního plánu	68
6.5	Otázky ke konkrétním vyučovacím předmětům	73
6.6	Závěry z vyhodnocení dotazníkového šetření	78
7	Vyhodnocení výuky Ramanovy spektroskopie	80
7.1	Vyhodnocení výpovědí domácích studentů	81
7.2	Vyhodnocení výpovědí zahraničních studentů	83
7.3	Závěry z vyhodnocení výuky Ramanovy spektroskopie	84
8	Porovnání vybraných fyzikálně-technických oborů na českých vysokých školách	86
8.1	Laboratorní a měřicí technika	87
8.2	Monitorování životního prostředí	91
8.3	Přístrojová fyzika	95

8.4	Aplikované počítačové modelování	98
8.5	Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika	101
8.6	Závěry z porovnání fyzikálně-technických oborů	104
9	Doporučení pro přípravu nové environmentálně zaměřené specializace na PřF UHK	107
10	Fyzikální výzkumy s využitím moderní měřicí přístrojové techniky	110
10.1	Studium znečištění životního prostředí rtutí	110
10.2	Charakterizace produktů laserového řezání slitin	113
10.2.1	Laserem řezaná nerezová ocel AISI 304	114
10.2.2	Laserem řezaná hliníková slitina AW 3103	117
11	Závěr	123
12	Použité zdroje	125
13	Konference a publikační činnost	139
13.1	Aktivní účast na konferencích	139
13.2	Publikační činnost	140
	Příloha A	141
	Příloha B	152

1 Úvod

V posledních letech se v České republice často hovoří o nedostatku absolventů technických či přírodovědně-technických oborů, někteří absolventi těchto oborů navíc nejsou dostatečně připraveni pro nástup do praxe. Následkem je nedostatek kvalitních uchazečů o technicky a přírodovědně-technicky zaměřené pracovní pozice, který může vést ke snížení ekonomického růstu České republiky. Z těchto důvodů se autor v souladu s názory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy (MŠMT) [1, 2] i zástupců průmyslových podniků a dalších zaměstnavatelů domnívá, že je žádoucí rozvíjet a podporovat technické a přírodovědně-technické směry vzdělávání.

Rozličné přírodovědně-technické obory jsou v České republice vyučovány na mnoha fakultách v různých studijních programech¹. Protože disertační práce se týká fyzikálně-technických oborů a její výsledky mají být prakticky využity v bakalářském stupni studia na přírodovědecké fakultě, byla oblast zájmu vymezena na fyzikálně-technické bakalářské obory přírodovědeckých a příbuzných fakult.

Na těchto fakultách jsou fyzikálně-technické obory zařazeny do programů Fyzika a Aplikovaná fyzika. Podle údajů MŠMT [4] bylo na začátku roku 2018 na přírodovědně zaměřených fakultách v ČR v akreditováno celkem 10 bakalářských oborů spadajících do studijního programu Aplikovaná fyzika a 28 bakalářských oborů v programu Fyzika (z nich jsou však některé zaměřeny na vzdělávání a jiné spíše na teoretickou přípravu pro navazující studium, než na využití znalostí v praxi).

Katedra fyziky (KFy) Přírodovědecké fakulty (PřF) Univerzity Hradec Králové (UHK) v současné době zajišťuje výuku ve dvou bakalářských oborech, a to v učitelském oboru Fyzika se zaměřením na vzdělávání a v neučitelském fyzikálně-technickém oboru Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika (FTMB), jehož absolventi - nepokračují-li v navazujícím magisterském studiu - nacházejí uplatnění zejm. v průmyslové sféře, v oblasti IT i na dalších souvisejících pracovních pozicích. Obor FTMB obsahuje pestrou škálu vyučovaných témat, což na jednu stranu po-

¹Jedná se o stav na začátku roku 2019, kdy jsou ještě zavedeny studijní programy dělené na studijní obory. Novela vysokoškolského zákona č. 137/2016 Sb. zrušila možnost dělit nově akreditované studijní programy na studijní obory, avšak umožňuje nabízet studentům volbu specializace v rámci studijního programu [3].

skytuje studentům širší přírodovědně-technický rozhled, avšak na druhou stranu neumožňuje věnovat se jednotlivým tématům příliš do hloubky.

V roce 2018 se na PřF UHK začala připravovat přeměna bakalářského studijního oboru FTMB na bakalářský program Fyzikálně-technická měření, který má obsahovat zatím dvě specializace: jednu zaměřenou na biomedicínské aplikace fyziky a druhou na environmentální měření a modelování.

V rámci svého postgraduálního studia se autor podílí na přípravě učebního plánu druhé jmenované specializace. Při tvorbě tohoto učebního plánu mají být využity poznatky o skladbě učebních plánů podobně zaměřených oborů na jiných vysokých školách a zohledněny také názory studentů a absolventů na původní obor FTMB. Analýza a porovnání učebních plánů i zjišťování názorů na FTMB jsou součástí autorova výzkumu. V disertační práci je uvedeno též několik doporučení pro přípravu zmíněné specializace, v nichž autor vychází z výsledků svého didaktického výzkumu i z vlastních zkušeností a znalosti situace na KFy PřF UHK.

Kromě toho se autor věnuje též zařazování výuky moderní měřicí techniky a matematického modelování do oboru FTMB. V oblasti měřicí techniky se jedná zejména o Ramanovu spektroskopii, matematické modelování je zaměřeno na rozptyl znečišťujících látek v ovzduší a výrobu bioplynu v bioplynových stanicích. Základní přehled o těchto tématech podávají kapitoly 3, 4 a 5, jejichž obsah bude sloužit rovněž jako podklady pro výuku této látky.

Související oblastí, kterou se autor zabývá, je environmentální výzkum za pomoci spektrálních metod a matematického modelování. Autor se věnuje i dalším výzkumným tématům, v nichž využívá moderní spektroskopickou a mikroskopickou měřicí techniku. Stručný popis těchto témat je obsahem kapitoly 10. Získané praktické zkušenosti bude autor využívat při pravidelné výuce i při vedení závěrečných prací studentů PřF UHK.

2 Formulace disertačního projektu

Disertační projekt obsahuje následující dílčí úkoly:

1. V předvýzkumu zjistit, jak je bakalářský obor FTMB vnímán jeho studenty a absolventy. Důležitým hlediskem jsou názory respondentů na praktickou výuku a na uplatnitelnost na relevantních pracovních pozicích.

Cílem je získat představu o tom, jaké změny v náplni výuky je potřeba provést, aby nově připravovaná environmentálně zaměřená specializace na PřF UHK byla atraktivní pro potenciální uchazeče, její studenti byli motivováni studium dokončit a absolventi byli dobře připraveni pro nástup do praxe. Výsledky tohoto předvýzkumu mohou být do jisté míry zohledněny i při úpravě sylabů stávajícího oboru FTMB.

2. Porovnat mezi sebou učební plány vybraných bakalářských fyzikálně-technických oborů zavedených na veřejných vysokých školách v České republice. Vytvořit srovnání náplní a hodinových dotací následujících skupin (bloků) vyučovacích předmětů:

- a) základní kurz matematiky,
 - b) základní kurz fyziky,
 - c) fyzikální praktikum,
 - d) odborné předměty,
 - e) případně další bloky předmětů, které se budou vyskytovat v těchto oborech,
- a zjistit, ve kterých z těchto oborů je nabízeno či vyžadováno absolvování odborných stáží nebo exkurzí a v jakém rozsahu. Cílem je zjistit, jaká témata jsou vyučována ve srovnávaných oborech a v jaké míře a jakým způsobem jsou tyto obory propojeny s praxí.

3. Připravit materiály pro výuku moderní měřicí techniky a modelování na PřF UHK, některé z nich ověřit ve výuce.

V materiálech budou zpracována témata Ramanova spektroskopie, matematické modelování produkce bioplynu v bioplynových stanicích a matematické modelování rozptylu znečišťujících látek v ovzduší. Důraz bude kladen na pochopení

základních principů potřebných pro kvalifikovanou práci s Ramanovým spektrometrem (včetně vyhodnocování výsledků měření) a se softwarem SYMOS'97 určeným pro matematické modelování rozptylu znečišťujících látek.

Pozn.: Jako výukové materiály budou sloužit některé kapitoly disertační práce, v nichž bude zpracována Ramanova spektroskopie, modelování produkce bioplynu a modelování rozptylu znečišťujících látek v ovzduší.

Součástí výukových materiálů bude také zadání několika praktických úloh zaměřených na práci s Ramanovým spektrometrem, tyto úlohy budou pilotovány na studentech oboru FTMB v rámci řádné výuky².

4. Věnovat se také odbornému (nedidaktickému) výzkumu v oblasti environmentálních měření a modelování. V tomto výzkumu využívat pokud možno stejnou přístrojovou techniku a softwarové nástroje, se kterými budou v rámci své výuky pracovat studenti oboru FTMB a s jejichž využitím se počítá i v nové specializaci zaměřené na environmentální měření a modelování. Takto získané autorovy zkušenosti umožní rozšířit vědeckou činnost PřF UHK v této oblasti, včetně zapojení nadaných studentů PřF, kteří se budou chtít věnovat vědecké práci.

²Pilotní výuku Ramanovy spektroskopie absolvovali na začátku roku 2019 i zahraniční studenti, kteří na KFy PřF UHK studují v rámci programu Erasmus.

3 Ramanova spektroskopie

Ramanovu spektroskopii (RS) řadíme mezi metody molekulové spektroskopie. Tyto metody jsou založeny na interakcích molekul látky s elektromagnetickým zářením, přičemž dochází k výměně přesně vymezených množství (kvant) energie mezi látkou a zářením. Metody molekulové spektroskopie lze využít jak pro identifikaci a určování struktury látek, tak pro jejich kvantitativní analýzu [5, 6]. Uplatnění nacházejí zejména - avšak nikoli výlučně - při analýze organických látek. V porovnání s klasickými chemickými metodami organické analýzy je spektrální měření velmi rychlé, naměřené spektrum navíc poskytuje celou řadu cenných informací o struktuře látky [6, 7].

3.1 Fyzikální princip Ramanovy spektroskopie

Atomy i molekuly v pevných látkách, kapalinách i plynech jsou v neustálém pohybu. U volného atomu se projevuje pouze jeho translační pohyb (tj. časová změna prostorových souřadnic), volná molekula vykazuje kromě translace také rotační pohyb kolem svého hmotného středu a periodický pohyb (vibraci) svých atomů [5, 7].

Při vibracích molekuly se mění vzdálenosti mezi jejími atomy nebo úhly vazeb mezi atomy [7]. Podle charakteru vibračního pohybu lze vibrace zjednodušeně rozdělit na valenční, deformační a skeletální. Při valenčních vibracích probíhá pohyb ve směru vazeb, tudíž se mění meziatomové vzdálenosti, avšak vazebné úhly zůstávají beze změny. Deformační vibrace se naopak vyznačují změnou úhlů vazeb a zachováním vzdáleností mezi atomy. Při skeletálních vibracích dochází ke změnám vazebných úhlů i meziatomových vzdáleností v molekulovém řetězci (přímém, rozvětveném nebo uzavřeném do kruhu) [7, 8].

Poloha všech atomů N -atomové molekuly je jednoznačně určena $3N$ nezávislými parametry (prostorové souřadnice poloh všech atomů molekuly), N -atomová molekula tedy má $3N$ stupňů volnosti. Z tohoto počtu připadají u všech molekul tři stupně volnosti na popis translačního pohybu molekuly jako celku. Rotační pohyb je v případě lineární molekuly charakterizován dvěma stupni volnosti, u nelineární molekuly třemi stupni volnosti. Zbývající stupně volnosti, tedy $3N - 5$ pro lineární

molekuly a $3N - 6$ pro nelineární molekuly, připadají na vibrační pohyb a udávají tak počet základních vibračních stavů³ dané molekuly [5, 7, 8].

Zabývejme se nyní otázkou celkové energie molekuly. Z výše uvedeného vyplývá, že celkovou kinetickou energii molekuly je možno vyjádřit jako součet kinetických energií jejího translačního, vibračního a rotačního pohybu. K celkové energii molekuly dále přispívá energie jejích atomových jader a elektronů v obalu molekuly. Je-li molekula umístěna v poli vnějších sil, dalším příspěvkem k její energii je potenciální energie této molekuly jako celku. Neuvažujeme-li energii atomových jader ani působení vnějších sil na molekulu, lze v prvním přiblížení celkovou energii molekuly E_m zapsat jako součet energie translačního pohybu E_t , vibračního pohybu E_v , rotačního pohybu E_r a energie elektronů v obalu E_e [7]:

$$E_m = E_t + E_v + E_r + E_e. \quad (1)$$

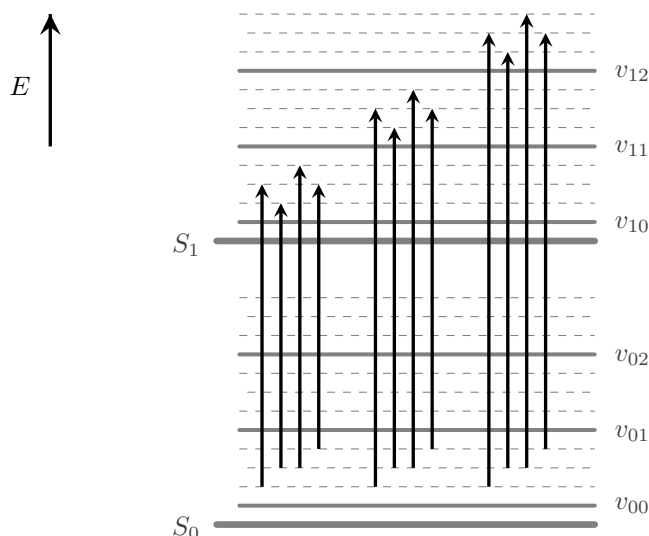
Pouze energie translačního pohybu molekuly se mění spojitě, všechny ostatní energetické příspěvky z rovnice (1) jsou kvantovány a mohou se měnit jen o diskrétní hodnoty, které odpovídají rozdílům energií elektronových, vibračních a rotačních stavů (hladin) dané molekuly. Odhlédneme-li od spojitých změn energie při translačním pohybu, jsou s největšími energetickými změnami spojeny přechody mezi různými elektronovými hladinami molekuly. Menšími energetickými změnami jsou doprovázeny přechody mezi vibračními hladinami, k ještě menším změnám energie dochází při přechodech mezi rotačními hladinami. Rotační energetické hladiny se navíc mohou štěpit na podhladiny⁴, čímž vzniká ještě jemnější struktura přípustných energetických přechodů [7].

Jednotlivé druhy přechodů na sobě nejsou nezávislé. Protože molekula ve kterémkoli vibračním stavu se může současně nacházet v různých stavech rotačních, při každém přechodu mezi dvěma vibračními stavy může dojít také k přechodu mezi různými stavy rotačními. Těmto kombinovaným přechodům se říká rotačně-vibrační. Každý elektronový přechod je doprovázen řadou přechodů vibračních i rotačních, takovéto současně probíhající přechody se někdy označují jako vibronické [7].

³Vibrační stavy jsou v literatuře někdy označovány zkráceně jako vibrace.

⁴Rozštěpení rotačních hladin vzniká např. vlivem jaderných spinů atomů tvořících molekulu či působením vnějších elektrických a magnetických polí.

Obr. 1 schematicky znázorňuje vztah mezi elektronovými, vibračními a rotačními energetickými hladinami molekuly a příklady přechodů mezi nimi.



Obrázek 1: Různé druhy molekulárních energetických hladin a příklady energetických přechodů mezi nimi. S_0 , S_1 - elektronové hladiny; v_{00} , v_{01} , v_{02} - vibrační hladiny při elektronové hladině S_0 ; v_{10} , v_{11} , v_{12} - vibrační hladiny při elektronové hladině S_1 . Přerušované čáry značí rotační hladiny energie, šipkami jsou znázorněny energetické přechody nastávající při absorpci kvant elektromagnetického vlnění (fotonů). Energie E roste směrem nahoru. Zpracováno podle [7].

RS využívá tzv. Ramanův rozptyl záření, který je spojen se změnou rotačních a vibračních stavů molekul. Při Ramanově rozptylu nejprve foton budícího záření dopadne na molekulu, která byla v některém z rotačně-vibračních stavů svého základního elektronového stavu. Energie fotonu je předána této molekule, čímž se molekula dostane do tzv. virtuálního energetického stavu⁵ a foton zanikne. Molekula se téměř okamžitě vrátí z virtuálního stavu do některého ze svých stabilních rotačně-vibračních stavů, přičemž rozdíl energií těchto dvou stavů je vyzářen v podobě fotonu tzv. Ramanova záření (Ramanova fotonu). V případě Ramanova rozptylu se molekula nevrátí do stejného energetického stavu, z něhož byla vybudena, tudíž energie

⁵Virtuální energetické stavy jsou vytvářeny interakcí budícího záření s elektronovým obalem molekuly, energie těchto stavů je určena frekvencí budícího záření.

vyzářeného fotonu se liší od energie fotonu pohlceného a Ramanův rozptyl může být popsán jako nepružná srážka fotonu s molekulou [7].

Mechanismus změny rotačně-vibračního stavu molekuly je možno zjednodušeně vysvětlit z pohledu klasické fyziky. V klasickém přiblížení lze Ramanův rozptyl považovat za interakci elektromagnetické vlny s molekulou, přičemž tato interakce vyvolá polarizaci molekuly. Při polarizaci dochází ke změně rozložení elektronové hustoty v molekule, tudíž i ke změně rovnovážných vzdáleností mezi atomy tvořícími tuto molekulu. Molekula má tendenci zaujmout nové rovnovážné vzdálenosti atomů, což má za následek změnu jejího rotačně-vibračního stavu [5, 7].

Indukovaný dipólový moment \mathbf{p} je úměrný intenzitě elektrického pole \mathbf{E} dopadajícího elektromagnetického vlnění:

$$\mathbf{p} = \alpha \cdot \mathbf{E} \quad (2)$$

(tento vztah platí pro malé intenzity pole). Konstanta úměrnosti α značí polarizovatelnost a vyjadřuje, jak snadno dojde k deformaci elektronového obalu molekuly vlivem vnějšího elektrického pole [5, 7].

Ramanův rozptyl nastává pouze v případě vibrací, při nichž dochází ke změně polarizovatelnosti molekuly⁶ [5, 7]. Tato podmínka (tzv. základní výběrové pravidlo Ramanova rozptylu) [6] se obvykle zapisuje ve tvaru

$$\frac{\partial \alpha}{\partial q} \neq 0, \quad (3)$$

kde q má význam vnitřních souřadnic molekuly⁷.

Změny polarizovatelnosti jsou obvykle způsobovány symetrickými vibracemi, takovéto vibrace jsou tedy aktivní v Ramanově spektru [6].

Dopadem budícího záření na molekuly dochází kromě Ramanova rozptylu také k tzv. Rayleighově rozptylu [7], který lze popsat jako pružné srážky fotonů s moleku-

⁶Tato podmínka se odlišuje od podmínky pro absorpci záření v infračervené oblasti, kterou je nenulová změna dipólového momentu při vibraci molekuly. Změny dipólového momentu typicky nastávají u asymetrických vibrací molekuly.

⁷Vnitřní souřadnice molekuly popisují geometrii uspořádání atomů spojených chemickými vazbami. Lze je zavést různými způsoby, figurují v nich vzdálenosti mezi atomy, úhly vazeb a torze mezi atomovými jádry [9].

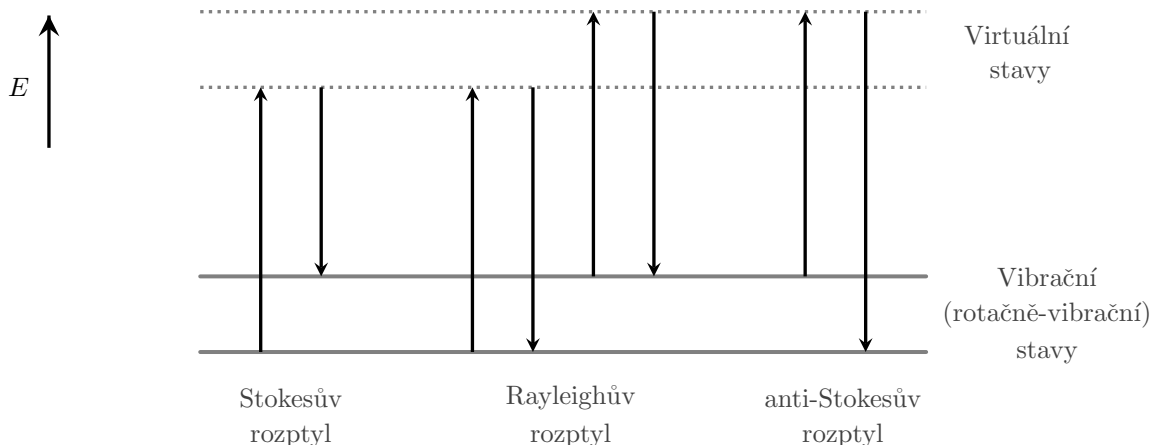
lami. Dopadající foton i v tomto případě způsobí přechod molekuly do virtuálního energetického stavu, avšak molekula se poté vrátí na původní energetickou hladinu, tudíž energie pohlceného a vyzařeného fotonu jsou stejné. Intenzita takto vznikajícího Rayleighova záření je výrazně vyšší než intenzita záření Ramanova (pouze jeden z přibližně $10^6 - 10^8$ rozptýlených fotonů je Ramanův foton), avšak Rayleighovo záření nenesení informaci o rozložení energetických hladin v molekulách zkoumaného vzorku [5].

Princip Ramanova i Rayleighova rozptylu je znázorněn na obr. 2. V tomto obrázku je vidět, že při Ramanovu rozptylu mohou nastat dvě odlišné situace [5, 7]:

- a) Energie původního rotačně-vibračního stavu je nižší než energie rotačně-vibračního stavu, do něž se molekula navrátí z virtuálního stavu. Tento případ je nazýván Stokesův rozptyl, frekvence Ramanova záření je při něm nižší než frekvence záření budícího.
- b) Energie původního rotačně-vibračního stavu je vyšší než energie rotačně-vibračního stavu, do něž se molekula navrátí z virtuálního stavu. Jedná se o tzv. anti-Stokesův rozptyl, frekvence Ramanova záření je v tomto případě vyšší než frekvence záření budícího.

Anti-Stokesův rozptyl má oproti Stokesově rozptylu podstatně nižší intenzitu, což je dáno především závislostí vibračního stavu molekuly na teplotě. Za pokojové teploty je většina molekul v základním vibračním stavu, tudíž Stokesův rozptyl fotonů nastává s větší pravděpodobností, než rozptyl anti-Stokesův. Poměr intenzit Stokesova a anti-Stokesova rozptylu závisí na počtech molekul v základním vibračním stavu a v excitovaných vibračních stavech. Poměr počtu molekul v excitovaném vibračním stavu N_E a počtu molekul v základním vibračním stavu N_0 udává Boltzmannův distribuční zákon [5]

$$\frac{N_E}{N_0} = \frac{g_E}{g_0} \cdot e^{-\frac{E_E - E_0}{kT}}, \quad (4)$$



Obrázek 2: Zjednodušené schéma energetických přechodů při Ramanově a Rayleighově rozptylu. Šipky směřující nahoru znamenají přechody z rotačně-vibračních hladin na virtuální hladiny při absorpci fotonu, opačně orientované šipky mají význam přechodů z hladin virtuálních zpět na hladiny rotačně-vibrační, přičemž dochází k emisi fotonů Ramanova nebo Rayleighova záření. Energie E roste směrem nahoru. Zpracováno podle [5].

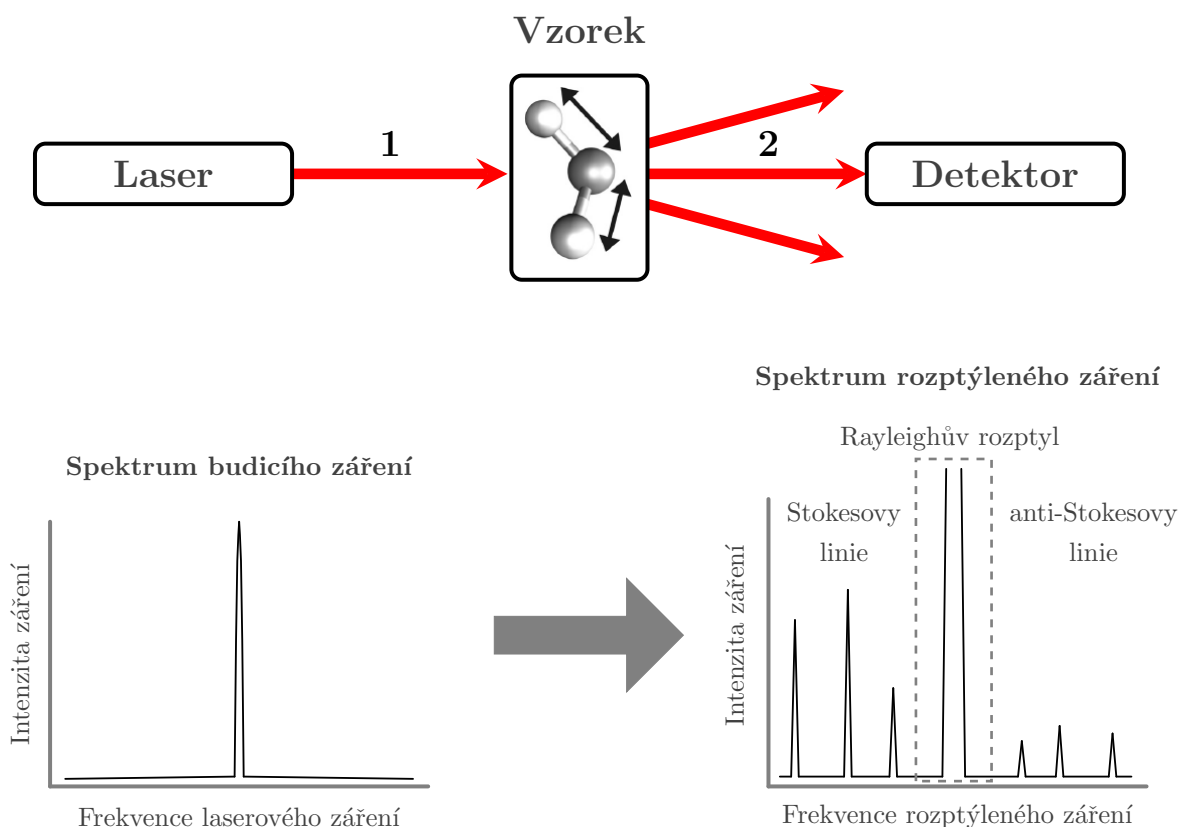
kde g_0 , g_E jsou stupně degenerace⁸ základního a vibračního stavu molekuly, $E_E - E_0$ je rozdíl energií těchto stavů, $k \doteq 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ je Boltzmannova konstanta a T je termodynamická teplota. S rostoucí teplotou se tedy zvyšuje intenzita anti-Stokesova rozptylu na úkor intenzity Stokesova rozptylu.

3.2 Ramanův spektrometr

Pro měření Ramanova rozptylu se využívají Ramanovy spektrometry různých typů, které se liší konkrétním účelem použití, konstrukcí i cenou. Velmi obecné schéma činnosti Ramanových spektrometrů je na obr. 3.

Zdrojem budícího záření je laser [6, 7]. Používají se různé typy laserů, které pracují ve viditelné, blízké infračervené, případně i ultrafialové oblasti elektromag-

⁸Některé druhy molekul mají tu vlastnost, že několika jejich různým vibračním stavům přísluší stejné hodnoty energie. Takovéto stavy se nazývají degenerované a jejich počet je označován jako stupeň degenerace. Většina vibračních stavů má stupeň degenerace 1 (nejsou degenerované), degenerované stavy mohou mít stupeň degenerace 2 nebo 3.



Obrázek 3: Princip Ramanova spektrometru (zpracováno s využitím [10] a[11]).
 1 - monochromatické budicí záření, 2 - polychromatické rozptýlené záření, z něhož část dopadá na detektor. V ilustrativním rozptylovém spektru je přerušovanou čarou vyznačena oblast Rayleighova záření, které bude odfiltrováno.

netického vlnění. Jednoduché spektrometry mají pouze jeden laser (obvykle pevnolátkový či diodový), u složitějších přístrojů je možno si vybrat z několika laserů o různých vlnových délkách, což umožňuje přizpůsobit excitační vlnovou délku řešené problematice [6].

Laserový paprsek dopadá na analyzovaný vzorek a vyvolává na něm Ramanův a Rayleighův rozptyl. Z rozptýleného záření je frekvenčním filtrem odstraněno Rayleighovo záření, následuje detekce zbývající části spektra [5, 6]. Podle způsobu detekce rozptýleného záření se Ramanovy spektrometry dělí do dvou skupin [10]:

- a) **Disperzní Ramanovy spektrometry:** záření dopadá na disperzní prvek (typicky mřížku), který je prostorově rozloží podle jeho vlnových délek. Rozložené záření dopadá na plošný CCD detektor, kterým je zaznamenávána intenzita pro jednotlivé (dostatečně malé) rozsahy vlnových délek.

a) **Ramanovy spektrometry s Fourierovou transformací:** záření dopadá na interferometr, v němž vznikne výstupní vlna s proměnnou intenzitou. Tato vlna dopadá na jednokanálový detektor a takto vzniklý signál je následně Fourierovou transformací převeden z časové oblasti do oblasti frekvenční.

Poznámky k instrumentaci Ramanovy spektroskopie

Pro provádění analýz s vysokými požadavky na přesnost jsou určeny laboratorní spektrometry. Bývají vybaveny vzorkovou komorou, uzpůsobenou pro upevnění různých skleněných vzorkovnic (ampulí, kyvet atp.) pro kapaliny či práškové vzorky. Existují také různé speciální držáky pro pevné (kusové) vzorky či pro měření malých objemů kapalin na kapkovacích destičkách. Tyto spektrometry bývají vybaveny zařízením pro polohování vzorku vůči budicímu laserovému paprsku a sběrné optice rozptýleného záření [6].

U laboratorních spektrometrů lze obvykle softwarově nastavit výkon laseru s ohledem na vlastnosti vzorku (např. aby nedošlo k jeho poškození), požadovanou rychlost analýzy a hodnotu poměru signál/šum. Laboratorní spektrometr může být spojen s optickým mikroskopem, čímž vznikne tzv. mikrospektrometr s rozlišením řádově v mikrometrech i lepším [5, 6].

Pro terénní měření jsou vhodné přenosné Ramanovy spektrometry, určené především k identifikaci neznámých látek. U těchto přístrojů se měření *in situ* provádí pouhým přiložením snímacího nástavce na zkoumaný materiál (příp. na jeho průhledný obal).

Je-li potřeba provádět měření Ramanových spekter v obtížně dostupných místech, např. v chemickém či biotechnologickém reaktoru nebo *in vivo* v těle vyšetřovaného pacienta, ke spektrometru se připojují tzv. Ramanovy sondy založené na vláknové optice [12, 13].

3.3 Spektrum Ramanova rozptylu

Výše popsaným měřením Ramanova rozptylu se získá tzv. Ramanovo spektrum, které zachycuje závislost intenzity detekovaného Ramanova záření na tzv. Ramanově posunu, což je rozdíl frekvencí Ramanova a budicího záření. Velikost Ramanova posunu je dána rozdílem energií rotačně-vibračních stavů, mezi nimiž dochází

k přechodu [6, 7]. Necht' E_1 je energie výchozího, E_V energie virtuálního a E_2 energie výsledného stavu molekuly. Potom pro frekvenci ν_1 budícího fotonu⁹ platí

$$\nu_1 = \frac{E_V - E_1}{h}, \quad (5)$$

kde $h \doteq 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ je Planckova konstanta. Frekvenci ν_2 Ramanova fotonu lze vyjádřit analogicky

$$\nu_2 = \frac{E_V - E_2}{h}. \quad (6)$$

Pro Ramanův posun $\Delta\nu$ pak můžeme psát

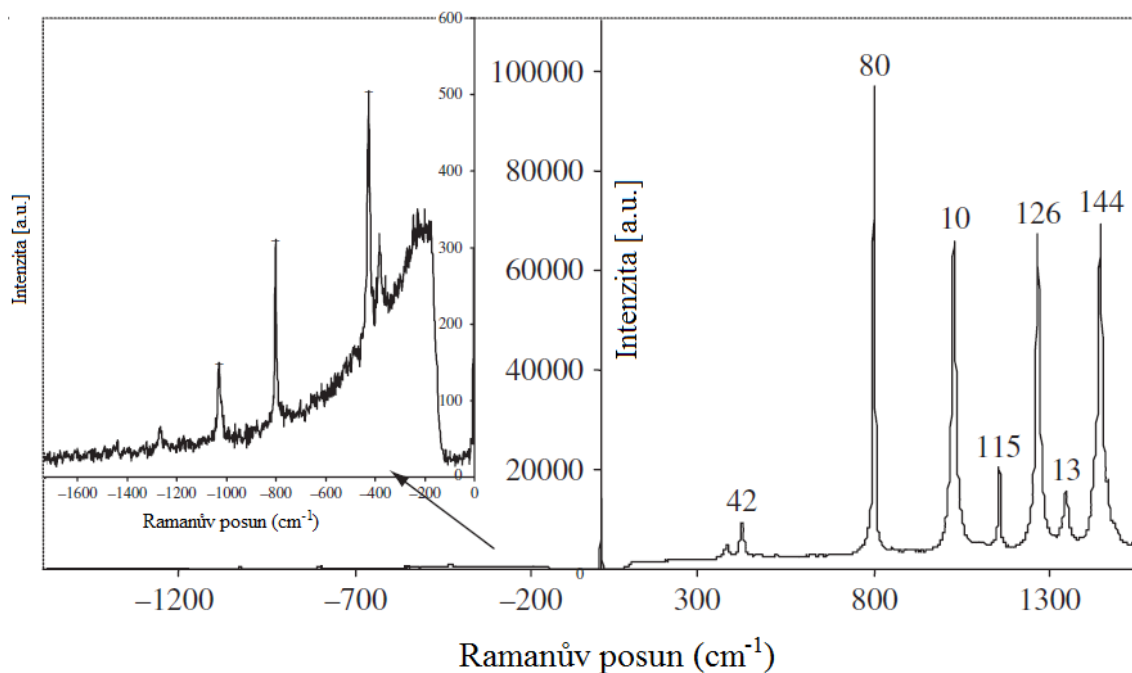
$$\Delta\nu = \nu_1 - \nu_2 = \frac{E_V - E_1}{h} - \frac{E_V - E_2}{h} = \frac{E_2 - E_1}{h}. \quad (7)$$

Kladné hodnoty takto vyjádřeného Ramanova posunu odpovídají Stokesovu a záporné hodnoty anti-Stokesovu rozptylu. V Ramanově spektru se Stokesův rozptyl projevuje jako tzv. Stokesovy linie, anti-Stokesův rozptyl vytváří anti-Stokesovy linie [7].

Ramanův posun je možno vyjadřovat nejen pomocí frekvence, ale též jako rozdíl vlnových délek, vlnočtů¹⁰ nebo energií budícího a Ramanova fotonu [5]. V praxi je často využíván zejména vlnočť, ukázka takového Ramanova spektra je na obr. 4. V tomto spektru je dobře patrných několik Stokesových i anti-Stokesových linií, což vypovídá o tom, že v měřené látce nastává více energeticky odlišných přechodů mezi různými rotačně-vibračními stavy.

⁹Autor si je vědom, že koncept „částicově-vlnového dualismu“ je již překonanou myšlenkou a že objekty mikrosvěta (fotony, elektrony atp.) jsou kvantové objekty, které v moderní kvantové teorii nejsou popsány ani jako klasické částice, ani jako klasické vlny [14]. Přesto je výhodné v některých situacích pohlížet na tyto objekty jako na částice a v jiných situacích jako na vlny. Pro větší přesnost by v takových případech bylo vhodné používat při popisu vlnových vlastností formulace jako např. „frekvence přiřazená fotonu“ místo zkráceného vyjádření „frekvence fotonu“ (obdobně pro popis částicových vlastností), avšak v odborné literatuře se pro zjednodušení a zpřehlednění textu často vyskytují formulace zkrácené. Ze stejných důvodů jsou kratší varianty typu „frekvence fotonu“ používány i v této práci.

¹⁰Vlnočť σ je převrácenou hodnotou vlnové délky λ , tj. $\sigma = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$, kde ν je frekvence záření a c je rychlost světla.



Obrázek 4: Ramanovo spektrum cyklohexanu (upraveno podle [5]). Pravá část spektra (kladná vodorovná poloosa) odpovídá Stokesově rozptylu, jsou zde dobře viditelné Stokesovy linie (peaky). Pro zobrazení anti-Stokesova rozptylu (rámeček vlevo nahoře) bylo potřeba zvětšit měřítko svislé osy, pak je možné v této oblasti vidět anti-Stokesovy linie. Velmi malá intenzita v okolí nulové hodnoty Ramanova posunu je způsobena použitím frekvenčního filtru, který nepropustil záření Rayleighova rozptylu.

Ramanova spektra pevných látek a kapalin jsou ovlivněna interakcemi mezi molekulami v důsledku malých mezimolekulových vzdáleností v těchto látkách. Vzájemné silové působení molekul se projevuje změnou rozložení vibračních stavů, což má za následek změnu polohy či tvaru linií ve spektru [7, 8].

Z Ramanových spekter lze získávat kvalitativní i kvantitativní informace o analyzovaném vzorku látky. Celkový tvar spektra je používán jako tzv. fingerprint („otisk prstu“) dané chemické látky nebo směsi, pomocí něž je možno tuto látku či směs identifikovat [5, 6]. Existují rozsáhlé databáze s Ramanovými spektry, která je možno porovnávat se vzorkem neznámého materiálu a určit tím, o jakou látku se s největší pravděpodobností jedná. Příkladem takové databáze je KnowItAll Raman Spectral Library, kterou na svých webových stránkách [15] nabízí společnost Bio-Rad. Užitím spektrálních databází a speciálních algoritmů lze identifikovat i jednotlivé složky

směsí.

Kvantitativní analýza směsí je typicky prováděna porovnáváním relativních intenzit detekovaného Ramanova záření v místech peaků [5]. V současné době existují softwarové produkty, které nabízejí různé metody kvalitativního i kvantitativního vyhodnocování naměřených dat. Značně komplexní software tohoto druhu prezentuje na svém webu [16] pod názvem LabSpec 6 korporace Horiba, jiným příkladem je software WiRE nabízený firmou Renishaw [17].

3.4 Možnosti využití Ramanovy spektroskopie

RS má široké možnosti použití ve vědě i v technické praxi. Díky zlepšující se cenové dostupnosti Ramanových (mikro)spektrometrů a rozvoji nových přístupů k měření je tato metoda v posledních letech na vzestupu. RS je možno vyšetřovat látky v pevném, kapalném i plynném skupenství [7]. Měření trvá řádově minuty, bývá nedestruktivní a obvykle nevyžaduje žádnou speciální úpravu vzorku [6].

Významnou oblastí aplikací RS je charakterizace technicky významných materiálů, jako jsou např. materiály na bázi uhlíku (grafitické vrstvy, přírodní i umělé diamanty, saze atp.) či křemíku (materiály používané v polovodičové elektronice) [6]. Nemalemu zájmu se těší mj. studium uhlíkových nanomateriálů, jehož přehled podává příspěvek [18]. V článku [19] je popsáno použití RS při přípravě vícevrstevných struktur na bázi křemíku hojně používaných v mikroelektronice (pomocí RS lze měřit vnitřní pnutí v tomto materiálu, které může vést k jeho poškození).

Pomocí RS je možno provádět také analýzu anorganických materiálů obsahujících těžké prvky, což činí tuto metodu použitelnou pro environmentální výzkumy v oblasti kontaminace životního prostředí toxickými kovy. Značná pozornost je věnována detekci rtuti v různých složkách životního prostředí, viz např. [20].

V zemědělství se RS uplatňuje při získávání informací o rostlinných buňkách a tkáních pro hodnocení kvality zemědělských produktů [21]. Potravinářský průmysl využívá RS např. pro analýzu kontaminantů v potravinách, různé přístupy k detekci pesticidů a antibiotik v potravinách pomocí RS jsou popsány v článku [22].

Díky tomu, že RS umožňuje zjišťovat chemické složení biologických vzorků, je využívána také v medicíně. Biochemické změny spojené s nemocí vedou v některých

případech k významným změnám Ramanova spektra buněk a tkání. Proto je RS používána k diagnostice chorob, stanovování prognózy a hodnocení účinnosti nových léčebných terapií. Vyšetřením metodou RS lze např. rozpoznat zhoubný nádor prsu nebo rakovinu plic i dalších orgánů. Analyzovány mohou být nejen tkáně, ale také tělní tekutiny, např. krev, moč či slzy. Podrobnosti o lékařských aplikacích RS podává publikace [23].

RS se uplatňuje také ve farmacii. V průběhu vývoje nového léku se studuje např. to, jak závisí procesy jeho degradace na metodě jeho přípravy, přítomnosti různých pomocných látek a vnějších podmínkách. Provádí se též mikrostrukturální charakterizace nosičů léčiv, tj. materiálů, kterými jsou dopravována léčiva na místo určení v těle pacienta. Při kontrole kvality vyrobených léčiv slouží RS např. k měření obsahu a prostorového rozložení účinné látky v tabletě, v neposlední řadě je využívána i pro odhalování padělků léčiv [24].

Řadu aplikací má RS i ve forenzních vědách, mj. při identifikaci zbytků střelného prachu, zápalných látek (využívá se při vyšetřování žhářství), výbušnin, nelegálních narkotik, inkoustů používaných při padělání dokumentů [25] apod. Využitím RS při ověřování pravosti dokumentů se zabývá článek [26], jehož autorům se podařilo pomocí RS rozlišit razítkovací inkousty od různých výrobců a také určit pořadí, v němž byly různými druhy psacích potřeb do dokumentu připsány protínající se čáry. Publikace [27] podává přehled současných možností použití RS pro identifikaci kokainu a dalších drog, stanovení jejich koncentrace ve vzorcích a odhalení případných příměsí. Je zde mj. zdůrazněno, že pomocí přenosných Ramanových spektrometrů lze provádět rychlé analýzy přímo „na místě činu“ při zadržení drog.

Přenosné Ramanovy spektrometry jsou využívány i pro detekci dalších nebezpečných látek, které mohou např. unikat při havárii či být nástrojem teroristického útoku. Velmi rozšířeným přenosným spektrometrem je FirstDefender RM firmy Thermo Fisher Scientific [28] (viz obr. 5), který je přizpůsoben pro použití nekvalifikovanou obsluhou (např. požárníky) a vyznačuje se zvýšenou mechanickou odolností potřebnou pro práci v náročném terénu. Analýza látek je prováděna automaticky srovnáváním změřeného spektra se spektry uloženými v databázi. Výrobce uvádí, že identifikace neznámé látky tímto přístrojem trvá řádově sekundy.



Obrázek 5: Přenosný Ramanův spektrometr FirstDefender RM a ukázka jeho využití při identifikaci neznámé látky (upraveno podle [28]).

Příležitosti pro využití RS skýtá rovněž archeologie a umění. Analyzovány jsou rozličné materiály historických předmětů: pigmenty, barviva, papír, sklo, keramika, pryskyřice atp. Konkrétním příkladem je použití RS při zjišťování původu jantarových šperků vykopaných v pohřební komoře nedaleko polské Wroclawi [29]. Porovnáním Ramanova spektra těchto jantarů se spektry jantarů známého původu bylo odhaleno, že šperky pocházejí z regionu Baltského moře.

Článek [30] popisuje měření Ramanových spekter jako součást analýzy inkoustu tištěných historických knih. Kromě inkoustu bylo zkoumáno také složení barviv, kterými byly kolorovány ilustrace v těchto knihách. Protože v ilustracích nebyla nalezena žádná barviva z pozdější doby, nebylo možno vyloučit, že kolorování bylo provedeno bezprostředně po tisku.

Při analýzách vzácných historických předmětů a uměleckých děl je vysoce ceněna nedestruktivnost RS (přestože v některých případech je při měření potřeba nastavit dostatečně nízký výkon budicího laseru, aby nedošlo k poškození analyzovaného předmětu).

Z výše uvedeného přehledu je zřejmé, že RS je uplatnitelná v mnoha rozličných oblastech. Při jejích některých aplikacích je však potřeba (či alespoň vhodné) používat speciální přístupy, jako je např. povrchem zesílená Ramanova spektrosko-

pie (tzv. SERS, tj. Surface-Enhanced Raman Spectroscopy¹¹), časově rozlišený Ramanův rozptyl, nelineární RS atd. Tyto přístupy mohou vyžadovat speciální přípravu vzorků či technické vybavení, které není dostupné všem pracovištím.

Podrobnosti o pokročilých technikách RS podává např. publikace [5], v následující podkapitole se alespoň stručně zmíníme o metodě SERS, která se již od svého vzniku v roce 1974 těší značné pozornosti.

3.5 Povrchem zesílená Ramanova spektroskopie

Tato podkapitola čerpá z knihy [31].

Metoda SERS je založena na zvýšení intenzity Ramanova rozptylu, které je způsobeno především elektromagnetickou interakcí záření s kovovým substrátem, na němž je umístěn zkoumaný vzorek. Substrát obsahuje nejčastěji stříbro či zlato a bývá jemně strukturován, může být např. ve formě koloidních částic. Aby toto zesílení Ramanova rozptylu nastalo, musí být molekuly vzorku adsorbovány na substrátu nebo se musí nacházet v jeho dostatečné blízkosti. Důvodem obliby SERS je zejména její velmi vysoká citlivost (dokáže detekovat i jednotlivé molekuly).

Velikost zesílení udává tzv. analytický faktor zesílení (AEF - Analytical Enhancement Factor), který vyjadřuje, kolikrát je Ramanův signál (tj. měřená intenzita Ramanova rozptylu) získaný metodou SERS zesílen oproti signálu získanému běžným Ramanovým rozptylem (bez použití substrátu) za jinak stejných podmínek. AEF nabývá hodnot řádově 10^3 až 10^6 .

Nevýhodou AEF je, že jeho hodnota závisí na množství adsorbovaných molekul zkoumaného vzorku. AEF tedy nepopisuje, jakou schopnost zesílit Ramanův signál má substrát jako takový bez závislosti na adsorpci konkrétního vzorku. Pro porovnávání zesilovací schopnosti různých substrátů se proto používá faktor zesílení označovaný zkratkou SSEF (SERS Substrate Enhancement Factor), definovaný vztahem

¹¹Zkratkou SERS je často označován také tzv. povrchem zesílený Ramanův rozptyl (Surface-Enhanced Raman Scattering), na kterém je tato metoda založena.

$$\text{SSEF} = \frac{I_{SERS}}{I_{RS}} \cdot \frac{N_{Vol}}{N_{Surf}}, \quad (8)$$

kde I_{SERS} je intenzita Ramanova rozptylu při použití substrátu, I_{RS} je intenzita běžného Ramanova rozptylu, N_{Vol} značí počet molekul vzorku v rozptylovém objemu při klasické RS, a N_{Surf} má význam počtu molekul vzorku adsorbovaných na substrátu v rozptylovém objemu při SERS.

Kromě uvedených faktorů zesílení existují i další, jinak definované (viz např. [31], [32]). V této souvislosti je vhodné upozornit, že terminologie týkající se faktorů zesílení SERS není zcela ustálena.

3.6 Vzdělávání v oblasti Ramanovy spektroskopie

RS je vyučována v přírodovědně a technicky zaměřených oborech tuzemských i zahraničních vysokých škol. V České republice je výuka RS zavedena např. na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity v Brně, Přírodovědecké fakultě Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích nebo na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, z nedalekého zahraničí jmenujme alespoň polskou Uniwersytet Wrocławski a Slovenskou technickou univerzitu v Bratislavě. Kromě pravidelné školní výuky RS lze navštěvovat také různé jednorázové kurzy RS určené pro širší odbornou veřejnost či pro uživatele spektroskopů určité firmy.

3.6.1 Školní výuka Ramanovy spektroskopie

Stejně jako výuku kteréhokoli jiného tématu, i školní výuku RS lze pojmut různými způsoby. V následujících odstavcích je uvedeno několik přístupů, které byly publikovány v odborných časopisech a sbornících.

V příspěvku [33] je popsána praktická výuka základů RS, při které studenti pracují s laboratorní aparaturou navrženou pro výukové účely. Nejprve zjišťují vliv temného proudu použitého CCD detektoru rozptýleného záření na měřené spektrum a naučí se odstranit vliv temného spektra na výsledky měření Ramanova rozptylu. Následně provedou kalibraci spektrometru, ověří linearitu detektoru a určí, za jakých podmínek nastává jeho saturace. Mimoto změří také spektrální charak-

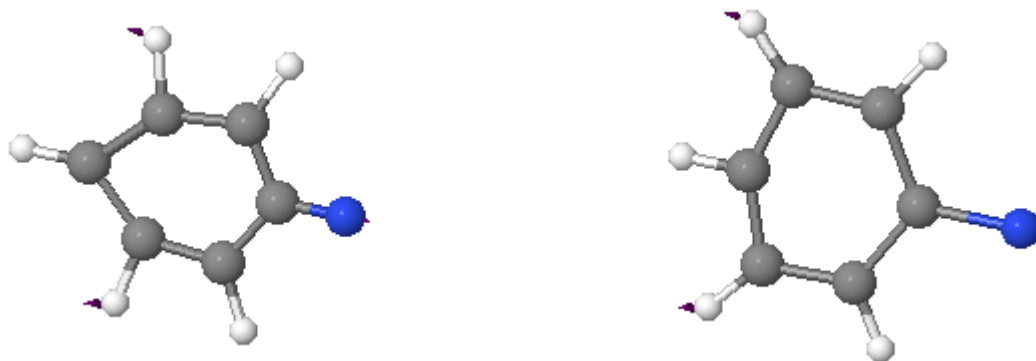
teristiku použitého vrubového filtru, který slouží k odstranění záření Rayleighova rozptylu.

Pro pochopení souvislosti mezi strukturou a Ramanovým spektrem materiálu jsou měřeny uhlovodíky substituované chlorem CH_2Cl_2 , CHCl_3 a CCl_4 , protože jejich spektra jsou relativně snadno analyzovatelná. Dále je určována koncentrace ethanolu ve vodném roztoku (studenti si za tím účelem mají přinést vzorek alkoholického nápoje). Studenti také mohou zjišťovat poměr výšek (intenzit) odpovídajících si Stokesových a anti-Stokesových linií při určité teplotě vzorku.

Jiné laboratorní cvičení je popsáno v článku [34]. Výuka se zde zaměřuje na povrchem zesílený Ramanův rozptyl s využitím nanočástic stříbra jako adsorbentu. Studenti nejprve připraví nanočástice stříbra modifikovanou metodou podle Creightona, která spočívá v redukcí dusičnanu stříbrného (AgNO_3) tetrahydridoboritanem sodným (NaBH_4) [35]. Takto připravené nanočástice budou sloužit jako substrát pro SERS. Druhým úkolem je určit faktory zesílení AEF a SSEF tohoto substrátu, přičemž jako testovací vzorek je využito organické barvivo Rhodamin 6G. Splnění tohoto úkolu vyžaduje změřit klasický Ramanův rozptyl Rhodaminu 6G, zesílený Ramanův rozptyl molekul tohoto barviva adsorbovaných na substrátu a fluorescenční emisní spektrum tohoto barviva (za účelem odhadnutí množství adsorbovaných molekul). Při tomto experimentu se studenti naučí základům měření metodou SERS a zdokonalí se v používání souvisejících laboratorních pomůcek a přístrojů.

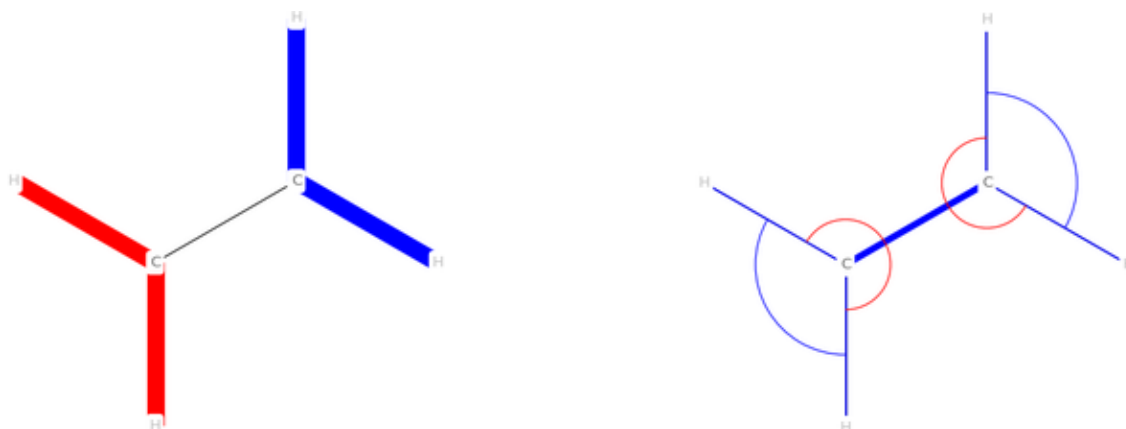
Užitečným doplňkem praktických laboratorních cvičení může být vhodně zvolený výukový software, například některý z programů umožňující vizualizovat molekulární vibrace. Takovými programy jsou mj. Molden [36] či Jmol [37], v nichž lze spouštět názorné trojrozměrné simulace vibrujících molekul. Na obrázku 6 jsou zachyceny ukázky ze simulace prováděné v programu Jmol.

Za účelem lepšího pochopení molekulárních vibrací byl vytvořen program QVibeploť [39], který zobrazuje vibrační módy zvolené molekuly. Pro každý vibrační mód jsou znázorněny změny délek vazeb mezi atomy, vazebných úhlů i torzí, k nimž dochází při vibraci molekuly. Vizualizace jsou založeny na strukturním vzorci molekuly, jak je vidět na obr. 7. QVibeploť je open-source software určený pro operační



Obrázek 6: Deformace molekuly fenylnitrenu vizualizovaná programem Jmol [38].

system Windows, jeho podrobnější popis a odkaz na stažení je uveden na adrese <http://vibepplot.sf.net>.



Obrázek 7: Vizualizace valenční vibrace (vlevo) a valenčně-deformační vibrace (vpravo) molekuly ethenu programem QVibepplot. Amplituda změny délky vazby při valenční vibraci je znázorněna tloušťkou příslušné úsečky, amplituda změny úhlu při deformační vibraci je úměrná poloměru příslušného oblouku. Červená a modrá barva rozlišují směr pohybu.

Článek [40] představuje, jakým způsobem lze propojit výuku kvantové teorie, matematického modelování a RS. Nejdříve je matematickým modelem založeným na kvantové teorii předpovězen tvar Ramanova spektra určité látky (konkrétně se jednalo o dichlorethanové izomery a methanol), spektrum této látky je následně změřeno Ramanovým spektrometrem a porovnáno s výsledkem výpočtu. Kromě

výpočtů a měření Ramanových spekter jsou obdobným způsobem získávána infračervená spektra týchž látek, což umožňuje demonstrovat analogie i rozdíly mezi Ramanovou a infračervenou spektroskopií.

Studenti mají při tomto cvičení také možnost zkoumat, jaký vliv na spektrum chemické látky má záměna izotopů vodíku ^1H za izotopy ^2H (deuterium).

Přínosem tohoto didaktického přístupu je podle autorů nejen lepší pochopení metod vibrační molekulové spektroskopie, ale též předávání poznatků o matematickém modelování (např. je možno porovnávat vliv různých modelů na výpočetní náročnost a přesnost výpočtu).

3.6.2 Kurzy Ramanovy spektroskopie

V České republice pořádá kurzy zaměřené na Ramanovu spektroskopii a příbuzné metody Spektroskopická společnost Jana Marka Marci (SSJMM), Výzkumný ústav pro farmacii a biochemii s.r.o. (VUFB) a také některé firmy, které se zabývají prodejem spektroskopické techniky.

SSJMM pravidelně organizuje kurzy Měření vibračních spekter a Interpretace vibračních spekter [41], které obsahují kromě jiného i výuku Ramanovy spektroskopie. VUFB na svých webových stránkách prezentuje kurz Molekulární spektroskopie [42], věnovaný teorii i konkrétním aplikacím RS i dalších spektrálních metod.

Různé kurzy zaměřené na měření a interpretaci molekulárních vibračních spekter pořádá společnost Nicolet CZ [43]. V její nabídce jsou také kurzy práce se specializovanými softwarovými nástroji pro ovládání spektrometrů a analýzu získaných dat. Jistou nevýhodou je, že kurzy zajišťované společností Nicolet CZ jsou určeny pouze pro majitele spektrometrů od této společnosti. Na jejím webu [44] je alespoň možné získat přístup k výukovým videím o infračervené a Ramanově spektroskopii, případně si domluvit internetový seminář.

Obdobná školení nabízí také společnost Optik Instruments [45]. Tato školení jsou přístupná všem zájemcům, avšak jsou určena především zákazníkům a obchodním partnerům této společnosti. Různá školení RS - opět cílená na zákazníky - lze domluvit také u firmy Renishaw [46].

3.6.3 Autorem navržené úlohy na Ramanovu spektroskopii

Pro studenty oboru FTMB a nově připravované environmentálně zaměřené specializace autor navrhl tři laboratorní úlohy na měření Ramanových spekter. Tyto úlohy navazují na přednášku, která vychází z výukového textu uvedeného v podkapitolách 3.1 až 3.5 této práce. Přednáška je připravena na dvě vyučovací hodiny, následným laboratorním úlohám je věnováno celkem šest vyučovacích hodin.

Cílem úloh je seznámit studenty se základy používání Ramanova spektrometru XploRA PLUS s důrazem na analýzu pevných vzorků. Vzhledem k nízkému počtu studentů (obvykle 1 až 6 studentů ve skupině) probíhají cvičení společně pro celou skupinu pod stálým dohledem vyučujícího. Vyučující předvádí a komentuje prováděné kroky a nechává jednotlivé studenty dělat úkony, u nichž nehrozí zvýšené riziko poškození spektrometru. Rizikovým úkonem, který bude provádět pouze vyučující, je především práce s objektivem „100x“, neboť při ní hrozí poškození tohoto objektivu v důsledku jeho kontaktu se vzorkem.

Protože při cvičeních má být stále přítomen vyučující, nejsou návody k úlohám rozepsány do úplných detailů. Návody mají poskytovat přehlednou osnovu práce, přesný postup vysvětluje a předvádí vyučující.

První úloha je zaměřena na základní dovednosti práce s Ramanovým spektrometrem, které budou využívány při řešení úloh následujících. Návod k této úloze je proto rozepsán podrobněji než návody k ostatním úlohám. Předmětem druhé úlohy je studium vlivu struktury a prvkového složení zkoumaného materiálu na Ramanovo spektrum, v poslední úloze se studenti naučí pracovat s databází Ramanových spekter a seznámí se s ramanovským mapováním distribuce látek ve vzorku.

Výuka základů Ramanovy spektroskopie, kterou autor zavedl v akademickém roce 2018/2019, byla evaluována metodou polostrukturovaného skupinového rozhovoru se zúčastněnými studenty 3. ročníku oboru FTMB. Cílem bylo obdržet od studentů zpětnou vazbu na výuku RS, a získat tak podněty ke zdokonalení výuky RS pro příští akademický rok. Stejně pojatou výuku absolvovali též zahraniční studenti, kteří na Katedře fyziky studují v rámci programu Erasmus. I s těmito studenty byl veden polostrukturovaný skupinový rozhovor, jehož vyhodnocení bylo následně porovnáno s vyhodnocením rozhovoru se studenty domácími.

Výsledky vyhodnocení obou skupinových rozhovorů jsou uvedeny v kapitole 7, návody k laboratorním úlohám lze nalézt v příloze A.

4 Modelování produkce bioplynu v bioplynových stanicích

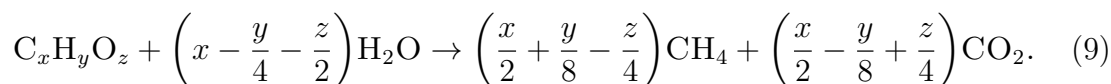
Tato kapitola vychází z autorovy publikace [47], která se zabývá výukou tohoto tématu.

V rámci harmonizace společné zemědělské politiky Evropské unie je v posledních letech v řadě evropských států podporována výstavba zemědělských bioplynových stanic [48, 49]. Týká se to také česko-polské přeshraniční oblasti, v níž se nacházejí velké plochy zemědělské půdy, jež mohou být využívány k zásobování bioplynových stanic biomasou. Výroba bioplynu je proto i ve východočeském regionu aktuálním tématem, kterému chceme v rámci výuky na KfFy PřF UHK věnovat pozornost.

4.1 Teoretické základy tvorby bioplynu

Bioplyn vzniká ze vstupního organického substrátu při tzv. anaerobní fermentaci, což je složitý biochemický proces probíhající za nepřítomnosti vzdušného kyslíku. Na anaerobní fermentaci se podílí několik typů mikroorganismů z biologických říší *Bacteria* a *Archea*, přičemž produkty jedné skupiny mikroorganismů jsou využívány další skupinou mikroorganismů atd. Biochemické přeměny nastávající při anaerobní fermentaci jsou vzájemně provázány takovým způsobem, že nedochází k hromadění meziproductů [50]. Anaerobní fermentace může probíhat nejen ve fermentorech bioplynových stanic, ale i spontánně v přírodě (např. na dně moří a jezer) [51].

Bioplyn je tvořen především metanem a oxidem uhličitým. Základní teoretická stechiometrická rovnice popisující produkci bioplynu z organické sloučeniny $C_xH_yO_z$ (x, y, z jsou počty atomů prvků C, H, O) má tvar [52]:



Tato rovnice říká, že substrát reaguje s vodou a vzniká metan a oxid uhličitý. Obsah metanu ve vyprodukovaném bioplynu závisí na složení výchozího substrátu a fyzikálně-chemických podmínkách ve fermentoru: může činit 50 obj. %, ale i výrazně více či méně. Protože reálné substráty se skládají nejen z uhlíku, vodíku a

kyslíku, bioplyn v praxi obsahuje i další plynné složky, např. molekulární dusík (N_2) a sirovodík (H_2S). Typickou příměsí je také plynný kyslík (O_2) [53].

Podle současného pojetí probíhá proces tvorby bioplynu ve čtyřech fázích, které se nazývají hydrolyza, acidogeneze, acetogeneze a metanogeneze [54]:

Při hydrolyze nastává dekompozice polymerních materiálů (polysacharidů, lipidů, proteinů) na monomery či oligomery, na tomto procesu se podílí extracelulární enzymy hydrolytických bakterií. Rychlost hydrolyzy a její stupeň se liší pro různé substráty: hemicelulóza a celulóza cukrů jsou hydrolyzovány snadno, zatímco pektiny a škroby vyžadují delší dobu a lignin je prakticky nehydrolyzovatelný. Stupeň hydrolyzy proteinů je nižší, než je tomu u cukrů, a často též nižší než u tuků. Pokud jsou jako vstupní substrát použity obtížně odbouratelné materiály, stává se hydrolyza limitujícím faktorem anaerobní fermentace, a tudíž i produkce bioplynu.

Na hydrolyzu navazuje acidogeneze, při níž se uplatňují fakultativně či striktně anaerobní bakterie¹². V průběhu acidogeneze se produkty hydrolyzy rozkládají na nižší mastné kyseliny, oxid uhličitý a vodík.

Následuje acetogeneze, při které vznikají kyselina octová, elementární vodík a oxid uhličitý.

Poslední fází je metanogeneze, jejímž produktem je bioplyn. Na metanogenezi se podílejí striktně anaerobní metanogenní mikroorganismy spadající do říše *Archea*, které údajně patří k nejstarším organismům na Zemi.

Pro anaerobní fermentaci v zemědělských bioplynových stanicích se používají substráty z užitkových rostlin (např. z kukuřice) i organické zbytky ze zemědělské výroby a potravinářského průmyslu [49, 50, 55, 56]. Bioplyn produkovaný ze zemědělských substrátů obvykle obsahuje pouze malá množství nežádoucích příměsí, jeho čištění je tedy snadnější v porovnání s čištěním bioplynu vyráběného z jiných substrátů, jako jsou zbytkové sedimenty odpadních vod nebo skládkové materiály [57].

¹²Fakultativně anaerobní bakterie jsou schopné žít i za přítomnosti kyslíku, zatímco bakterie striktně anaerobní vyžadují prostředí, které neobsahuje žádný či téměř žádný kyslík.

4.2 Základy reakční kinetiky tvorby bioplynu

Bioplyn může být produkován dvěma principiálně odlišnými způsoby: diskontinuálním (vsádkovým) procesem, nebo kontinuálním (průtokovým) procesem.

4.2.1 Vsádkový proces výroby bioplynu

Při vsádkovém procesu je substrát do fermentoru dopraven jednorázově na začátku fermentace a poté již není doplňován, bioplyn se tedy vytváří pouze z tohoto výchozího množství substrátu.

Zabývejme se nejprve otázkou, jak při vsádkovém procesu závisí množství substrátu ve fermentoru na čase. Rozklad substrátu probíhá při hydrolýze, jejíž kinetiku lze popsat diferenciální rovnicí [58, 59, 60]:

$$\frac{dS}{dt} = -k_1 \cdot S \cdot X, \quad (10)$$

kde S je koncentrace hydrolyzovaného substrátu (vyjadřována v gramech substrátu na dm^3 hmoty ve fermentoru), t je čas, k_1 je rychlostní konstanta hydrolýzy (její hodnota je určena podmínkami ve fermentoru) a X je parametr vyjadřující vliv koncentrace mikroorganismů katalyzujících reakci. Časová změna koncentrace substrátu tedy závisí na první mocnině jeho okamžité koncentrace. Položíme-li pro jednoduchost $X = 1$ a zintegrujeme tuto rovnici, dostaneme vztah pro závislost koncentrace substrátu na čase

$$S = S_0 \cdot e^{-k_1 t}, \quad (11)$$

kde S_0 značí počáteční koncentraci substrátu. Koncentrace substrátu tedy bude s časem exponenciálně klesat.

Závislost výtěžku metanu na čase je možno zjednodušeně vyjádřit diferenciální rovnicí [58, 60]:

$$\frac{dV_B}{dt} = B_0 \cdot k_4 \cdot e^{-k_4 t}, \quad (12)$$

kde V_B je výtěžek metanu v čase t (udáván v dm^3 metanu na gram vstupního substrátu), k_4 je kinetický parametr a B_0 maximální výtěžek metanu ze vsádkového procesu. Integrací této rovnice dostaneme

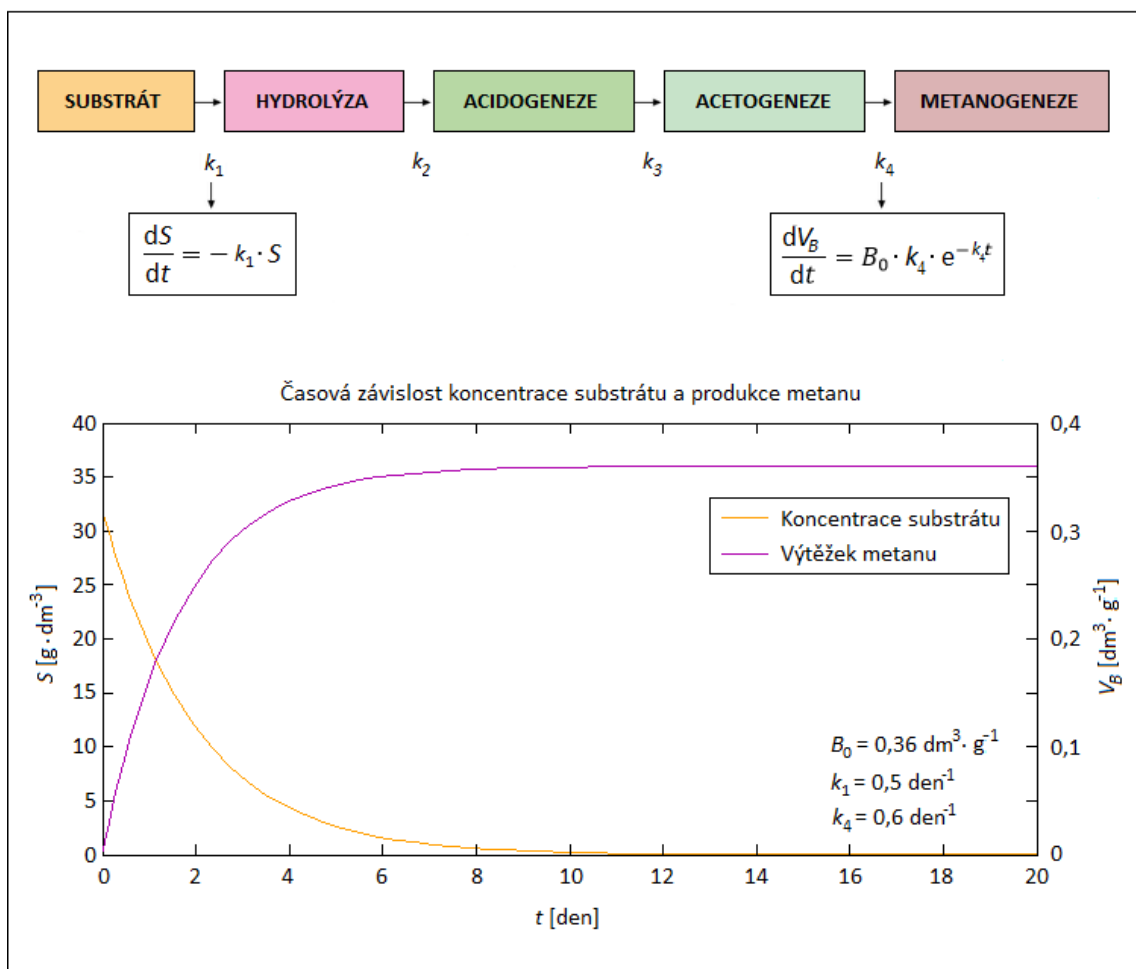
$$V_B = B_0 \cdot \left(1 - e^{-k_4 t}\right). \quad (13)$$

Hodnota B_0 je limitou výtěžku pro čas jdoucí k nekonečnu:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V_B = \lim_{t \rightarrow \infty} \left[B_0 \cdot \left(1 - e^{-k_4 t}\right) \right] = B_0. \quad (14)$$

Úbytek vstupního substrátu a současný vznik metanu při vsádkovém procesu jsou graficky znázorněny na obr. 8. Tento matematický model je však značně zjednodušený, křivka znázorňující výtěžek metanu roste v prvních několika dnech procesu rychleji, než by odpovídalo skutečné produkci metanu. Měřená funkční závislost výtěžku metanu na čase má na začátku fermentace konvexní průběh, který až po několika dnech přechází v průběh konkávní. Tato funkce tedy obsahuje inflexní bod, který se v grafu na obr. 8 nevyskytuje.

Uvedený rozdíl je způsoben tím, že použitý matematický model v sobě nezahrnuje popis procesů probíhajících při spouštění fermentoru. Ve fermentoru se totiž nejdříve musí rozmnožit fermentační mikroorganismy, což zpomalí počáteční fázi produkce bioplynu.



Obrázek 8: Děje probíhající při vsádkové výrobě bioplynu (upraveno podle [47]).

4.2.2 Kontinuální proces výroby bioplynu

Při výrobě bioplynu ze zemědělských substrátů se nejčastěji využívá technologie nazývaná mokrá anaerobní fermentace [61, 62], která spočívá v kontinuálním (či téměř kontinuálním) pomalém přivádění substrátu do fermentoru za současného odvádění fermentačních zbytků. Tím je zajištěn dostatečný přísun živin po celou dobu fermentace a odebírání nežádoucích metabolitů, které inhibují růst fermentačních mikroorganismů. Tento proces nepřetržitého průtoku materiálu je charakterizován tzv. dobou zdržení H [den], což je průměrná doba setrvání elementu substrátu ve fermentoru.

Výtěžek metanu při kontinuální výrobě bioplynu z obvyklých zemědělských substrátů s převahou hovězí kejdy je možno počítat pomocí Chen-Hashimotova

matematického modelu, jehož základní rovnice má tvar [63, 64]:

$$V_M = B_0 \cdot \left(1 - \frac{K}{H \cdot \mu_{max} + K - 1} \right). \quad (15)$$

V_M je objemová produkce metanu (vyjadřovaná v m³ metanu na kg substrátu), B_0 značí maximální výtěžek metanu z použitého substrátu (závisí na teplotě a typu substrátu, lze jej určit vsádkovým experimentem), H je doba zdržení, K je Hashimotova kinetická konstanta a μ_{max} maximální růstová rychlost mikroorganismů [den⁻¹]. Hodnoty K a μ_{max} pro různé podmínky byly zjištěny v laboratorních studiích.

4.3 Výuka modelování tvorby bioplynu

Výuka zaměřená na matematické modelování produkce bioplynu je značně specializovanou záležitostí, které patrně není věnována přílišná pozornost v ČR ani v zahraničí. Přestože publikací týkajících se modelování výtěžku bioplynu z bioplynových stanic či laboratorních experimentů je celá řada, o vzdělávání v této oblasti se autorovi podařilo nalézt pouze málo relevantních informací.

Za zmínku stojí článek [65], v němž je představen softwarový simulátor produkce bioplynu v bioplynové stanici. Tento simulátor umožňuje modelovat proces výroby bioplynu z několika vzájemně provázaných hledisek: biologického (působení mikroorganismů při anaerobní fermentaci), fyzikálně-chemického (teplota a pH substrátu atp.) a „fermentorového“ (přítok a odtok zpracovávaného materiálu a pomocných tekutin, objem vytvořeného bioplynu, koncentrace metanu a oxidu uhličitého v bioplynu atd.). Při modelování je zohledněno též řízení celého procesu (činnost senzorů a aktuátorů) a je započítán i vliv dalších prvků bioplynové stanice, jako jsou ventily, potrubí či nádrže.

Simulátor může být nakonfigurován pro různé typy bioplynových stanic a složení substrátu; je určen pro návrh a optimalizaci technologického procesu výroby bioplynu i pro využití v průmyslovém a akademickém vzdělávání.

Jiným příkladem obdobně zaměřeného simulačního softwaru je komerční produkt SIMBA#biogas [66] firmy inCTRL Solutions Inc. Jedná se o aplikaci určenou pro modelování kontinuálního procesu anaerobní fermentace zemědělských i jiných substrátů, která umožňuje provádět návrh systému řízení bioplynové stanice a řešit

rozličné provozní záležitosti. Firma SIMBA#biogas rovněž nabízí školení práce s tímto simulátorem [67]

Autorem navržené úlohy na modelování produkce bioplynu

Za účelem lepšího pochopení výše uvedených základů reakční kinetiky tvorby bioplynu bylo pro studenty PřF UHK vytvořeno několik úloh na výpočty týkající se produkce bioplynu. Zadání i řešení těchto úloh jsou uvedena na následujících stránkách.

Úloha 1: Časová závislost koncentrace substrátu při hydrolýze

Počáteční koncentrace substrátu S_0 při vsádkovém experimentu je $32 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Rychlostní konstanta hydrolýzy $k_1 = 0,5 \text{ den}^{-1}$, předpokládáme konstantní (jednotkovou) koncentraci mikroorganismů katalyzujících reakci.

Úkoly:

- Vypočtete hodnoty koncentrace substrátu S po 2, 4, 8 a 15 dnech.
- Zjistěte, za jak dlouho se koncentrace substrátu S sníží na čtvrtinu její původní hodnoty.

Řešení:

- Hydrolýza je popsána diferenciální rovnicí

$$\frac{dS}{dt} = -k_1 \cdot S,$$

kde t je čas. Zintegrováním této rovnice dostaneme

$$S = S_0 \cdot e^{-k_1 t}.$$

Do této rovnice dosadíme $S_0 = 32 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$, $k_1 = 0,5 \text{ den}^{-1}$ a za t postupně 2, 4, 8 a 15 dní. Po vyčíslení obdržíme hledané hodnoty koncentrací substrátu $S(t = 2) \doteq 11,77 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$, $S(t = 4) \doteq 4,33 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$, $S(t = 8) \doteq 0,59 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$ a $S(t = 15) \doteq 0,02 \text{ g} \cdot \text{dm}^{-3}$. Tyto výsledky ukazují, že substrátu ve fermentoru skutečně ubývá a že po 15 dnech od začátku hydrolýzy zde nezůstává téměř žádný substrát.

- Použijeme stejnou rovnici, jakou jsme získali integrací v předchozím případě, avšak teď do ní dosadíme $S = \frac{1}{4}S_0$ a dále ji upravíme:

$$\begin{aligned}\frac{1}{4}S_0 &= S_0 \cdot e^{-k_1 t} \\ \frac{1}{4} &= e^{-k_1 t} \\ \ln\left(\frac{1}{4}\right) &= -k_1 t \\ t &= -\frac{\ln\left(\frac{1}{4}\right)}{k_1}\end{aligned}$$

Do takto upravené rovnice dosadíme $k_1 = 0,5 \text{ den}^{-1}$ a po vyčíslení získáme výsledek $t \doteq 2,77$ dní. Koncentrace substrátu se tedy sníží na čtvrtinu původní hodnoty přibližně za 2 dny a 18,5 hodiny.

Úloha 2: Časová závislost tvorby metanu

Ve vsádkovém experimentu je produkován metan. Maximální výtěžek metanu B_0 z použitého substrátu je $0,36 \text{ dm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ (tj. z jednoho gramu substrátu se vytvoří 0,36 litru metanu), kinetický parametr $k_4 = 0,6 \text{ den}^{-1}$.

Úkoly:

- Vypočítejte výtěžek metanu V_B po 2, 4, 8 a 15 dnech od začátku experimentu.
- Zjistěte, za jak dlouho bude výtěžek metanu roven 90 % maximálního výtěžku.

Řešení:

- Produkce metanu ze substrátu je popsána diferenciální rovnicí

$$\frac{dV_B}{dt} = B_0 \cdot k_4 \cdot e^{-k_4 t},$$

kde t je čas. Zintegrováním této rovnice dostaneme

$$V_B = B_0 \cdot \left(1 - e^{-k_4 t}\right).$$

Do této rovnice dosadíme $B_0 = 0,36 \text{ dm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, $k_4 = 0,6 \text{ den}^{-1}$ a za t postupně 2, 4, 8 a 15 dní. Po vyčíslení obdržíme hledané hodnoty výtěžku metanu $V_B(t = 2) \doteq 0,25 \text{ dm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, $V_B(t = 4) \doteq 0,33 \text{ dm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, $V_B(t = 8) \doteq 0,36 \text{ dm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ a $V_B(t = 15) \doteq 0,36 \text{ dm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. Takto vyjádřené výsledky udávají, kolik litrů metanu bude za zadanou dobu vytvořeno z jednoho gramu substrátu. Tyto výsledky ukazují, že výtěžek metanu se s rostoucím časem přibližuje hodnotě B_0 .

Už po osmi dnech od začátku experimentu se výtěžek metanu blíží maximálnímu možnému výtěžku z tohoto substrátu natolik, že při výpočtu s přesností na dvě desetinná místa již vychází stejná hodnota, jako je hodnota maximálního výtěžku.

b) Použijeme stejnou rovnici, jakou jsme získali integrací v předchozím případě, avšak teď do ní dosadíme $V_B = \frac{9}{10}B_0$ a dále ji upravíme:

$$\begin{aligned}\frac{9}{10}B_0 &= B_0 \cdot \left(1 - e^{-k_4 t}\right) \\ \frac{9}{10} &= 1 - e^{-k_4 t} \\ e^{-k_4 t} &= \frac{1}{10} \\ -k_4 \cdot t &= \ln\left(\frac{1}{10}\right) \\ t &= -\frac{\ln\left(\frac{1}{10}\right)}{k_4}\end{aligned}$$

Do takto upravené rovnice dosadíme $k_4 = 0,6 \text{ den}^{-1}$ a po vyčíslení obdržíme výsledek $t \doteq 3,84$ dní. Výtěžek metanu tedy dosáhne 90 % maximálního výtěžku přibližně po 3 dnech a 20 hodinách od začátku experimentu.

Úloha 3: Použití Chen-Hashimotova matematického modelu k určení výtěžku metanu a doby zdržení při kontinuálním procesu metanizace

Při kontinuálním procesu výroby bioplynu je použit zemědělský substrát, jehož hlavní složkou je hovězí kejda. Maximální výtěžek metanu z tohoto substrátu $B_0 = 0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, tj. z jednoho kilogramu substrátu lze získat nejvýše 200 litrů metanu. Hashimotova kinetická konstanta $K = 1,05$ a maximální růstová rychlost metanogenních mikroorganismů $\mu_{max} = 0,33 \text{ den}^{-1}$.

Úkoly:

- Předpokládejme, že průměrná doba setrvání elementu substrátu ve fermentoru je 14 dní. Vypočtete objemovou produkci metanu V_M .
- Požadujeme, aby se z každého kilogramu substrátu vytvořilo 140 litrů metanu. Určete dobu zdržení H , při níž bude dosaženo této objemové produkce metanu.

Řešení:

a) Objemovou produkci metanu z tohoto typu substrátu lze vypočítat pomocí Chen-Hashimotovy rovnice

$$V_M = B_0 \cdot \left(1 - \frac{K}{H \cdot \mu_{max} + K - 1} \right).$$

Do této rovnice dosadíme hodnoty ze zadání $B_0 = 0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, $K = 1,05$ a $\mu_{max} = 0,33 \text{ den}^{-1}$. Informace, že průměrná doba setrvání elementu substrátu ve fermentoru je 14 dní, znamená, že doba zdržení substrátu ve fermentoru je 14 dní, tudíž za H dosadíme 14 dní. Po vyčíslení obdržíme hledanou hodnotu objemové produkce metanu $V_M \doteq 0,16 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. Tento výsledek znamená, že z jednoho kilogramu substrátu bude získáno přibližně 160 litrů metanu.

b) Chen-Hashimotovu rovnici přepíšeme do tvaru

$$H = \frac{1}{\mu_{max}} \cdot \left(\frac{B_0 \cdot K}{B_0 - V_M} - K + 1 \right)$$

a dosadíme do ní $\mu_{max} = 0,33 \text{ den}^{-1}$, $B_0 = 0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ a $K = 1,05$. Protože z každého kilogramu substrátu se má vytvořit 140 litrů metanu, můžeme pro objemovou produkci metanu psát $V_M = 0,14 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. Po vyčíslení získáme výsledek $H \doteq 10,45$ dne, doba zdržení je tedy přibližně 10,5 dne.

5 Modelování rozptylu znečišťujících látek v ovzduší

5.1 Znečišťující látky v ovzduší

Za znečišťující látky (ZL) se označují jakékoliv látky vnesené do vnějšího ovzduší nebo v ovzduší druhotně vznikající, které mají nebo mohou mít (po fyzikální či chemické přeměně nebo po spolupůsobení s jinou látkou) škodlivý vliv na život a zdraví lidí a zvířat, životní prostředí, klimatický systém Země nebo na hmotný majetek. Mezi ZL se řadí i látky, které obtěžují zápachem [68].

ZL se v ovzduší mohou vyskytovat v podobě plynů, aerosolů i tuhých částic [69]; dostávají se do atmosféry z přírodních i antropogenních zdrojů [70]. ZL uvolňované z přírodních zdrojů jsou trvalou součástí zemské atmosféry a jejich výskyt není významně ovlivnitelný lidskou činností. Většina emisí ZL pochází z přírodních zdrojů; uvádí se, že tyto emise tvoří přibližně 90 % z celkového množství uvolňovaných ZL [69].

Navzdory tomu jsou větším problémem emise antropogenního původu. Důvodem je, že emise z přírodních zdrojů bývají rozptýlené v rozsáhlých oblastech nebo pochází z tak mohutných tepelných zdrojů, že jsou transportovány do vyšších vrstev atmosféry a jejich přízemní koncentrace jsou obvykle globálně nevýznamné. Za tento případ jsou označovány např. sopečné erupce [69], při nichž dochází k uvolňování tuhých znečišťujících látek i plyných sloučenin, např. oxidů síry, oxidů uhlíku, oxidů dusíku, metanu, chlorovodíku, fluorovodíku aj. [70]

Zde však stojí za zmínku, že sopečný výbuch může mít značný dopad. Příkladem je islandská sopka Eyjafjallajökull, z níž se při erupci v roce 2010 uvolnilo velké prachové mračno, které způsobilo přerušování letecké dopravy nad Evropou. Finanční škoda, již tím utrpěly letecké společnosti během pouhých sedmi dnů, je odhadována nejméně na 1,7 miliard dolarů [71].

Antropogenní zdroje ZL často bývají umístěny v blízkosti míst s vysokou hustotou osídlení a antropogenní ZL se v atmosféře obvykle vyskytují ve vyšších koncentracích než ZL přírodního původu [69]. Proto je značná pozornost věnována studiu rozptylu ZL emitovaných v důsledku lidské činnosti.

Je třeba rozlišovat pojmy emise a imise. Pojem emise znamená proces vnášení jedné nebo více znečišťujících látek do životního prostředí [68]. Jako emise jsou však někdy označovány také ZL v místě, kde opouští svůj zdroj [69]. Pro kvantitativní popis uvolňování emisí (ve smyslu ZL) ze zdroje se používá jejich hmotnostní tok, tj. hmotnost ZL uvolněných za jednotku času. Hmotnostní tok se obvykle vyjadřuje v jednotkách $t \cdot \text{rok}^{-1}$ nebo $g \cdot s^{-1}$ [69, 72].

Imisemi je myšleno znečištění ovzduší vyjádřené hmotnostní koncentrací znečišťující látky či skupiny znečišťujících látek [68]; používanými jednotkami jsou $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ a $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ [70, 73]. Imise se vztahují k oblastem v blízkosti zemského povrchu, hovoříme o nich v souvislosti s vlivem ZL na objekty na zemském povrchu (např. na člověka) [70].

ZL se v atmosféře rozptylují v horizontálním i vertikálním směru a vane-li vítr, jsou unášeny ve směru jeho proudění. Přemísťování ZL způsobené větrem je nazýváno transmisí (přenosem) ZL v ovzduší. Tuhé a kapalné ZL se po transmisí usazují na zemském povrchu (hovoříme o tzv. depozici ZL). Deponované ZL se následně mohou dostávat do potravních řetězců a tím kumulovat své negativní účinky [69].

Aby bylo možno sledovat a následně v případě potřeby ovlivňovat kvalitu ovzduší, je potřeba nějakým způsobem zjišťovat znečištění ovzduší. Jednou z možností je přímé měření imisí [74]. Jedná se však o nákladnou metodu [75], takže měřicí stanice jsou umísťovány pouze na vybraná „reprezentativní“ místa, na nichž je možno získávat informace o znečištění ovzduší v širším okolí. Často jsou zvolena místa, v nichž je očekáváno největší imisní zatížení v dané lokalitě. Na základě dat získaných měření v těchto stanicích mohou být realizována opatření pro snižování znečištění.

Nevýhodou přímého měření imisí je také to, že tato metoda poskytuje informace pouze o současném stavu znečištění v daném místě. Vytvářet předpovědi časového vývoje znečištění pomocí dat získaných přímým měřením imisí není dost dobře možné [70, 75].

Předpovídat rozložení imisí na určitém území lze pomocí matematických modelů rozptylu a přenosu ZL v ovzduší [75], tyto modely umožňují z údajů o množství ZL vypouštěných do ovzduší a o klimatických podmínkách vypočítat koncentrace ZL v požadovaném místě. Matematické vyjádření procesu rozptylu ZL je však obtížně proveditelné pro členitý terén, např. pro urbanizovaná území [69]. Matematický

model rozptylu ZL navíc vždy vychází z určitých zjednodušujících předpokladů, nemůže tedy poskytovat zcela přesné výsledky. Na měření a modelování rozptylu ZL je možno pohlížet jako na dva navzájem se doplňující přístupy ke studiu kvality ovzduší [70].

Při modelování rozptylu ZL je pozornost věnována zejména tzv. mezní vrstvě atmosféry (MVA). Jedná se o spodní část troposféry, která je přímo ovlivněna přítomností zemského povrchu. Výška MVA se pohybuje od stovek metrů do přibližně dvou kilometrů v závislosti na míře nerovnosti povrchu a dalších meteorologických parametrech. MVA má rozhodující vliv na rozptyl ZL [68].

Vlivy povrchu na rozptyl se nejvýrazněji projevují ve spodní části MVA do výšky několika desítek metrů nad zemským povrchem, tato oblast se nazývá přízemní vrstva atmosféry. Při posuzování kvality ovzduší z hlediska ochrany lidského zdraví bývá úroveň znečištění vyhodnocována zpravidla v této vrstvě (např. v oblasti do dvou metrů nad povrchem, která se nazývá dýchací vrstva) [68].

Když ZL opouští zdroj, dochází k jejich interakci s okolním prostředím. Význam „parametrů zdroje“ (např. počáteční hybnosti ZL, teploty zplodin atd.) se v průběhu času snižuje a přenos i rozptyl ZL je postupně více určován vlastnostmi MVA. Na malých územích, zejm. ve městech, je možno podrobněji sledovat vliv překážek na proudění vzduchu, a tím i na šíření ZL [76].

5.2 Faktory ovlivňující rozptyl ZL v atmosféře

Jak již bylo předesláno, rozptyl ZL je ovlivněn jak zdrojem, ze kterého jsou ZL vypouštěny, tak ovzduším, v němž se ZL následně pohybují.

5.2.1 Faktory zdroje ZL

Zdroj ZL má významný vliv na velikost a rozložení koncentrace ZL. Důležitou roli hraje jak geometrická charakteristika zdroje, tak fyzikální vlastnosti vypouštěných emisí. Geometrickou charakteristikou zdroje jsou myšleny jeho tvar a rozměry. Tvar zdroje bývá relativně složitý, a proto se pro účely modelování rozptylu nahrazuje zjednodušeným popisem. Základní geometrické členění zdrojů ZL je na zdroje bodové, liniové, plošné a objemové [69, 70]. Pro zařazení zdroje ZL do některé

z těchto kategorií je rozhodující ta jeho část, ze které jsou emitovány ZL, tedy obvykle komín, výdech či otvory v budově - okna, dveře, ventilace apod. Podle tvaru emitující části lze zdroje ZL charakterizovat i přesněji pomocí jednoduchých geometrických prvků jako jsou bod, linie tvořená řadou bodů, obdélník, mnohoúhelník, kruh, kužel či kvádr [69].

Základními fyzikálními vlastnostmi vypouštěných emisí jsou [69]:

- množství tepla obsažené v emisích,
- hustota emisí,
- skupenství jednotlivých součástí emisí,
- velikost a tvar emitovaných částic.

Důležitou roli hraje též průměrná rychlost proudění emisí ze zdroje a směr jejich výtoku do atmosféry [69].

5.2.2 Faktory ovzduší

Ovzduší, v němž se pohybují ZL po opuštění zdroje, je nestálé prostředí, jehož parametry se mění – někdy s velkou mírou náhodnosti - v čase i prostoru. Téměř všechny rozptýl antropogenních ZL nastává v troposféře, v níž se odehrává také většina meteorologických jevů. Troposféra se vyznačuje vertikálním promícháváním ovzduší, způsobeným rozdíly tlaků a teplot a též vlivem zemského povrchu na horizontální proudění. Mezi faktory ovzduší náleží zejména teplota ovzduší, vítr, atmosferické srážky, vlhkost vzduchu a oblačnost. K faktorům ovzduší se řadí také vliv průběhu terénu a terénních útvarů (přírodního i antropogenního původu) na proudění vzduchu. Roli zde hraje nejen tvar, ale též drsnost povrchu terénních překážek [69].

I. Teplota ovzduší

Ohřívání atmosféry je způsobeno téměř výhradně Sluncem. Přímé sluneční záření má na ohřev atmosféry zanedbatelný vliv, avšak ohřívá zemský povrch, z něhož probíhá hlavní přenos tepla do atmosféry [69, 70]. Přenos tepla ze zemského povrchu do atmosféry může probíhat několika způsoby [69]:

- molekulární výměnou (do vzdálenosti jednotek mm od zemského povrchu), při níž ohřev probíhá přímým kontaktem molekul vzduchu s povrchem,
- turbulentní výměnou (ve vzdálenosti jednotek až desítek m nad zemským povrchem), kdy jednotlivé malé části vzduchu vykonávají neuspořádané vertikální pohyby, kterými přenášejí teplo,
- uspořádanou konvekci (ve vzdálenosti stovek až tisíc m nad zemským povrchem), která je způsobena nestejným ohříváním povrchu Země, a tím i nestejným ohříváním vzduchu v blízkosti zemského povrchu.

Pro rozptyl ZL v ovzduší je důležitá zejména závislost teploty vzduchu na výšce, kterou popisuje tzv. (vertikální) teplotní gradient γ definovaný vztahem [68]

$$\gamma = -\frac{\partial t}{\partial z}, \quad (16)$$

kde t je teplota a z je vertikální souřadnice (předpokládá se souřadná osa orientovaná směrem od zemského povrchu nahoru). Tudíž klesá-li teplota atmosféry s rostoucí nadmořskou výškou, teplotní gradient má kladnou hodnotu a naopak.

Existují dvě význačné hodnoty vertikálního teplotního gradientu [69]:

- $\gamma \approx 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ (tj. pokles teploty přibližně o $1 \text{ }^\circ\text{C}$ na 100 m výšky¹³),
- $\gamma \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ (tj. pokles teploty přibližně o $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ na 100 m výšky).

První z těchto hodnot se nazývá suchoadiabatický gradient a má význam pro suchý (obecněji vodní párou nenasyčený) vzduch, druhá hodnota je tzv. nasyceně adiabatický gradient a hraje roli v případě nasyceného vzduchu [70]. Tyto gradienty se někdy souhrnně označují pojmem adiabatický gradient, přičemž se předpokládá, že víme, zda uvažujeme nenasyčený, či nasycený vzduch.

Pokud je hodnota teplotního gradientu v nějakém místě atmosféry vyšší než hodnota suchoadiabatického gradientu (v případě nenasyčeného vzduchu), resp. nasyceně adiabatického gradientu (v případě nasyceného vzduchu), jedná se o tzv.

¹³Teplotní gradienty se zpravidla vyjadřují v jednotkách $^\circ\text{C} / (100 \text{ m})$, což se v praxi často zapisuje ve zjednodušeném tvaru $^\circ\text{C}/100 \text{ m}$.

instabilní zvrstvení atmosféry. Začne-li se částice vzduchu v tomto místě pohybovat vertikálním směrem, bude samovolně zvyšovat rychlost svého pohybu. Je-li naopak teplotní gradient nižší než adiabatický, hovoříme o tzv. stabilním zvrstvení atmosféry. Pokud bude částice v tomto případě vychýlena vnějšími silami ve vertikálním směru, samovolně se vrátí do původní výšky. Rovná-li se teplotní gradient právě adiabatickému gradientu, zvrstvení atmosféry je indiferentní a vertikálně vychýlená částice zůstane v nové poloze. Čím je atmosféra v uvažovaném místě stabilnější, tím horší jsou podmínky pro rozptyl ZL [68, 70].

II. Vítr

Vítr představuje horizontální pohyb atmosféry, určený silami tlakového gradientu, Coriolisovou silou a třecími silami. Výškově jsou směr a síla větru charakterizovány vertikálním rychlostním profilem a stáčením větru s výškou. Rychlostní profil větru závisí zejména na stabilitě ovzduší a drsnosti povrchu [69, 70].

III. Atmosférické srážky

Atmosférické srážky snižují koncentrace ZL v ovzduší. ZL jsou srážkami přímo odstraňovány, a to větší či menší měrou v závislosti na druhu srážek a ZL [70]. Čisticí mechanismy srážek jsou značně komplikované. Menší částice aerosolu jsou lépe odstraňovány sněhovými srážkami, částice s rozměrem větším než 7,5 μm naopak srážkami dešťovými. U plyných látek záleží na jejich vlastnostech, např. oxid siřičitý je z ovzduší odstraňován deštěm, zatímco radon není deštěm téměř vůbec vymýván [69].

IV. Vlhkost vzduchu a oblačnost

Vlhkost vzduchu se při rozptylu ZL uplatňuje pouze prostřednictvím chemických reakcí a fyzikálně-chemických procesů [69]. Častým problémem zejména v městských a průmyslových oblastech je vznik smogu, což je specifická směs znečišťujících látek primárně emitovaných a především následnými chemickými reakcemi vznikajících. Tyto látky se za nepříznivých meteorologických podmínek (v případě stabilního zvrstvení atmosféry, které neumožňuje výměnu či promíchávání vzduchu) mohou vyskytovat ve zvýšených koncentracích a působit škodlivě na lidské zdraví. Slovo „smog“ vzniklo spojením anglických slov „smoke“ (kouř) a „fog“ (mlha) jako vyjádření toho, že se jedná o směs kouře a mlhy [77].

Oblačnost má negativní vliv na rozptyl ZL tím, že různou měrou zadržuje sluneční záření. Záření krátkých vlnových délek je oblačností odraženo, dlouhovlnné záření je naopak pohlcováno. Tyto procesy ovlivňují další rozptylové faktory, např. mají za následek stabilnější zvrstvení atmosféry [69].

5.3 Druhy matematických modelů

Pro matematické modelování znečištění ovzduší plynnými látkami nebo prachem se mohou používat tzv. rozptylové modely [70], které popisují šíření polutantů od známého zdroje do okolí. Modelové výpočty zahrnují zředování koncentrace ZL během jejich rozptylu a na základě toho se snaží predikovat jejich koncentrace v ovzduší zájmové oblasti.

Základními kritérii pro dělení rozptylových modelů jsou velikost výpočetní oblasti, pro kterou je daný model určen, a matematicko-fyzikální přístup, na němž je model založen [78].

5.3.1 Rozdělení modelů podle velikosti výpočetní oblasti

Podle velikosti výpočetní oblasti, která určuje horizontální dosah modelu, můžeme matematické modely rozptylu ZL rozdělit do následujících kategorií [78]:

- modely s dosahem do 1 km od zdroje ZL, které slouží pro modelování lokálních („near-field“) efektů, např. vlivu budov na proudění větru,
- modely s dosahem do 10 km od zdroje („short-range“ modely) používané proto, že v této oblasti nastává největší dopad primárních ZL emitovaných z vyvýšených zdrojů,
- modely s dosahem 10 – 100 km od zdroje popisující regionální transport („intermediate transport“) ZL (v těchto vzdálenostech již začínají hrát významnější roli chemické reakce ZL),
- modely s dosahem nad 100 km umožňující studovat dálkový („long-range“) transport ZL (v takto rozsáhlých oblastech se kromě chemických reakcí uplatňuje též vliv velkorozměrových meteorologických efektů),

- globální modely, které popisují jevy probíhající v celé atmosféře, jako je např. akumulace CO₂.

5.3.2 Rozdělení modelů podle jejich matematicko-fyzikálního přístupu

V současné době se používají dva principiálně odlišné typy modelů: dynamické modely a statistické modely [69].

Dynamické modely

Dynamické matematické modely jsou založeny na numerickém řešení základních hydrodynamických a termodynamických rovnic [69], např. pohybových rovnic pro složky turbulentního proudění, rovnic pro difúzi vodní páry a znečišťujících látek, rovnice kontinuity, stavové rovnice apod. [76] Z matematického hlediska se jedná o soustavu algebraických a parciálních diferenciálních rovnic, která je řešena metodou konečných objemů, příp. metodou konečných prvků; hledá se matematické řešení obecného případu třírozměrného časově závislého proudění stlačitelných tekutin v reálných podmínkách [69].

Tento přístup se snaží vyjádřit stav a časový vývoj mezní vrstvy reálné atmosféry, což je značně obtížné kvůli složitosti a nahodilosti turbulentního proudění v atmosféře. Vliv turbulencí je nezanedbatelný zejména v blízkosti zdroje ZL a pro členitý povrch. Pro výpočty turbulentního proudění v atmosféře neexistuje exaktní teorie, avšak zanedbání vlivu turbulencí by v uvedených případech vedlo k přílišnému zkreslení výsledků modelování. Z tohoto důvodu jsou do použitých soustav rovnic vnášeny empiricky změřené či odhadnuté součinitele. Nevýhodou tohoto typu modelů je velká výpočetní náročnost, která klade zvýšené nároky na výkon použitých počítačů a na dobu provádění výpočtů [69].

Pro výpočet rozptylu ZL založený na dynamických modelech se používají softwarové nástroje určené k numerickému řešení proudění, někdy označované zkratkou CFD (Computational Fluid Dynamics). Okrajové podmínky pro rovnice mohou být zadávány jako konstanty, funkce, příp. derivace daných veličin [69]. Příkladem softwarového produktu používaného pro provádění CFD výpočtů je ANSYS CFX [79].

Statistické modely

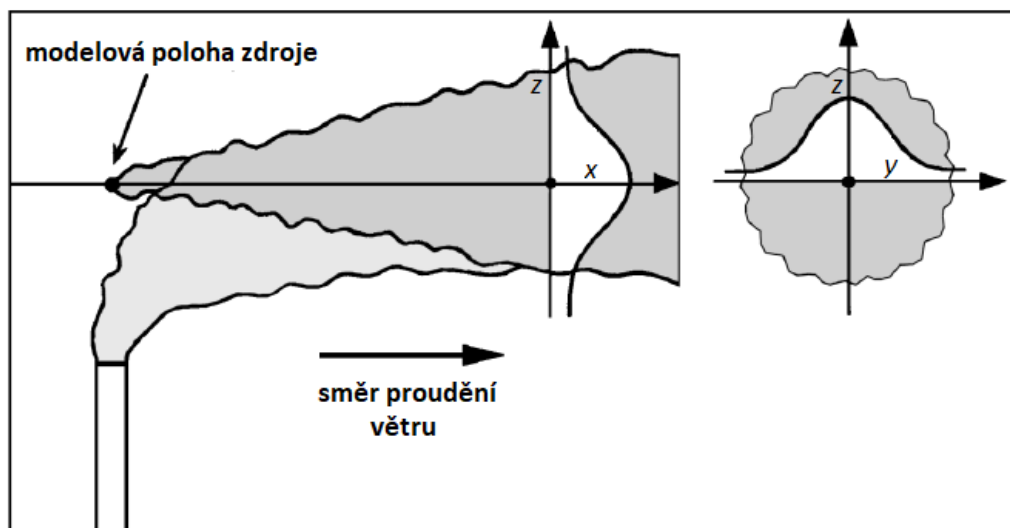
Z matematického hlediska jsou statistické modely založeny na řešení rovnice difúze, přičemž se předpokládá, že převládá vodorovný transport ZL ve směru větru. Rozptyl ZL ve vertikálním směru a ve směru horizontálním kolmém na směr proudění je v těchto modelech popisován statisticky jako turbulentní difúze [69].

Statistické modely rozptylu ZL vycházejí z následujících zjednodušujících předpokladů [69]

- zdroj znečištění je bodový, ZL z něj unikají konstantní rychlostí,
- složky vektorů rychlosti větru jsou konstantní v čase i prostoru,
- rozptyl ZL má statistické rozložení v rovině kolmé na směr šíření kouřové vlečky.

Dnešní statistické modely jsou obvykle modifikací tzv. gaussovského modelu [78], tj. modelu, v němž je rozptyl ve směru kolmém ke směru proudění kouřové vlečky popsán Gaussovým (normálním) rozložením [76] (viz obr. 9). Gaussovské modely jsou vhodné k výpočtům rozptylu ZL v rovinném terénu a jsou určeny především pro zjišťování parametrů znečištění pro delší časové úseky. Typickým použitím těchto modelů je výpočet průměrných měsíčních či průměrných ročních hodnot koncentrace ZL v zadaných bodech uvažované oblasti. Jedná se o nejjednodušší matematické disperzní modely používané pro popis šíření ZL v atmosféře, jejich výhodou jsou relativně snadno splnitelné požadavky na vstupní data [70].

V České republice je standardem pro výpočet znečištění ovzduší ze stacionárních i mobilních zdrojů model SYMOS'97 a stejnojmenná metodika Ministerstva životního prostředí České republiky. Tato metodika je podrobněji popsána v podkapitole 5.5. Programové vybavení pro práci s modelem SYMOS'97 vytvořila firma IDEA-ENVI s.r.o. [80], tento software je využíván i při výuce na PřF UHK v rámci oboru FTMB.



Obrázek 9: Gaussovský model rozptylu ZL (upraveno podle [68]). Gaussova křivka znázorňuje pokles koncentrace ZL s rostoucí vzdáleností (y , resp. z) od osy kouřové vlečky (x).

5.4 Zdroje dat pro modelování znečištění ovzduší v ČR

Velkou část údajů potřebných pro modelování rozptylu ZL na území ČR je možno získat prostřednictvím Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ), který shromažďuje různé meteorologické a klimatické údaje. Pro účely modelování rozptylu ZL je důležitá zejména větrná růžice, která formou tabulky či grafu znázorňuje četnosti rychlostí větru v různých směrech. Větrnou růžici pro zvolenou lokalitu si lze od ČHMÚ objednat.

ČHMÚ disponuje též údaji o zdrojích emitujících ZL do ovzduší. Informace o těchto zdrojích jsou totiž shromažďovány v databázi REZZO (Registr emisí a zdrojů znečišťování ovzduší), jejíž správou je ČHMÚ pověřen.

Databáze REZZO je tvořena čtyřmi dílčími databázemi, v nichž jsou údaje o zdrojích ZL uloženy podle kategorií těchto zdrojů. Do kategorie REZZO 1 spadají velké stacionární zdroje emisí (s tepelným příkonem překračujícím 0,3 MW), do REZZO 2 náleží střední stacionární zdroje (s tepelným příkonem do 0,3 MW). Zdroje z obou těchto kategorií jsou evidovány jednotlivě. Malé stacionární zdroje emisí spadají do kategorie REZZO 3 a jsou sledovány hromadně podle krajů a okresů. Kategorie REZZO 4 obsahuje hromadně sledované informace o znečištění

ze silniční, železniční, lodní a letecké dopravy. Podrobnější informace o emisní databázi REZZO lze nalézt na webových stránkách [81] a [82] ČHMÚ.

Při modelování rozptylu ZL je často potřeba pracovat také s údaji o průběhu terénu v zájmové oblasti, tyto údaje mají obvykle podobu výškopisu. Typický výškopis je tvořen mřížkou bodů umístěných v souřadné síti, přičemž souřadnice každého z těchto bodů určují jeho polohu v zájmové oblasti a každému z těchto bodů je přiřazena odpovídající nadmořská výška terénu. Výškopisy nabízí např. Český úřad zeměměřický a katastrální [83].

5.5 Metodika SYMOS'97

Tato podkapitola je zpracována podle [72].

Metodika SYMOS'97 je používána pro výpočet znečištění ovzduší plynnými a pevnými látkami emitovanými z bodových, liniových¹⁴ a plošných zdrojů. Umožňuje počítat znečištění způsobované jediným zdrojem i větším počtem zdrojů umístěných ve sledované oblasti. Pomocí této metodiky lze stanovit charakteristiky znečištění v geometrické síti referenčních bodů, čehož se využívá se při přípravě podkladů pro názorné kartografické zpracování výsledků výpočtů. Odhad imisní koncentrace ZL je možno provádět i pro případy teplotní inverze ve složitém terénu a bezvětří.

SYMOS'97 pracuje se statistickým rozložením směru a rychlosti větru vztáženým ke třídám stability mezní vrstvy atmosféry podle klasifikace Bubníka a Koldovského. Tato klasifikace rozlišuje pět tříd stability, které se liší rozptylovými podmínkami:

- I. třída stability (superstabilní) má vertikální teplotní gradienty menší než $-1,6 \text{ °C} / (100 \text{ m})$. Rozptyl ZL je v tomto případě velmi malý nebo téměř nenastává.
- II. třída stability (stabilní) má vertikální teplotní gradienty v rozmezí od $-1,6$ do $-0,7 \text{ °C} / (100 \text{ m})$. Rozptylové podmínky jsou lepší než v předchozím případě, avšak stále jsou nepříznivé.
- III. třída stability (izotermní) se vyznačuje malou změnou teploty s výškou, vertikální teplotní gradienty jsou v rozmezí od $-0,6$ do $+0,5 \text{ °C} / (100 \text{ m})$. Rozptylové podmínky jsou lepší, než je tomu v I. a II. třídě stability.
- IV. třída stability (normální) se v atmosféře vyskytuje nejčastěji. Její vertikální teplotní gradienty mají hodnoty $+0,6$ až $+0,8 \text{ °C} / (100 \text{ m})$, rozptylové podmínky jsou dobré.
- V. třída stability (konvektivní) má nejlepší rozptylové podmínky, vertikální teplotní gradienty jsou větší než $+0,8 \text{ °C} / (100 \text{ m})$. V této třídě stability

¹⁴Liniové zdroje jsou při výpočtu rozděleny na dostatečný počet elementů délky, které lze po provedení jisté korekce považovat za bodové zdroje. Výsledné znečištění je vypočteno jako součet příspěvků od všech těchto elementů. V případě plošného zdroje je postup obdobný s tím rozdílem, že plocha zdroje je rozdělena na čtvercové elementy.

však může nastávat výrazné vertikální proudění vzduchu vedoucí k výskytu nárazově vysokých koncentrací ZL v blízkosti zdroje.

Tato klasifikace předpokládá konstantní vertikální teplotní gradient v celé vrstvě, v níž dochází k rozptylu ZL. Z toho mj. vyplývá, že v případě I. a II. třídy stability se při výpočtu předpokládá, že veškerý rozptyl vypouštěných ZL probíhá za podmínek přízemní teplotní inverze.

Metodika SYMOS'97 je určena především pro vypracování rozptylových studií sloužících jako podklady pro hodnocení kvality ovzduší. Nelze ji použít pro výpočet znečištění ovzduší ve vzdálenostech větších než 100 km od zdroje, ve velmi členitém terénu ani uvnitř městské zástavby pod úrovní střech budov (např. na křižovatkách nebo v ulicích mezi řadami domů).

Metodika nezahrnuje pozad'ové znečištění ovzduší, tj. vypočtené imisní koncentrace znamenají pouze příspěvky imisních koncentrací způsobené zdroji ZL zahrnutými do výpočtu. Metodika rovněž nezohledňuje znečištění látkami, které vznikají chemickými a fyzikálními přeměnami v atmosféře a mohou tvořit nezanedbatelný příspěvek k celkové imisní zátěži.

5.5.1 Vstupní údaje

Nejjednodušší situací pro modelování je osamocený bodový zdroj, např. komín. Pro výpočet znečištění z bodového zdroje se do modelu SYMOS'97 zadávají následující údaje:

1. Údaje o zdrojích ZL:
 - poloha zdroje, nadmořská výška terénu v místě zdroje, výška zdroje nad terénem atd.
 - provozní parametry zdroje (např. výstupní rychlost spalin, teplota spalin, emisní tok, provozní doba zdroje)
2. Meteorologické a klimatické podklady, zejm. větrná růžice pro danou lokalitu. Větrná růžice je dělená do pěti tříd stability atmosféry podle klasifikace Bubníka a Koldovského a tří tříd rychlosti větru (viz tab. 1).

3. Výškopis zájmového území, případně též informace o výšce a rozmístění budov v zájmovém území.
4. Údaje o referenčních bodech, pro které se bude provádět výpočet (poloha bodů v souřadné síti, nadmořské výšky terénu v místě referenčních bodů, výšky bodů nad terénem).
5. Údaje o imisních limitech a přípustných imisních koncentracích ZL.

Tabulka 1: Definice tříd rychlosti větru

Třída rychlosti větru	Rozmezí rychlostí [m · s⁻¹]	Třídní rychlost [m · s⁻¹]
1. slabý vítr	od 0 do 2,5 včetně	1,7
2. mírný vítr	od 2,5 do 7,5 včetně	5,0
3. silný vítr	nad 7,5	11,0

Pro zadávání polohy zdrojů i referenčních bodů se nejčastěji používá pravoúhlý souřadnicový systém, v němž osa X míří k východu, osa Y míří k severu a osa Z míří k zenitu (tj. ve směru kolmo vzhůru) a slouží k popisu nadmořské výšky nebo výšky budov.

5.5.2 Výstupy modelování

Modelováním podle metodiky SYMOS'97 mohou být získány následující imisní charakteristiky:

- maximální možné krátkodobé hodnoty koncentrací ZL pro každou vyskytující se kombinaci třídy rychlosti větru a třídy stability atmosféry,
- maximální možné krátkodobé hodnoty koncentrací ZL bez ohledu na rychlost větru a třídu stability atmosféry,
- průměrné roční hodnoty koncentrací ZL v jednotlivých referenčních bodech,
- průměrná doba trvání možného překročení zvolené mezní hodnoty (např. imisního limitu) v daném referenčním bodě,

- podíl jednotlivých zdrojů (nebo skupin zdrojů) na znečištění ovzduší v jednotlivých referenčních bodech.

Kromě těchto základních výstupů lze modelováním získávat i další údaje, např. stanovit výšku komína potřebnou pro splnění definovaných požadavků na čistotu ovzduší v jeho okolí. Je také možno provádět výpočty spadu prachu pro různé druhy zdrojů ZL, modelovat rozptyl exhalací z chladicích věží tepelných elektráren atp.

Ukázka výsledku modelování získaného pomocí softwarového nástroje SYMOS'97 je uvedena na obr. 10.



Obrázek 10: Ukázka grafického výstupu modelování rozptylu ZL podle metodiky SYMOS'97. Izolinie znázorňují průměrné roční koncentrace sledované ZL v okolí bodového zdroje znečištění.

5.6 Modelování šíření zápachu podle metodiky SYMOS'97

Významným společenským problémem bývá zápach vyskytující se v obydlích oblastech. Modelováním šíření zápachu podle metodiky SYMOS'97 se zabývá autorova publikace [84], z níž čerpá tato podkapitola.

Jako zápach je označována subjektivní smyslová odezva na vdechovaný vzduch, který obsahuje specifickou chemickou sloučeninu či směs více sloučenin [63]. Zápachy jsou především nepříjemné, avšak v některých případech mohou způsobovat i zdravotní problémy, např. nevolnost, bolesti hlavy, závratě nebo dýchací potíže. Dlouhodobá expozice zápachům vede i k psychickým problémům, jako je podrážděnost, pocit stísněnosti, ztráta chuti k jídlu, nespavost atd. [85, 86]

Některé pachové látky jsou tvořeny i několika stovkami chemických složek, z nichž všechny mohou přispívat k výslednému zápachu. I nepatrná změna relativních množství těchto složek může mít za následek změnu zápachu [87], je tedy obtížné zápach charakterizovat na základě složení pachové látky.

Pro kvantitativní popis zápachu se používá jiný přístup, založený na využití tzv. evropské pachové jednotky (EOU - European Odour Unit). EOU je definována jako množství pachové látky, které při odpaření do 1 m³ neutrálního plynu za standardních podmínek (teplota 298,15 K, tlak 101,325 kPa) vyvolá u členů komise posuzovatelů stejný smyslový vjem jako evropská referenční hmotnost pachové látky (EROM - European Reference Odour Mass), odpařená do 1 m³ neutrálního plynu za standardních podmínek. (EROM odpovídá 123 µg n-butanolu.) Pro účely modelování se koncentrace pachových látek vyjadřují v jednotkách EOU · m⁻³ [85].

Metodika SYMOS'97 byla přizpůsobena pro modelování rozptylu zápachu, přestože je to spojeno s většími obtížemi, než modelování rozptylu běžných (nepachových a nereaktivních) ZL. Hlavní problémy související s modelováním zápachu jsou následující [86]:

- Obtížná a subjektivní kvantifikace zápachu a komplikovaná struktura zdrojů zápachu mají za následek, že nejistoty spojené s modelováním šíření zápachu jsou větší než nejistoty při modelování běžných ZL.
- Vliv pachových látek obvykle není kumulativní, pachové látky jednoho druhu mohou překrývat účinky jiných pachových látek. Proto není možné jednoduše

sčítat koncentrační příspěvky různých pachových látek a je doporučeno modelovat rozptyl zápachu pouze z jednoho zdroje.

- Pachové látky mohou být v atmosféře transformovány v důsledku vlhkosti vzduchu, slunečního záření a změn teploty; tyto děje však zatím nejsou uspokojivě popsány.
- Lidské vnímání zápachu je ovlivněno okamžitou špičkovou koncentrací pachové látky významněji, než její průměrnou koncentrací za delší časový úsek. Závěry založené na průměrných koncentracích by vedly k podcenění vnímaného zápachu.

Protože metodika SYMOS'97 byla vytvořena pro výpočty průměrných (hodinových či ročních) koncentrací, základní princip její modifikace pro pachové látky spočívá v přepočtu hodinových průměrných koncentrací na odpovídající špičkové hodnoty. Proces modelování rozptylu zápachu lze rozdělit do těchto kroků [88]:

1. Do softwaru SYMOS'97 jsou vložena vstupní meteorologická data a parametry zdroje pachové látky.
2. Pro všechny referenční body v definované síti jsou vypočteny maximální možné hodinové koncentrace pachové látky.
3. Tyto koncentrace jsou přepočteny na špičkové hodnoty vynásobením vhodnými P/M^{15} koeficienty. Hodnoty těchto koeficientů závisí na typu zdroje, stabilitě atmosféry a vzdálenosti referenčního bodu od zdroje.

Obdobně jako při modelování běžných ZL, i v případě modelování rozptylu zápachu je možné znázornit výsledky graficky v podobě izolinií zakreslených do situační mapy okolí zdroje. Body každé izolinie zde odpovídají konstantní hodnotě koncentrace zápachu. Rovněž lze vypočítat délku trvání překročení zadané koncentrace v každém referenčním bodě.

¹⁵Koeficient P/M (peak-to-mean ratio, poměr „špička/průměr“) vyjadřuje podíl takové krátkodobé koncentrace pachové látky, která je dostatečná pro vznik zápachu, a průměrné hodinové koncentrace této pachové látky, vypočtené disperzním modelem [89].

Výhodou popsaného přístupu k modelování rozptylu zápachu je, že při něm zůstává zachována většina výpočetních postupů používaných pro modelování běžných ZL. Porovnáním výstupů modelování rozptylu zápachu s experimentálními daty bylo ověřeno, že modifikovaná metodika SYMOS'97 poskytuje přijatelné výsledky použitelné v praxi [88].

5.7 Výuka modelování rozptylu ZL podle metodiky SYMOS'97

Protože SYMOS'97 je českou metodikou, která je používána především v České republice, rovněž výuka modelování podle této metodiky je prováděna převážně v ČR (např. na PřF UHK, PřF Masarykovy univerzity, Hornicko-geologické fakultě VŠB-TUO a na Fakultě vojenského leadershipu Univerzity obrany v Brně).

Na téma modelování rozptylu ZL v ovzduší podle metodiky SYMOS'97 jsou čas od času pořádány rovněž semináře, na nichž přednáší odborníci z Ministerstva životního prostředí, ČHMÚ či z komerční sféry. Školení v používání softwaru SYMOS'97 nabízí také již zmíněná firma Idea-Envi.

O metodách výuky tohoto tématu se autorovi nepodařilo nalézt žádnou literaturu, což je patrně dáno tím, že výuka SYMOS'97 není v ČR příliš rozšířena a v zahraničí pravděpodobně není vůbec zavedena.

Autorem navržená úloha na modelování rozptylu pachových látek v ovzduší

Pro studenty oboru FTMB a nově připravované environmentálně zaměřené specializace autor navrhl praktickou úlohu na modelování v softwaru SYMOS'97, jejímž tématem je rozptyl pachových látek unikajících z bioplynové stanice.

V rámci přípravy na řešení této úlohy budou studenti seznámeni s tematikou zápachů, včetně možností jejich měření a teoretických základů modelování jejich rozptylu. Poté budou studentům poskytnuty potřebné vstupní údaje pro modelování a situační mapa okolí bioplynové stanice. Úkolem je na základě těchto údajů zjistit, zda zápach vytvářený provozem bioplynové stanice bude zasahovat obytnou zástavbu v nedaleké vesnici.

Řešení úlohy bude provedeno v souladu s metodikou SYMOS'97 upravenou pro modelování šíření zápachu. Studenti nejprve za pomoci vyučujícího vloží do softwaru SYMOS'97 požadovaná vstupní data a manuálně zadají či nechají automaticky vygenerovat polohy referenčních bodů pro výpočet koncentrací. Rovněž nahrají a zkalibrují mapu okolí. Poté nastaví parametry výpočtu (natočení větrné růžice, způsob určování výšky bodů z výškopisu apod.) a spustí výpočet maximálních hodinových koncentrací pachové látky. Získané hodnoty koncentrací v několika vybraných bodech následně přepočtou užitím P/M koeficientů na špičkové hodnoty.

Dalším krokem je grafické zobrazení výsledku formou vykreslení koncentračních izolinií do situační mapy. Při tom je potřeba přiřadit izoliniím špičkové hodnoty koncentrací namísto hodinových průměrů.

Na základě izolinií v mapě a hodnot špičkových koncentrací ve vybraných referenčních bodech bude možno učinit závěr, že bioplynová stanice by neměla uvažovanou oblast obtěžovat zápachem. (Zápach je považován za obtěžující, je-li jeho koncentrace vyšší než $5 \text{ EOU} \cdot \text{m}^{-3}$; koncentrace zápachu v obytné zástavbě této hodnoty nedosahuje.)

Nedílnou součástí této úlohy je závěrečná diskuse o výsledku modelování. Na začátku této diskuse je vhodné připomenout některé předpoklady, z nichž vycházely výpočty:

- Byl použit dostatečně přesný výškopis zájmové oblasti.
- Byla zadána dostatečně hustá síť referenčních bodů.
- Bioplynová stanice je provozována podle zadaných parametrů.
- Použitá větrná růžice odpovídá skutečnosti.

Platnost prvních dvou předpokladů lze relativně snadno ověřit kontrolou výškopisu a sítě referenčních bodů v softwaru SYMOS'97. Zbývající předpoklady nemusí být v praxi splněny z důvodu nesprávného provozu bioplynové stanice či kvůli odlišnosti atmosferických podmínek (zejm. proudění větru) od předpokládaného stavu.

Nesprávný provoz může znamenat, že v bioplynové stanici jsou zpracovávány jiné substráty, než pro které je určena (třeba těla mrtvých zvířat, která vydávají

velmi nepříjemný intenzivní zápach) nebo že substráty jsou nevhodně skladovány. V souvislosti s atmosférickými podmínkami lze poukázat na netypické výkyvy počasí, k nimž dochází v posledních letech a které bývají spojovány s globální změnou klimatu [90]. Následkem případných výkyvů atmosférického proudění by použitá větrná růžice nemusela dostatečně přesně odpovídat skutečnému rozložení směrů a rychlostí větru v zájmové oblasti.

V diskusi je též důležité upozornit, že metodika SYMOS'97 nezohledňuje požadované znečištění ovzduší. V případě, že by v blízkosti obytné zástavby existovaly i další zdroje zápachu, by tedy výsledný zápach již mohl (avšak také nemusel) být obtěžující. Roli zde hraje i značně subjektivní vnímání zápachu: některým lidem nemusí určitý zápach vadit, zatímco jiní jej mohou považovat za nepříjemný.

Prostřednictvím této úlohy se studenti mají nejen naučit, jak modelovat šíření zápachu, ale též si osvojit obecnější pravidla matematického modelování, zejména tato:

- Při matematickém modelování je nezbytné mít na paměti předpoklady, ze kterých vychází použitý model, a rozsah platnosti tohoto modelu.
- Do modelu je nutno zadat správné (a dostatečně přesné) vstupní údaje.
- Výsledky modelování je potřeba správně interpretovat.
- Zodpovědnost za výstupy modelování a za následná rozhodnutí má vždy člověk, nikoliv model.

Podrobnosti o této úloze jsou uvedeny v již zmíněném autorově článku [84].

6 Názory studentů a absolventů na obor FTMB

Názory studentů a absolventů na obor FTMB byly zjišťovány metodou dotazníkového šetření. Navržený dotazník obsahuje 6 otevřených otázek, 4 otázky s výběrem slovně formulované odpovědi a 8 otázek s výběrem číselné hodnoty na škále od 1 do 10. Kromě obecných otázek na studium jako celek jsou v dotazníku zařazeny také otázky týkající se odborných předmětů, které je v plánu inovovat a následně je vyučovat v rámci nové environmentálně zaměřené specializace. Plné znění dotazníku je uvedeno v příloze B.

Dotazník byl předložen studentům a absolventům oboru FTMB, vyplnilo jej celkem 18 respondentů. Studenti vyplňovali dotazníky v papírové podobě ve škole, absolventům byly dotazníky zaslány e-mailem s prosbou o jejich vyplnění a s informací, že vyplněný dotazník mohou buď poslat zpět e-mailem, nebo jej - pro zachování anonymity - vytisknout a doručit do poštovní schránky Katedry fyziky. Všichni absolventi využili první jmenovanou možnost, avšak lze předpokládat, že to neovlivnilo jejich odpovědi, protože při obavě ze ztráty anonymity by dotazník doručili do schránky, nebo jej vůbec nevyplňovali.

6.1 Základní údaje o vzorku respondentů

Odpovědi z úvodní části dotazníku nám poskytly souhrnné údaje o skupině všech 18 respondentů. Jak je u fyzikálně-technicky zaměřených oborů obvyklé, i zde byla zjištěna výrazná početní převaha mužů nad ženami: mezi respondenty bylo 15 mužů (83,3 %) a pouze 3 ženy (16,7 %). Z tabulky 2 je patrné, že převážná většina respondentů (72,2 %) pochází z Královéhradeckého kraje, což odpovídá regionálnímu charakteru UHK.

Přibližně čtvrtina respondentů (27,8 %) studuje či studovala v prezenční formě studia, ostatní (72,2 %) ve formě kombinované. Respondenti před nástupem na vysokou školu vystudovali různé typy středních škol, jak je uvedeno v tabulce 3. Většina respondentů (61,1 %) získala středoškolské vzdělání na střední průmyslové škole, jedná se o absolventy oborů zaměřených na strojírenství, elektrotechniku, elektroniku, výpočetní techniku a IT, stavebnictví, chemii a ochranu životního prostředí.

Tabulka 2: Počty respondentů pocházejících z jednotlivých krajů

Kraj, ze kterého pochází respondent	Počet respondentů
Královéhradecký	13
Středočeský	2
Pardubický	1
Praha	1
Trenčianský (Slovensko)	1

Gymnázium vystudovalo 27,8 % respondentů, jeden respondent absolvoval obchodní akademii a jeden střední odborné učiliště elektrotechnické.

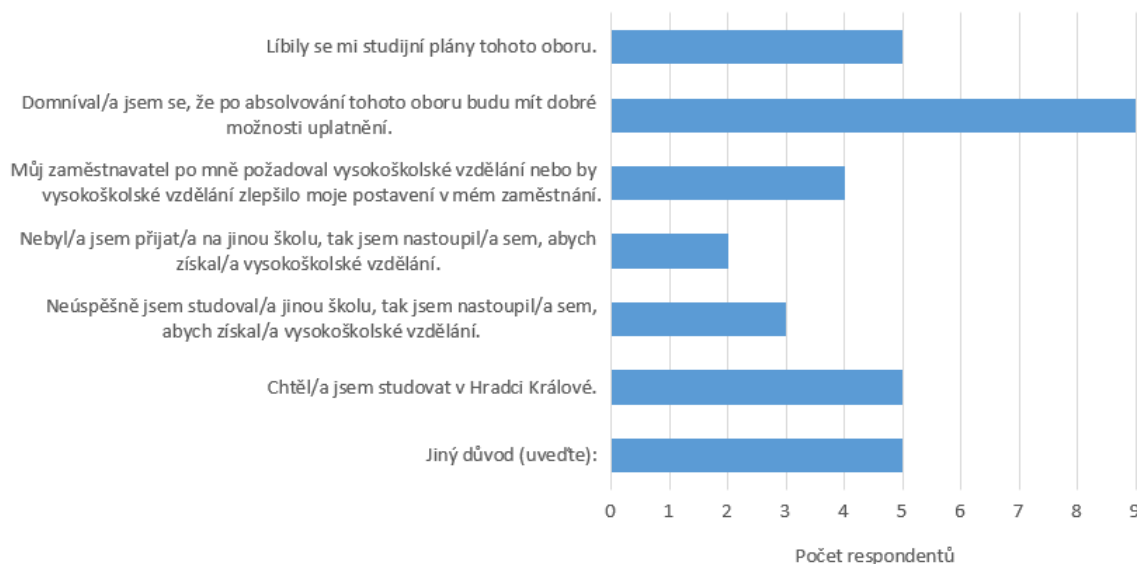
Tabulka 3: Typy středních škol a počty respondentů, kteří je vystudovali

Typ absolvované střední školy	Počet respondentů
Střední průmyslová škola	11
Gymnázium	5
Obchodní akademie	1
Střední odborné učiliště	1

6.2 Důvody respondentů pro studium oboru FTMB

V první dotazníkové otázce jsme zjišťovali, z jakých důvodů se respondenti rozhodli studovat obor FTMB. Jednalo se o jedinou otázku s volbou libovolného počtu nabízených odpovědí, výsledky jsou uvedeny na obr. 11. Polovina respondentů se domnívala, že studium oboru FTMB jim poskytne dobré možnosti pracovního uplatnění. Více než čtvrtině respondentů (27,8 %) se líbily studijní plány tohoto oboru a stejný počet respondentů uvedl, že chtěli studovat v Hradci Králové. Tentýž počet respondentů na tento obor nastoupil proto, že nebyli přijati na jinou školu či jinou školu studovali neúspěšně. Důvodem pro 22,2 % respondentů byla domněnka,

že vysokoškolské vzdělání zlepší jejich postavení v zaměstnání, nebo požadavky jejich zaměstnavatele na to, aby získali vysokoškolské vzdělání. Někteří respondenti využili možnost uvést i další důvody, které nebyly v nabídce - vesměs se jednalo o vyjádření zájmu o fyziku a technické obory.



Obrázek 11: Důvody, proč si respondenti zvolili obor FTMB.

6.3 Názory respondentů na studium obecně

Ve druhé až šesté otázce měli respondenti za úkol vybrat na číselné škále hodnotu, která nejvíce odpovídá jejich názoru na uvedenou charakteristiku studia. Číselná škála u všech otázek sestává z celých čísel od 1 do 10, přičemž číslo 1 znamená, že respondent se zcela přiklání k jedné extrémní variantě, a číslo 10 má význam úplného příklonu k variantě opačné.

Následuje přehled těchto otázek a vyhodnocení odpovědí.

Otázka č. 2: Jak hodnotíte obtížnost studia?

Krajní varianty číselné škály:

Velmi nízká obtížnost	1 ... 10	Velmi vysoká obtížnost
-----------------------	----------	------------------------

Aritmetický průměr a výběrová směrodatná odchylka¹⁶ hodnot zvolených respondentů na číselné škále: **6,3 ± 2,2**

Otázka č. 3: Jak hodnotíte užitečnost studia z hlediska možností pracovního uplatnění?

Krajní varianty číselné škály:

Velmi malé možnosti uplatnění	1 ... 10	Velmi velké možnosti uplatnění
-------------------------------	----------	--------------------------------

Aritmetický průměr a výběrová směrodatná odchylka hodnot zvolených respondentů na číselné škále: **7,1 ± 1,9**

¹⁶Výpočet výběrových směrodatných odchylek je v této práci prováděn užitím obvyklého vztahu $s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$, kde s značí výběrovou směrodatnou odchylku, \bar{x} je střední hodnota výběru, x_i je i -tá hodnota výběru a N je počet prvků výběru.

Otázka č. 4: Do jaké míry je pro Vás studium zajímavé?

Krajní varianty číselné škály:

Velmi nezajímavé	1 ... 10	Velmi zajímavé
------------------	----------	----------------

Aritmetický průměr a výběrová směrodatná odchylka hodnot zvolených respondenty na číselné škále: **7,3 ± 1,4**

Otázka č. 5: Do jaké míry jste motivován/a studium úspěšně dokončit?

Krajní varianty číselné škály:

Silně demotivován/a	1 ... 10	Silně motivován/a
---------------------	----------	-------------------

Aritmetický průměr a výběrová směrodatná odchylka hodnot zvolených respondenty na číselné škále: **7,7 ± 1,8**

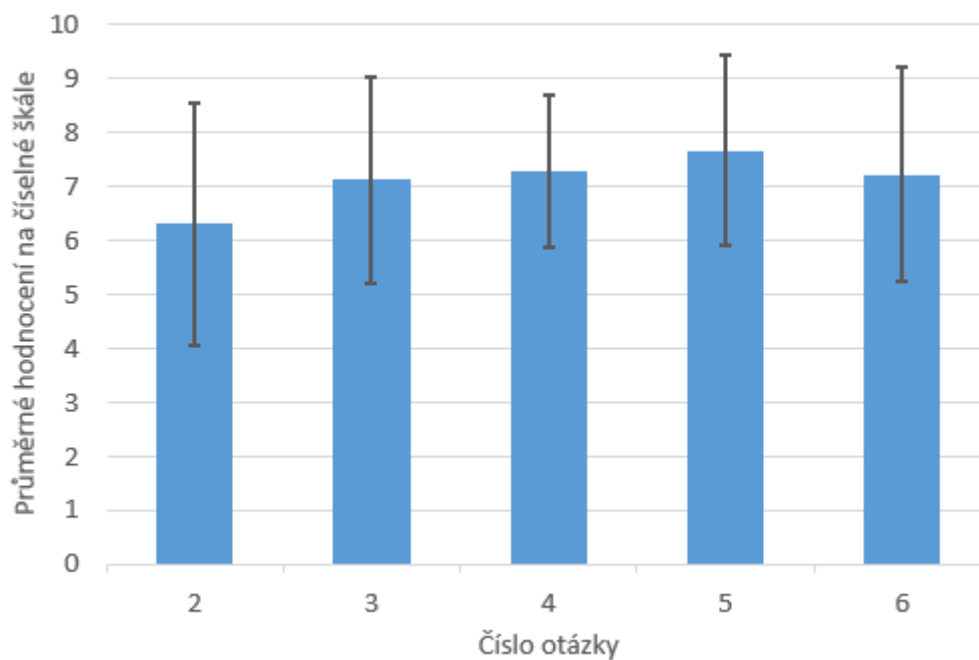
Otázka č. 6: Jak dobře na sebe jednotlivé vyučovací předměty navazují?

Krajní varianty číselné škály:

Předměty na sebe nenavazují, je to nesourodá směs nesouvisejících informací	1 ... 10	Předměty tvoří dobře provázaný celek, návaznost je výborná
---	----------	--

Aritmetický průměr a výběrová směrodatná odchylka hodnot zvolených respondenty na číselné škále: **7,2 ± 2,0**

Grafické porovnání těchto výsledků je uvedeno obr. 12. Vyhodnocení otázky č. 2 ukazuje, že studium je v průměru vnímáno jako spíše obtížné, avšak mezi jednotlivými respondenty jsou v posuzování náročnosti studia značné rozdíly (odpovědi na tuto otázku vykazují největší rozptyl). Vcelku pozitivně je hodnocena návaznost jednotlivých vyučovacích předmětů i užitečnost studia pro pracovní uplatnění. Nejvíce se respondenti shodují v tom, že studium je pro ně docela zajímavé. V průměru nejvyššího hodnocení dosáhla otázka na míru motivace studium dokončit.



Obrázek 12: Výsledky vyhodnocení odpovědí na obecné charakteristiky studia. Svislými úsečkami jsou znázorněny výběrové směrodatné odchylky.

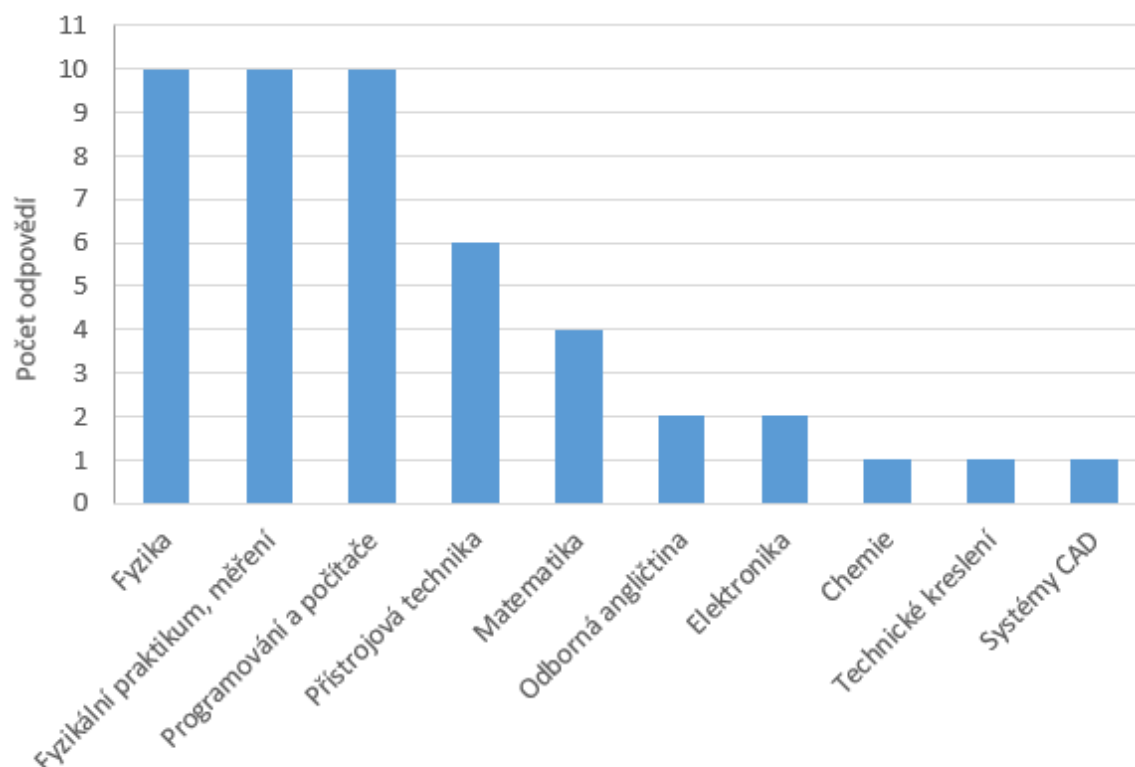
Přestože vždy je možné zlepšovat rozličné aspekty vzdělávacího procesu, na základě těchto výsledků lze říci, že v obecném rámci je studium oboru FTMB vnímáno jeho studenty a absolventy spíše pozitivně.

6.4 Hodnocení učebního plánu

Následujícími otázkami byly zjišťovány názory respondentů na skladbu učebního plánu z hlediska důležitosti konkrétních vyučovacích předmětů. Respondenti měli vypsát předměty, které jim připadají být nejdůležitější, a předměty, které se podle jejich názoru naopak do oboru FTMB nehodí. V obou případech mohli respondenti uvést více předmětů.

Otázka č. 7: Které předměty z tohoto oboru považujete za nejdůležitější vzhledem k uplatnění na trhu práce? (Otevřená otázka.)

Odpovědi na tuto otázku ve většině případů nebyly formulovány jako názvy vyučovacích předmětů, ale spíše obecněji (např. „fyzika“ či „programování“), aniž by bylo zřejmé, který konkrétní předmět měl respondent na mysli. Z tohoto důvodu byly při vyhodnocování odpovědí vytvořeny obecnější tematické kategorie, do kterých byly jednotlivé odpovědi zařazovány. Následně byl pro každou tematickou kategorii určen počet odpovědí, které do ní byly zařazeny. Výsledky jsou uvedeny na obr. 13.



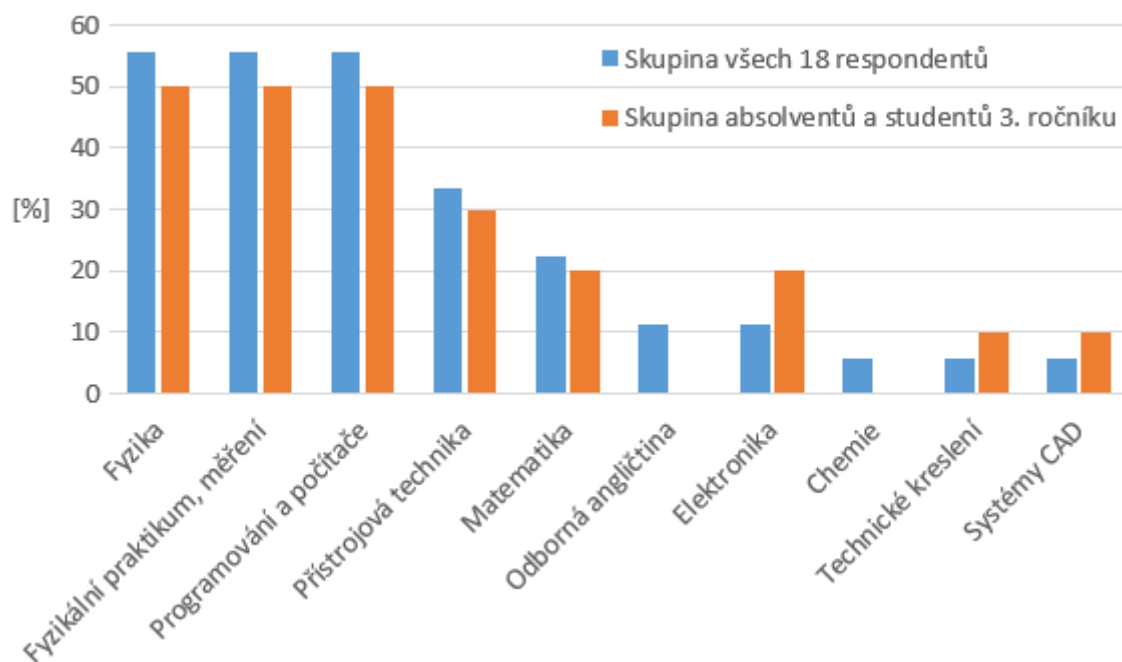
Obrázek 13: Tematické kategorie, které respondenti považují za důležité.

Některé odpovědi byly konkrétnější, tudíž je možno přehled z obr. 13 doplnit o několik upřesňujících informací. Čtyři z celkových deseti odpovědí spadajících do kategorie „Fyzika“ je možno zařadit do podkategorie „Elektřina a magnetismus“, v kategorii „Programování a počítače“ je ve dvou případech zmíněna užitečnost práce s programem Excel a v kategorii „Matematika“ je jednou zmíněna statistika a jednou předmět Doplnková matematika 3, v němž byly vyučovány základy obyčejných diferenciálních rovnic a diferenciální počet funkcí více proměnných.

Tematických kategorií označených za důležité je celkem 10. Více než polovina respondentů považuje za podstatné fyzikálně zaměřené předměty, fyzikální praktika a výuku programování, příp. práci s programem Excel. Pro třetinu respondentů je důležitá výuka přístrojové techniky, ale žádný z nich blíže nespecifikoval, kterou její oblast má na mysli - zda přístroje využívající elektrochemické metody, spektroskopii, přístroje používané v lékařství apod. Necelá čtvrtina respondentů zařadila mezi důležité předměty matematiku.

Uvedené výsledky však mohou být ovlivněny tím, že studenti v době vyplňování dotazníků neměli zkušenost se všemi vyučovacími předměty. Z tohoto důvodu byly navíc vyhodnoceny jen odpovědi absolventů a studentů 3. ročníku, kteří neznali pouze předměty posledního semestru studia. Těchto respondentů bylo celkem 10.

Výsledky získané od této zúžené skupiny respondentů vykazují značnou shodu s výsledky od skupiny všech respondentů (obr. 14). Zatímco pro kategorie Fyzika, Fyzikální praktikum, měření a Programování a počítače se vyslovilo 55,6 % respondentů z původní (nezúžené) skupiny, ze zúžené skupiny to bylo 50 %. Podobná shoda výsledků nastala i pro kategorii Přístrojová technika (33,3 % respondentů z původní skupiny oproti 30 % respondentů skupiny druhé) a pro kategorii Matematika (22,2 % vs. 20 %). Výsledky tedy nejsou významně ovlivněny zařazením odpovědí studentů 1. a 2. ročníku do vyhodnocení této otázky.



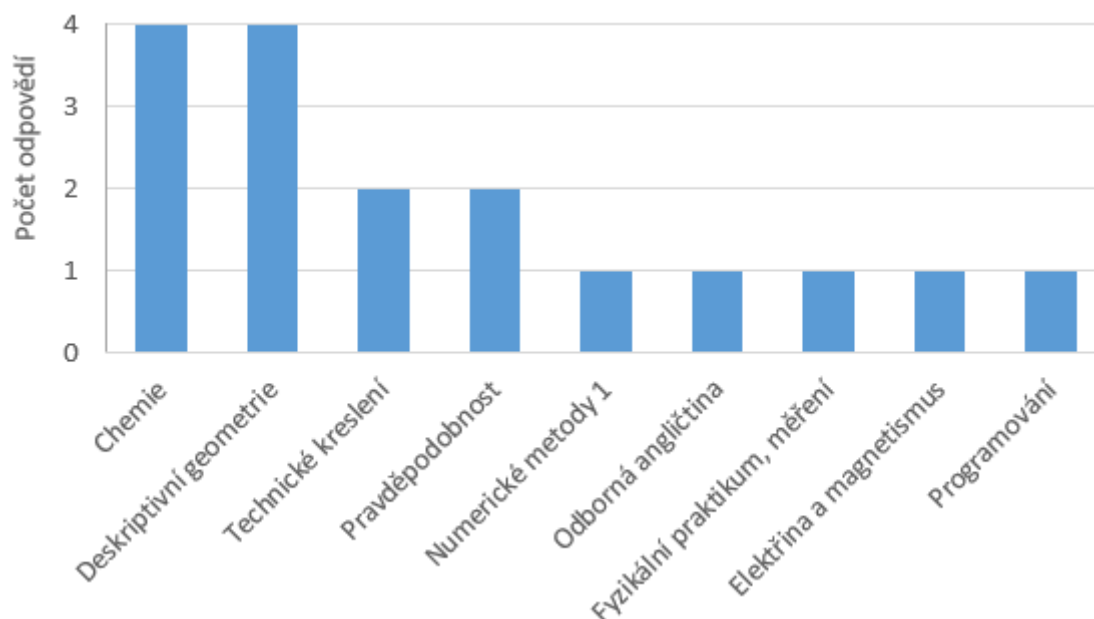
Obrázek 14: Porovnání, kolik procent respondentů z původní skupiny (modrá) a ze zúžené skupiny (oranžová) považuje za důležitou výuku spadající do uvedených oblastí.

Otázka č. 8: Které předměty byste z učebního plánu vynechal/a a proč?
(Otevřená otázka.)

Pro vyhodnocování odpovědí byl zvolen stejný postup jako u předchozí otázky, tj. nejprve byly vytvořeny tematické kategorie, k nimž poté byly přiřazovány odpovědi respondentů. Počty odpovědí spadajících do jednotlivých kategorií byly opět graficky znázorněny (obr. 15).

Na vyřazení z učebního plánu bylo respondenty navrženo 9 tematických kategorií. Necelá čtvrtina respondentů by zrušila výuku chemie a deskriptivní geometrie. Chemie se podle jednoho respondenta nehodí do učebního plánu, podle druhého na ni není v další výuce navázáno a třetí respondent uvedl, že se při výuce chemie nedozvěděl nic nového.

Vyřazení technického kreslení a pravděpodobnosti bylo navrženo dvěma respondenty (11,1 %), každou ze zbývajících pěti kategorií navrhl vždy pouze jeden respondent. K odborné angličtině se jeden respondent vyjádřil, že sice chápe důležitost porozumění cizímu jazyku, ale že čas by se dal využít lépe.



Obrázek 15: Tematické kategorie, které respondenti navrhuji vyřadit z učebního plánu.

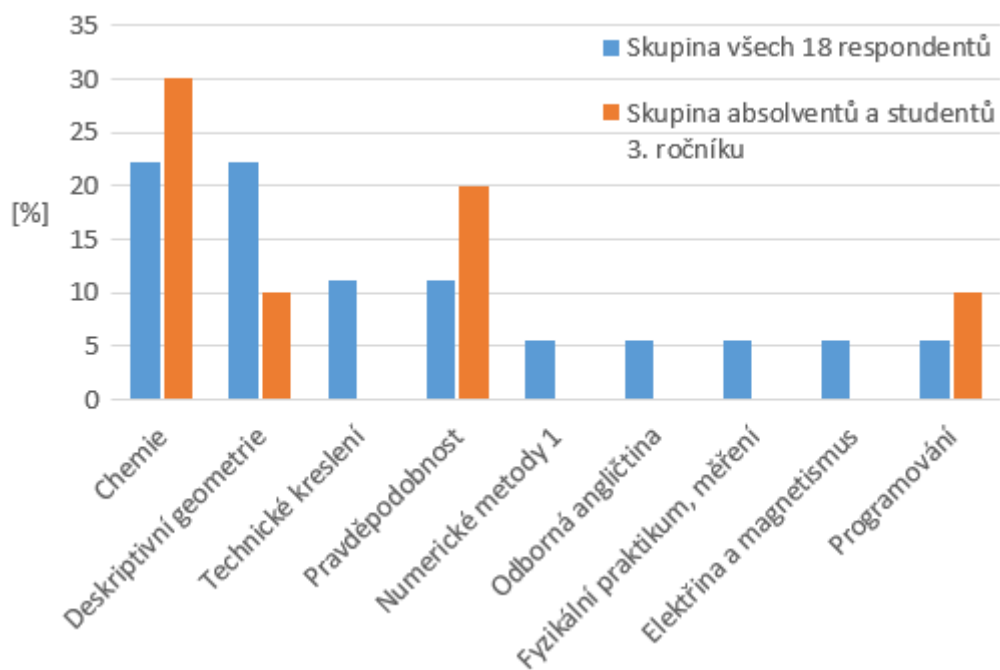
I v tomto případě bylo provedeno porovnání výsledků získaných od skupiny všech 18 respondentů s výsledky od skupiny zúžené na absolventy a studenty 3. ročníku (obr. 16). U obou skupin byla zjištěna poměrně dobrá shoda v tom, že z učebního plánu by se měla vynechat chemie. V částečném souladu jsou výsledky pro deskriptivní geometrii, pravděpodobnost a programování, zatímco návrhy na vyřazení jiných témat pocházejí pouze od studentů 1. a 2. ročníku.

Další otázkou byl zjišťován zájem o vzdělávání formou praktické stáže, respondenti měli vybrat právě jednu z nabízených možností.

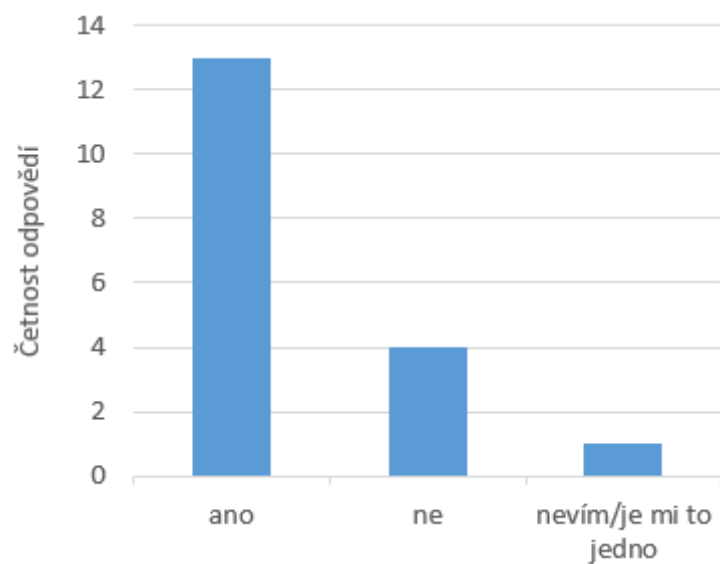
Otázka č. 9: Máte zájem, aby součástí učebního plánu byla praktická několikátýdenní stáž např. v průmyslovém podniku? (Otázka s volbou právě jedné varianty.)

Varianta odpovědi	ano	ne	nevím/je mi to jedno
Četnost odpovědí	13	4	1

Převážná většina respondentů (72,7 %) má o praktickou stáž v rámci studia zájem, necelá čtvrtina zájem nemá a zbývající respondent nemá vyhraněný názor. Grafické znázornění výsledků je uvedeno na obr. 17.



Obrázek 16: Porovnání, kolik procent respondentů z původní skupiny (modrá) a ze zúžené skupiny (oranžová) navrhuje vyřadit z výuky uvedená témata.



Obrázek 17: Zájem o několikátýdenní stáž v rámci studia.

6.5 Otázky ke konkrétním vyučovacím předmětům

Dalšími osmi otázkami byly zjišťovány názory respondentů na předměty Přístrojová technika 1, Monitorovací systémy ochrany prostředí a zdraví a Fyzikální bio-monitoring. Jedná se o předměty, které mají být inovovány a následně zařazeny do nové environmentálně zaměřené specializace, proto považujeme získání zpětné vazby respondentů na tyto předměty za důležité.

Otázka č. 10: Jak hodnotíte užitečnost předmětu Přístrojová technika 1 z hlediska možnosti uplatnění v praxi? (Otázka s výběrem hodnoty na číselné škále.)

Krajní varianty číselné škály:

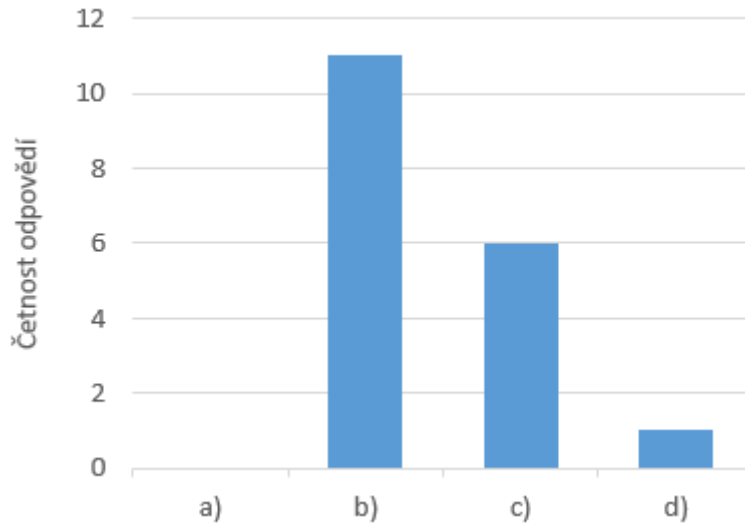
Zcela neužitečný	1 ... 10	Velmi užitečný
------------------	----------	----------------

Aritmetický průměr a výběrová směrodatná odchylka hodnot zvolených respondenty na číselné škále: $6,6 \pm 2,5$

Předmět Přístrojová technika 1 je v průměru vnímán jako spíše použitelný v praxi, avšak v hodnocení jsou značné rozdíly (minimální hodnocení bylo 2, maximální 10).

Otázka č. 11: Jaký máte zájem, aby v předmětu Přístrojová technika 1 byla zařazena praktická výuka doplňující probíranou teorii? (Otázka s volbou právě jedné varianty.)

Varianta odpovědi	Četnost odpovědí
a) Nemám zájem o žádnou praktickou výuku.	0
b) Mám zájem o občasné praktické ukázky probíraných přístrojů.	11
c) Mám zájem o pravidelná laboratorní cvičení.	6
d) Nevím/je mi to jedno.	1



Obrázek 18: Zájem o praktickou výuku v předmětu *Přístrojová technika 1*.

Zájem o praktickou výuku v předmětu *Přístrojová technika 1* je značný. Většina respondentů (61,1 %) by dala přednost občasným praktickým ukázkám, třetina respondentů by nejvíce uvítala pravidelná laboratorní cvičení a zbývající respondent nemá vyhraněný názor.

Otázka č. 12: Jakou změnu/jaké změny byste uvítal/a v předmětu *Přístrojová technika 1*? Např. jaká témata tam zařadit a jaká naopak vypustit? (Otevřená otázka.)

Pět respondentů ve svých odpovědích žádalo větší důraz na praxi. Konkrétně měli na mysli zařazení praktických cvičení a většího množství praktických ukázek probíraných přístrojů, zlepšení návaznosti probírané látky na využití v praxi a zařazení exkurzí, na nichž by studenti viděli přístroje při jejich používání.

Zbývající tři respondenti, kteří se k této otázce vyjádřili, mají zájem o podrobnější probírání látky a případně také o zvýšení hodinové dotace tohoto předmětu.

Otázka č. 13: Jak hodnotíte užitečnost předmětu *Monitorovací systémy ochrany prostředí a zdraví z hlediska možnosti uplatnění v praxi*? (Otázka s výběrem hodnoty na číselné škále.)

Krajní varianty číselné škály:

Zcela neúčinný	1 ... 10	Velmi účinný
----------------	----------	--------------

Aritmetický průměr a výběrová směrodatná odchylka hodnot zvolených respondenty na číselné škále: **5,4 ± 2,8**

V porovnání s předmětem Přístrojová technika 1 dopadlo hodnocení užitečnosti předmětu Monitorovací systémy ochrany prostředí a zdraví o trochu hůře. V průměru není tento předmět vnímán ani jako účinný, ani jako neúčinný pro použití v praxi. I v tomto případě se jednotlivé odpovědi značně lišily (minimální hodnocení bylo 1, maximální 10).

Otázka č. 14: Jakou změnu/jaké změny byste uvítal/a v předmětu Monitorovací systémy ochrany prostředí a zdraví? Např. jaká témata tam zařadit a jaká naopak vypustit? (Otevřená otázka.)

Dva respondenti doporučují probírat látku podrobněji, v další odpovědi je navrženo navýšení hodinové dotace tohoto předmětu a dva respondenti žádají více praktických ukázek a cvičení.

Otázka č. 15: Jak hodnotíte užitečnost předmětu Fyzikální biomonitoring z hlediska možnosti uplatnění v praxi? (Otázka s výběrem hodnoty na číselné škále.)

Krajní varianty číselné škály:

Zcela neúčinný	1 ... 10	Velmi účinný
----------------	----------	--------------

Aritmetický průměr a výběrová směrodatná odchylka hodnot zvolených respondenty na číselné škále: **6,5 ± 2,9**

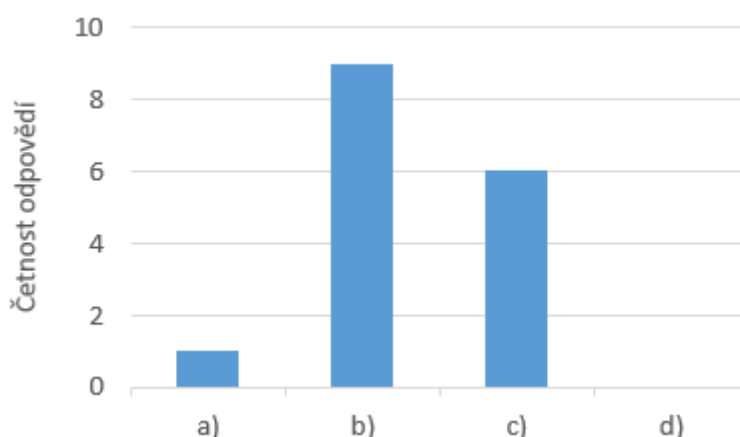
Předmět Fyzikální biomonitoring je v průměru považován za použitelný v praxi přibližně do té míry, jako předmět Přístrojová technika 1. I zde byly zjištěny dosti velké rozdíly v hodnocení (minimální hodnocení bylo 2, maximální 10).

Otázka č. 16: Jakou změnu/jaké změny byste uvítal/a v předmětu Fyzikální biomonitring? Např. jaká témata tam zařadit a jaká naopak vypustit? (Otevřená otázka.)

Návrhy na změny předmětu Fyzikální biomonitring jsou podobné jako v předešlých případech. Tři respondenti se vyjádřili pro podrobnější výklad učební látky (jeden z nich zdůraznil potřebu detailnějšího teoretického vysvětlení fyzikálně-chemických dějů), dva respondenti doporučují doplnit výuku o praktická cvičení, dva by zařadili více exkurzí a jeden navrhuje zvýšit hodinovou dotaci tohoto předmětu.

Otázka č. 17: Jaký máte zájem, aby v předmětu Fyzikální biomonitring byla zařazena praktická výuka doplňující probíranou teorii? (Otázka s volbou právě jedné varianty.)

Varianta odpovědi	Četnost odpovědí
a) Nemám zájem o žádnou praktickou výuku.	1
b) Mám zájem o občasné praktické ukázky probíraných přístrojů.	9
c) Mám zájem o pravidelná laboratorní/terénní cvičení.	6
d) Nevím/je mi to jedno.	0



Obrázek 19: Zájem o praktickou výuku v předmětu Fyzikální biomonitring.

O praktickou výuku v tomto předmětu je podobný zájem jako u předmětu Přístrojová technika 1. Pouze jeden respondent nestojí o žádnou praktickou výuku, polovina respondentů se vyslovila pro občasné praktické ukázky probíraných metod a třetina vyjádřila zájem o pravidelná laboratorní cvičení. Zbývající dva respondenti na tuto otázku neodpověděli.

Otázka č. 18: Pokud chcete sdělit jakoukoli připomínku k oboru „Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika“, napište ji zde: (Otevřená otázka.)

Poslední částí dotazníku (nejedná se v pravém slova smyslu o otázku) byla výzva k napsání libovolné připomínky týkající se tohoto oboru. Tuto možnost využilo deset respondentů, hlavní myšlenky jejich připomínek lze shrnout do následujících bodů:

- Je dobře propojena teoretická a praktická výuka fyziky.
- Exkurze byly zajímavé a byly přínosem.
- Tento obor vytváří dobrou kombinaci tří tematických okruhů: fyziky, techniky a informačních technologií.
- Obor obsahuje několik „zaměření“, což vede k obecným vědomostem bez větších detailů a následnému snížení uplatnitelnosti absolventů v praxi.
- Pro doplnění studia by mohl být zajímavý předmět Meteorologie.
- Bylo by vhodné:
 - zařadit více praktických ukázek a cvičení (modelování, měření, ale též počítání příkladů apod.),
 - měření, fyziku, přístrojovou techniku a elektrotechniku probírat více do hloubky,
 - zaměřit výuku více na zdravotnictví, konkrétně na radiologii (vzhledem k tomu, že PřF je v Hradci Králové),
 - mít více matematiky,
 - programovat v jazyce Python, zařadit výuku na platformách Arduino a Raspberry Pi formou praktik či semestrální práce, ideálně to spojit s fyzikálními praktiky,

- zařadit výuku práce s typografickým systémem Latex,
- rozšířit technické kreslení.

V uvedeném přehledu je opět patrný požadavek na praktické zaměření studia, resp. na vhodné propojení teorie s praxí. Na druhou stranu, některé názory se vzájemně značně odlišují, např. zatímco někdo oceňuje vhodnou kombinaci fyziky, techniky a informačních technologií, jinému respondentovi se nelíbí získávání obecných znalostí namísto hlubších znalostí užšího okruhu témat. Dosti velká rozmanitost návrhů, co by šlo změnit, může souviset se značnou šíří záběru tohoto oboru - různí respondenti pak mohou mít různé představy, kterým směrem by tento obor měl být zaměřen.

Poznámka k vyhodnocování odpovědí na otázky s výběrem hodnoty na číselné škále:

Na otázku č. 10 odpovědělo 17 respondentů, na otázku č. 15 dalo odpověď 15 respondentů. Na otázku č. 13 odpovědělo pouze 10 respondentů, protože předmět Monitorovací systémy ochrany prostředí a zdraví je zařazen až do třetího ročníku studia. Přestože počty odpovědí na tyto otázky nejsou ideální pro statistické zpracování výsledků, považujeme je za dostatečné pro získání orientačního přehledu o názorech studentů a absolventů oboru FTMB.

6.6 Závěry z vyhodnocení dotazníkového šetření

Výsledky tohoto předvýzkumu ukazují, že respondenti jsou v průměru spokojeni se studiem oboru FTMB. Studium je vnímáno jako spíše obtížné, ale též docela zajímavé, s celkem dobrou návazností vyučovacích předmětů.

Pro respondenty je důležité, aby studium bylo zaměřeno prakticky, s čímž patrně souvisí zájem mnohých z nich o zařazení praktických ukázek přístrojové techniky, laboratorních cvičení a odborné stáže do učebního plánu. Užitečnost studia z hlediska uplatnitelnosti je respondenty hodnocena v průměru pozitivně.

Pro uchazeče o studium hraje nejdůležitější roli patrně vyhlídka na dobré pracovní uplatnění. Lze tedy předpokládat, že k atraktivitě nově připravované specializace studia přispěje praktické zaměření této specializace a prezentace zajímavých možností uplatnění absolventů na trhu práce.

Motivace k úspěšnému dokončení studia by mohla být zvýšena zařazením většího množství ukázek přístrojové techniky, dostatku praktických cvičení a odborné stáže. Takto pojaté vzdělávání může být absolventům užitečné nejen při vykonávání odborné práce, ale též při jejím hledání, protože pro zaměstnavatele hrají praktické zkušenosti uchazeče často významnou roli.

7 Vyhodnocení výuky Ramanovy spektroskopie

Pro vyhodnocení výuky Ramanovy spektroskopie, zavedené na PřF UHK v akademickém roce 2018/2019, byla použita metoda polostrukturovaného skupinového rozhovoru. Rozhovor byl veden zvláště se třemi studenty oboru FTMB a zvláště se třemi zahraničními studenty, kteří tuto výuku absolvovali v rámci svého studijního pobytu na PřF UHK (dva z těchto zahraničních studentů pocházejí z Rumunska, třetí studentka z Brazílie). Autor se při rozhovorech snažil získat odpovědi na následující výzkumné otázky:

1. Dokážou studenti propojit své znalosti o Ramanově spektroskopii s možnostmi jejího využití v praxi?
2. Mají studenti zájem prohlubovat svoje znalosti Ramanovy spektroskopie? Pokud ano, v jakém směru?
3. Kolik času by mělo být věnováno výuce Ramanovy spektroskopie?
4. Chtějí studenti používat Ramanovu spektroskopii v praxi? Domnívají se, že k tomu v zaměstnání budou mít příležitost?
5. Jak výuka Ramanovy spektroskopie zapadá do studijního plánu oboru FTMB? (Tato otázka je relevantní pouze pro domácí studenty.)

Pro uvedení rozhovoru a navození neformální atmosféry shlédli účastníci před jeho začátkem krátký úryvek z filmu Metanol, v němž bylo vyobrazeno používání Ramanova spektrometru pro rozlišení metanolu od etanolu v době tzv. metanolové aféry v roce 2012. Poté byla účastníkům sdělena pravidla rozhovoru - především, že vždy má hovořit pouze jedna osoba a každý má právo říci svůj názor a vyjadřovat se k názorům ostatních. Účastníci byli ujištěni, že jejich výpovědi nebudou mít žádný vliv na jejich další studium (tazatel již nebude tyto studenty učit, závěry z rozhovoru budou anonymní, audiozáznam rozhovoru bude po vyhodnocení smazán). Autor zjišťoval odpovědi na výzkumné otázky nepřímo, tj. kladením trochu jinak položených otázek a podněcováním účastníků ke vzájemné diskusi (poslední jmenované se setkala pouze s částečným úspěchem).

7.1 Vyhodnocení výpovědí domácích studentů

1. Všichni tři domácí studenti prokázali, že si dokáží propojit získané znalosti o RS s možnostmi jejího praktického využití v různých oblastech. Napadlo je využití RS ve výrobních podnicích, v kriminalistice, ochraně životního prostředí i v základním výzkumu (zde se rozběhla krátká diskuse o tom, co všechno by se dalo pomocí RS zjišťovat při zkoumání archeologických nálezů – toto téma studenty očividně zaujalo).
2. Všichni domácí studenti též projevíli zájem o další vzdělávání v RS i v další přístrojové technice, např. ve skenovací elektronové mikroskopii. Shodovali se v tom, že by měla být posílena praktická část výuky, tedy práce s Ramanovým spektrometrem.

„... ať člověk má větší možnost praktického vyzkoušení si těch jednotlivých přístrojů, jak toho Ramanova spektrometru, tak i toho skenovacího elektronového mikroskopu.“

„... ukázat si různé možnosti, co ty přístroje dovedou, vyzkoušet si to v různých odvětvích, na různých materiálech ...“

Nezavrhovali ani teoretickou přednášku:

„Každopádně i přednáška teorie a principů, na čem je to měření založeno, je určitě důležitá.“

Názory na zastoupení teoretické výuky se však lišily:

„Ta čistě teoretická část by mohla možná být delší.“

„Myslím, že teorie byla dostačující a měli bychom to směřovat spíš na to praktické využití.“

Dva studenti navrhli více se věnovat interpretaci Ramanových spekter, např. učit se rozpoznávat ve spektru různé druhy chemických vazeb. Chtějí lépe rozumět interpretaci spekter i přesto, že při výuce poznali rozsáhlou databázi Ramanových spekter, která analýzu spekter dokáže provádět do značné míry automaticky:

„Člověk si musí umět poradit. Není to tak, že pokud to neumí ten přístroj, tak já to také neumím. Tudíž nespolehat se jen na tu techniku.“

3. Dva studenti by uvítali navýšení hodinové dotace výuky RS. Jeden navrhl mít alespoň čtyři celodenní bloky výuky, druhý doporučil, aby výuka RS trvala déle než jeden semestr a RS a související moderní přístrojová technika byla vyučována i v navazujícím magisterském studiu. Třetí student se k tomuto tématu nevyjádřil.
4. Dva studenti by chtěli požívat RS ve svém zaměstnání, ať už by se jednalo o práci v laboratoři, ve výrobním podniku či v terénu; třetí student ještě neví. Studenti zatím nemají představu, zda v zaměstnání budou mít příležitost s Ramanovým spektrometrem skutečně pracovat.

„Popravdě si moc nedovedu představit, jaké bude zastoupení (RS) na trhu práce nebo jak snadné bude sehnat práci.“

5. Dva ze studentů se domnívají, že zavedení výuky RS do oboru FTMB bylo vhodné, třetí student se přímo k tomuto nevyjádřil.

„Tento předmět do tohoto oboru zapadá. Bylo by fajn, kdyby přístrojů jako je Ramanův spektrometr nebo skenovací elektronový mikroskop bylo víc, třeba i trochu jiných ... že by se toho dalo vyzkoušet z praktického hlediska víc.“

„Já myslím, že by prospěla trochu větší dotace času těmto předmětům, protože je to hlavní náplní našeho studijního oboru.“

Všichni tři studenti ocenili, že výuka RS byla zařazena až do třetího ročníku studia. Důvodem byla návaznost na jiné vyučovací předměty, zejména na předmět Částice a pole:

„Rozhodně jsme se dozvěděli vědomosti potřebné k tomuto předmětu v předmětu Částice a pole.“

„Nemyslím, že by se to mělo učit dřív, protože k pochopení principu měření s Ramanem je potřeba znalost částicové fyziky.“

„To měření by (studenti) zvládli, program by je navedl nebo by se daly naučit ty základní principy, ale nedokázali by to asi pochopit v takové míře, dokud by neměli tu fyziku částic a polí.“

7.2 Vyhodnocení výpovědí zahraničních studentů

1. Rovněž všichni zahraniční studenti si dokázali propojit získané znalosti o RS s jejím potenciálním využitím v praxi. Hovořili např. o kontrole kvality ve výrobě, poznávání padělků různých výrobků či o využití RS ve výzkumu (pro analýzy hub používaných při bioremediaci a pro analýzy biosurfaktantů).
2. Všichni zahraniční studenti si též chtějí rozšiřovat své znalosti RS. Dva z nich navrhli, aby v přednášce byl věnován větší prostor studiu spekter:

„V teoretické části bychom se měli učit interpretovat spektra.“

Třetí student projevil zájem o detailnější vysvětlení různých parametrů měření:

„Rád bych se dozvěděl více o parametrech Ramanova spektrometru a o tom, jak ovlivňují výsledky analýz.“

Všichni studenti by se také rádi podrobněji seznámili s technickou stránkou Ramanova spektrometru:

„Myslím, že pokud pracujete s tímto přístrojem, je důležité znát technické základy, jak funguje. A znát součástky tohoto přístroje a vědět, co dělat, když něco přestane fungovat ...“

Hlubší teorie, např. výpočty energetických hladin v molekule, žádného ze studentů neláká.

„Je dobré znát principy (RS), ale my nevytváříme software (pro RS), takže si nemyslím, že bychom měli vědět všechno o výpočtech.“

3. Všichni zahraniční studenti uvítali možnost věnovat výuce RS více času. Jedna studentka považuje za vhodné prodloužit přednášku o hodinu, ostatní neměli konkrétní návrhy pro navýšení hodinové dotace.
4. Dva studenti chtějí pracovat s Ramanovým spektrometrem i ve svém budoucím zaměstnání. Jeden z nich považuje za dobrou možnost pracovat jako kontrolor kvality výrobků, druhá se chce věnovat výzkumu:

„Na sto procent bych chtěla dělat výzkum, protože v mé rodině - moje matka a můj dědeček - se věnují výzkumu.“

Třetí studentka považuje RS za zajímavý přístroj, se kterým by chtěla pracovat např. na odborné stáži, ale není si jistá, zda by ji práce s ním dlouhodobě bavila:

„Nemyslím si, že bych mohla pracovat roky a roky s tímto zařízením, protože měření na něm jsou rutinní ... záleží na vzorcích a na tom, jakému výzkumnému tématu bych se věnovala ... Možná, že postupem času získám větší nadšení pro tento přístroj - protože to se stává, když se učíte, stále se zlepšujete a můžete objevovat zajímavé věci.“

Co se týče možností pracovního uplatnění, studenti považují za problém vysokou cenu Ramanova spektrometru, která může omezit dostupnost tohoto přístroje pro zaměstnavatele:

„Své znalosti používání tohoto přístroje budu moct využít, pokud tam, kde budu pracovat, budou mít peníze na tento přístroj.“

„Nevíš, jestli budou mít peníze (na nákup Ramanova spektrometru).“

„V Brazílii je tento přístroj tak drahý...“

7.3 Závěry z vyhodnocení výuky Ramanovy spektroskopie

Všichni dotazovaní studenti (domácí i zahraniční) pokládají RS za zajímavé téma, ve kterém by se chtěli dále vzdělávat. Domácí studenti kladou největší důraz na dostatek laboratorních cvičení, zahraniční studenti by uvítali prohloubení znalostí o technické stránce Ramanova spektrometru. Studenti neodmítají ani teoretickou přednášku o RS, avšak o studium hlubší teorie příliš nejevili zájem. Ocenili, že databáze Ramanových spekter, s níž pracovali při laboratorním cvičení, umožňuje automaticky identifikovat látky ve vzorku, avšak většina studentů má přesto zájem o podrobnější výuku interpretace Ramanových spekter. Většina dotazovaných studentů by též uvítala navýšení časové dotace výuky RS.

Všichni studenti vidí v RS metodu použitelnou v různých oblastech praxe, šíře jejich nápadů na využití Ramanova spektrometru byla značná. Dva domácí a dva zahraniční studenti projevili zájem používat Ramanův spektrometr v budoucím zaměstnání, avšak zatím neví, zda budou mít tuto příležitost.

Podle mínění dvou domácích studentů bylo zavedení výuky RS do oboru FTMB vhodné (třetí student se nevyjádřil), všichni domácí studenti schvalují, že toto téma je vyučováno až ve třetím ročníku.

8 Porovnání vybraných fyzikálně-technických oborů na českých vysokých školách

Pro porovnání byly vybrány čtyři bakalářské fyzikálně-technické obory, které se svým zaměřením blíží zmíněné environmentálně zaměřené specializaci připravované na PřF UHK. Každý z těchto oborů je zaveden na jiné české univerzitě, avšak všechny jsou vyučovány na přírodovědně zaměřených fakultách a všechny spadají do studijního programu Aplikovaná fyzika nebo Fyzika. Jedná se o tyto obory:

1. Laboratorní a měřicí technika
2. Monitorování životního prostředí
3. Přístrojová fyzika
4. Aplikované počítačové modelování

Do porovnání byl zařazen také obor FTMB, dobíhající na PřF UHK.

Za účelem porovnání těchto oborů byly nejprve shromážděny základní informace o každém z nich a zapsány do přehledu obsahujícího stručnou charakteristiku oboru, profil absolventa a možnosti jeho uplatnění. Dále byly podrobně prostudovány učební plány každého oboru, včetně sylabů jednotlivých vyučovacích předmětů.

Témata probíraná v povinných předmětech byla přiřazována k odpovídajícím blokům vyučovacích předmětů a takto strukturovaně zapsána do přehledové tabulky. Pro každý blok výuky byl rovněž zjištěn celkový počet vyučovacích hodin věnovaných tématům tohoto bloku, tedy celková hodinová dotace tohoto bloku. Tyto hodinové dotace byly určovány na základě hodinových dotací povinných předmětů vyučovaných v prezenční formě studia. V případě, že v sylabu některého předmětu byla uvedena témata spadající do více bloků, byla do těchto bloků v odpovídajícím poměru rozdělena i hodinová dotace tohoto předmětu. Tato situace však nastávala pouze výjimečně.

Témata povinně volitelných předmětů jsou u každého oboru vypsána mimo tabulku, zároveň je uveden odhad celkového počtu hodin této skupiny předmětů, které student musí absolvovat. Tento odhad je získán přepočtem z minimálního

požadovaného množství studijních kreditů za povinně volitelné předměty a z průměrné hodinové kreditové hodnoty těchto předmětů.

Autor si je vědom, že takto získaný číselný výsledek je pouze přibližným odhadem, avšak přesný jednoznačný výsledek nelze určit. Důvodem je, že poměr počtu kreditů ku hodinové dotaci se u různých předmětů často liší, tudíž studenti, kteří si zvolí předměty s menším poměrem počtu kreditů ku hodinové dotaci, musí absolvovat více hodin výuky než studenti, kteří si vyberou předměty, jež mají tento poměr větší.

Ve všech porovnávaných oborech je požadováno získat za celé studium alespoň 180 kreditů. Na základě tohoto limitu byly určeny i počty hodin (nepovinně) volitelných předmětů, které student musí absolvovat za předpokladu, že z povinně volitelných předmětů získá pouze minimální povolený počet kreditů. I v tomto případě se jedná pouze o odhad provedený stejným způsobem jako v případě povinně volitelných předmětů.

Následuje přehledný souhrn informací o porovnávaných oborech, vytvořený uvedeným způsobem.

8.1 Laboratorní a měřicí technika

(Zpracováno s použitím zdrojů [91, 92, 93] a [94].)

Základní údaje o oboru:

Univerzita: Masarykova univerzita

Fakulta: Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Aplikovaná fyzika

Forma studia: prezenční/kombinovaná

Standardní doba studia: 3 roky

Přijímací zkouška: test studijních předpokladů, nebo odborný test z fyziky, nebo oba tyto testy (uchazeč si zvolí jednu z těchto možností)

Stručný popis oboru:

Laboratorní a měřicí technika je profesní bakalářský obor zaměřený na využití aplikovaných fyzikálních disciplín při obsluze a základním servisu drahých a sofistikovaných přístrojů používaných v mnoha oborech lidské činnosti. Studenti jsou obeznámeni s principy činnosti mnoha druhů přístrojů z rozličných oborů a učí se tyto přístroje kvalifikovaně používat; své odborné znalosti mohou využít i při práci s přístroji, s nimiž se setkají poprvé. Velký důraz je kladen na práci s typickými přístroji používanými ve fyzikálních, geologických a chemických oborech. Studenti se rovněž učí navrhnout nové, pro konkrétní problém přizpůsobené měřicí postupy, fundovaně rozhodovat o případné inovaci přístrojů apod. Předpokládá se přímý nástup absolventů do praxe.

Profil a uplatnění absolventa:

Absolvent oboru Laboratorní a měřicí technika disponuje základními poznatky z elektroniky, mikrovlnné techniky, měřicí techniky, stopové analýzy prvků a analytických metod používaných v chemii. Ovládá základy analýzy minerálů a hornin, dovede provádět sběr vzorků a statistické vyhodnocování získaných dat. Má přehled o diagnostických a analytických metodách založených na fyzikálních principech a využívajících moderní přístrojovou techniku, získal také praktické zkušenosti s používáním těchto metod. (Konkrétně se jedná např. o elektronovou mikroskopii, hmotnostní spektroskopii, diagnostiku povrchů, laserovou techniku apod.)

Absolvent nachází uplatnění při obsluze a kvalifikované údržbě přístrojů, ale též při zpracování a interpretaci dat. Oblastmi uplatnění jsou např. základní i aplikovaný výzkum, laboratorních provozy i specializované laboratoře, metrologické instituce, specializovaná diagnostická pracoviště, zkušební ústavy apod.

Náplň výuky:

Základní přehled povinné náplně výuky oboru Laboratorní a měřicí technika podává tabulka 4. Každý řádek tabulky obsahuje název jednoho bloku vyučovacích předmětů a dále uvádí:

- celkovou hodinovou dotaci povinných předmětů tohoto bloku¹⁷,
- souhrn témat probíraných v povinných předmětech tohoto bloku.

Tabulka 4: Přehled povinné náplně výuky oboru Laboratorní a měřicí technika

Blok výuky	Hodinová dotace	Témata povinných předmětů
Základní kurz matematiky	13	práce s vektory a maticemi, lineární algebra, řešení soustav lineárních rovnic, matematická analýza (limity, derivace, integrály), obyčejné diferenciální rovnice, diferenciální počet funkcí více proměnných, vektorová analýza, tenzory, komplexní čísla, pravděpodobnost a statistika
Základní kurz fyziky	17	mechanika, molekulová fyzika, termika, elektřina a magnetismus, kmity, vlny, optika, úvod do fyziky mikrosvěta
Základní kurz chemie	6	základy obecné, fyzikální, anorganické a organické chemie; teorie instrumentální analýzy v chemii (elektroanalytické, optické a separační metody), metody atomové a molekulové spektroskopie
Fyzikální praktikum	13	chyby měření, numerické (statistické) zpracování experimentálních dat, měření základních fyzikálních veličin z mechaniky, termiky, elektřiny a magnetismu, optiky a fyziky mikrosvěta
Chemické praktikum	9	zacházení s chemickými látkami, základní laboratorní operace (filtrace, krystalizace, destilace, rektifikace, sublimace, titrační metody), základní metody určování fyzikálně-chemických konstant látek, instrumentální metody (elektrogravimetrie, atomová absorpční a emisní spektroskopie, potenciometrie, konduktometrie atd.)

¹⁷Hodinová dotace je udávána jako počet hodin daného bloku, které by byly vyučovány týdně, pokud by veškerá výuka povinných předmětů tohoto bloku probíhala v průběhu jednoho semestru. Stejný způsob vyjádření hodinových dotací je použit i v tabulkách pro ostatní porovnávané obory.

Odborné předměty	32	<p>vakuová fyzika a technika, principy běžných elektronických přístrojů (záznam zvuku, monitory, ultrazvuk v lékařství a průmyslu apod.), optická a elektronová mikroskopie, fyzikální a chemické metody analýzy minerálů a hornin (RTG strukturní analýza, elektronová mikroskopie, spektrální metody v oblastech gama, RTG, VIS a IR, silikátová analýza, chromatografické a elektrochemické metody apod.);</p> <p>vlastnosti a využití vysokofrekvenčního elektromagnetického vlnění, elektronika a její aplikace (nejdůležitější prvky elektronických obvodů: zdroje napětí a proudu, polovodičové diody, tranzistory, zesilovače, usměrňovače, oscilátory, AD a DA převodníky apod., měření vlastností základních elektronických součástek, návrh a zapojení elektronického obvodu), měřicí technika (analogové a digitální měřicí přístroje, osciloskopy, převodníky, měření šumu součástek a obvodů atp.);</p> <p>základy technického kreslení, práce s jednoduchými dílenskými nástroji (vrtání, řezání, pilování, ohýbání plechu, pájení), elektronické práce (vytvoření a oživení jednoduchého elektronického zapojení na desce plošného spoje)</p>
------------------	----	---

Kromě povinných předmětů musí každý student absolvovat ještě alespoň dva povinně volitelné odborné předměty o celkovém hodinovém rozsahu 3 až 5 hodin týdně po dobu jednoho semestru (v závislosti na hodinové dotaci zvolených předmětů). V povinně volitelných předmětech jsou zahrnuta tato témata: spektrální metody analýzy látek (infračervená, luminiscenční a Ramanova spektroskopie, hmotnostní spektroskopie apod.), elektrochemické metody analýzy látek (elektroforéza, izotachoforéza atp.), numerické metody zpracování experimentálních dat pomocí počítače (využití programů MS Excel, STATISTICA, Matlab, Maple apod.) a technologie deposice tenkých vrstev a povrchových úprav materiálů.

Pro dosažení požadovaného počtu studijních kreditů si student musí zapsat ještě přibližně 14 volitelných odborných předmětů o celkovém hodinovém rozsahu cca 28 hodin týdně po dobu jednoho semestru (v závislosti na kreditové hodnotě a hodinové dotaci zvolených předmětů).

Volitelné předměty obsahují širokou škálu témat: demonstrační experimenty k základnímu kurzu fyziky; praktikum z optické, elektronové a rentgenové mikroskopie a z mikroskopie atomárních sil, hmotnostní spektrometrii biomolekul, hmotnostní spektrometrii s indukčně vázaným plazmatem, RTG difraktometrii, fyzikální principy a aplikace molekulové luminiscence; praktikum z vakuových a čerpacích systémů; výboje v plynech a jejich využití v průmyslu; vybraná témata z fyziky kondenzovaných látek, fyzikální principy technologie výroby polovodičů; číslicovou elektroniku, řízení experimentu počítačem, programování v jazyce C a v Matlabu, pokročilé numerické metody, práci s typografickým systémem Latex aj.

Povinná výuka cizích jazyků není zavedena, avšak každý student má povinnost před státní závěrečnou zkouškou absolvovat zkoušku z odborného anglického jazyka. Jako přípravu na tuto zkoušku je možno navštěvovat volitelnou výuku odborného anglického jazyka v rozsahu 2 až 4 hodiny týdně po dobu jednoho semestru.

V tomto oboru nejsou zařazeny žádné odborné stáže ani exkurze.

8.2 Monitorování životního prostředí

(Zpracováno s použitím zdrojů [95, 96] a [97].)

Základní údaje o oboru:

Univerzita: Slezská univerzita v Opavě

Fakulta: Filozoficko-přírodovědecká fakulta v Opavě

Studijní program: Aplikovaná fyzika

Forma studia: prezenční

Standardní doba studia: 3 roky

Přijímací zkouška: nekoná se

Stručný popis oboru:

Bakalářský, prakticky zaměřený obor Monitorování životního prostředí připravuje odborníky v oblasti monitorování a ochrany životního prostředí. Náplň studia zahrnuje především fyzikální disciplíny aplikované na tuto problematiku, principy měření vybraných fyzikálních veličin nezbytných pro monitoring životního prostředí a základy veřejné správy, včetně její aplikace při ochraně životního prostředí. Zařazena je rovněž výuka související legislativy.

Profil a uplatnění absolventa:

Absolvent oboru Monitorování životního prostředí má široký okruh znalostí: orientuje se v environmentálních a ekologických tématech, dokáže provádět měření fyzikálních veličin charakterizujících životní prostředí, je seznámen s matematickým modelováním znečištění ovzduší, ovládá základy elektroniky a programování. Také zná fungování veřejné správy a související právní předpisy a má přehled o environmentální politice České republiky a Evropské unie.

Absolventi tohoto oboru jsou připraveni zastávat pozice odborných pracovníků nebo referentů na nižším nebo středním stupni řízení v různých úsecích regionálního rozvoje zaměřených na problematiku životního a pracovního prostředí. Mohou se uplatnit v územních orgánech státní správy, jako zaměstnanci různých odborů na obecních, městských i krajských úřadech, v lesnictví, v zemědělských a průmyslových podnicích, ale také např. v poradenských firmách, které zajišťují rozvoj různých podnikatelských aktivit v oblasti životního a pracovního prostředí a zaměstnanosti v obcích a regionech.

Náplň výuky:

Základní přehled povinné náplně výuky oboru Monitorování životního prostředí je uveden v tabulce 5. Každý řádek tabulky obsahuje název jednoho bloku vyučovacích předmětů a dále uvádí:

- celkovou hodinovou dotaci povinných předmětů tohoto bloku,
- souhrn témat probíraných v povinných předmětech tohoto bloku.

Tabulka 5: Přehled povinné náplně výuky oboru Monitorování životního prostředí

Blok výuky	Hodinová dotace	Témata povinných předmětů
Základní kurz matematiky	18	práce s vektory a maticemi, lineární algebra, řešení soustav lineárních rovnic, matematická analýza (limity, derivace, integrály), analytická geometrie, obyčejné diferenciální rovnice, teorie polynomů a řad, numerická matematika (řešení rovnic, interpolace, integrace, derivace,...), komplexní čísla, pravděpodobnost a statistika
Základní kurz fyziky	19	mechanika, molekulová fyzika, termika, elektřina a magnetismus, optika, úvod do fyziky mikrosvětla
Fyzikální praktikum	11	chyby měření, numerické (statistické) zpracování experimentálních dat, vlastnosti a konstrukce analogových a digitálních přístrojů, měření základních fyzikálních veličin z mechaniky, termiky, elektřiny a magnetismu, optiky
Odborné předměty	58	<p>ekologie a ochrana životního prostředí (ekosystémy, fotosyntéza, vztah organismů a prostředí, sukcese, kontaminace prostředí, koloběh prvků a látek v životním prostředí atd.), významné environmentální problémy (acidifikace půd a vod, eutrofizace vod, degradace půdy, produkce odpadů apod.), fyzikální vlastnosti atmosféry a ochrana ovzduší;</p> <p>emise, transport a imise látek znečišťujících ovzduší, modelování znečištění ovzduší, hodnocení vlivu látek znečišťujících ovzduší na zdraví člověka, na ekosystémy a na různé materiály;</p> <p>fyzikální principy a metody měření veličin charakterizujících životní prostředí (hluk, chvění, vibrace, neionizující záření);</p> <p>základy práce s PC, instalace a nastavení OS Windows, kancelářské programy, programování v jazyce C, základy analýzy číslicových signálů, počítačem řízené měření;</p>

Odborné předměty (pokračování)	základy elektroniky, principy základních elektronických součástek a měření jejich vlastností, návrh a zapojení elektronického obvodu; legislativa ochrany životního prostředí, teorie veřejné správy, správní právo, ekonomické a sociální aspekty Evropské unie, environmentální politika ČR a EU, aplikace pro projektový management
--------------------------------	---

Dále je nutno absolvovat cca 8 povinně volitelných předmětů týkajících se monitorování životního prostředí o celkovém rozsahu cca 17 hodin týdně po dobu jednoho semestru (v závislosti na kreditové hodnotě a hodinové dotaci zvolených předmětů). V tomto bloku předmětů jsou zahrnuta následující témata: základy chemie, geochemie životního prostředí, toxikologie životního prostředí, monitorování a dokumentace krajiny, přírody a biologické rozmanitosti, ochrana přírodního dědictví, ochrana a monitorování půd a vod, snímače a měření fyzikálních veličin, měřicí počítačové systémy (komunikační rozhraní a protokoly, datové přenosy), analýza číslicových signálů, využití 3D zobrazovacích metod k uchování kulturního dědictví, předpisy ochrany životního prostředí.

Mimoto je možno se v rámci tohoto bloku předmětů zúčastnit terénního cvičení z monitorování životního prostředí, které spočívá v měření základních fyzikálních a chemických parametrů vybraných složek životního prostředí, zpracování naměřených dat a vyhodnocování výsledků. Student si může zvolit, zda se při terénním cvičení zaměří na monitorování ovzduší (měření meteorologických parametrů a koncentrací znečišťujících látek v ovzduší), vod (stanovování fyzikálně-chemických ukazatelů kvality vod), nebo na měření hluku, vlhkosti vzduchu a neionizujícího záření.

Další blok povinně volitelných předmětů obsahuje cizí jazyky (anglický a německý, každý z nich v rozsahu 2 až 4 hodiny týdně po dobu jednoho semestru), teorii a praxi mezilidské komunikace, personální management, vybrané kapitoly z práva (právo pracovní, rodinné, živnostenské, sociálního zabezpečení, duševního vlastnictví atp.) a využívání ICT v praxi (interaktivní a multimediální prezentace, správu a sdílení dokumentů, videokonferenční technologie apod.). Z tohoto bloku je nutno

zapsat si 5 až 6 předmětů o celkovém rozsahu cca 12 hodin týdně po dobu jednoho semestru (v závislosti na kreditové hodnotě a hodinové dotaci zvolených předmětů).

V rámci tohoto oboru je také možno absolvovat zahraniční profesní stáž nebo zahraniční studijní stáž. Délka stáže je alespoň 10 dní, ale může být i více než 60 dní. Absolvování stáže je řazeno mezi volitelné předměty.

8.3 Přístrojová fyzika

(Zpracováno s použitím zdrojů [98, 99] a [100].)

Základní údaje o oboru:

Univerzita: Univerzita Palackého v Olomouci

Fakulta: Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Fyzika

Forma studia: prezenční

Standardní doba studia: 3 roky

Přijímací zkouška: zkouška z matematiky a fyziky, nebo dosažení percentilu alespoň 90 v Národní srovnávací zkoušce z obecných studijních předpokladů či z matematiky

Stručný popis oboru:

Obor Přístrojová fyzika připravuje studenty pro experimentální práci v mezioborových oblastech na rozhraní fyziky a technických oborů a pro spolupráci s odborníky fyzikálního a inženýrského zaměření. Náplní studia je základní kurz matematiky a fyziky, doplněný výukou elektroniky, přístrojové fyziky, informatiky a programování. Zvláštní důraz je kladen na moderní elektronické měřicí metody. Studenti mají možnost zvolit si jednu ze specializací Číslicové měřicí systémy, Optické a laserové technologie a Přístroje pro astronomii a astrofyziku.

Profil a uplatnění absolventa:

Absolvent oboru Přístrojová fyzika má základní znalosti z obecných matematicko-fyzikálních disciplín a orientuje se v moderní přístrojové technice. Rozumí standardním počítačem řízeným systémům a je schopen provádět počítačem řízené experimenty a zpracování dat. Znalosti v oblasti výpočetní techniky mu umožňují provádět návrh měřicího systému od jeho hardwarové konfigurace až po volbu operačního systému a programovacího jazyka, dokáže též vytvářet virtuální měřicí přístroje v grafických vývojových prostředích. Je seznámen rovněž se základy nauky o materiálech a s praktickým využitím moderních laserových technologií.

Absolventi tohoto oboru jsou připraveni pro práci v oborech experimentální techniky a v mezioborových fyzikálně-technických oblastech. Uplatnění nacházejí např. ve strojírenství, automobilovém průmyslu, elektrotechnice, informačních technologiích, ale také v aplikovaném výzkumu či zdravotnické technice. Příklady pracovních pozic, které mohou zastávat, jsou metrolog, servisní či zkušební technik, programátor NC strojů, laborant.

Náplň výuky:

Základní přehled povinné náplně výuky oboru Přístrojová fyzika je uveden v tabulce 6. Každý řádek tabulky obsahuje název jednoho bloku vyučovacích předmětů a dále uvádí:

- celkovou hodinovou dotaci povinných předmětů tohoto bloku,
- souhrn témat probíraných v povinných předmětech tohoto bloku.

Tabulka 6: Přehled povinné náplně výuky oboru Přístrojová fyzika

Blok výuky	Hodinová dotace	Témata povinných předmětů
Základní kurz matematiky	12	práce s vektory a maticemi, lineární algebra, řešení soustav lineárních rovnic, matematická analýza (limity, derivace, integrály), analytická geometrie, obyčejné diferenciální rovnice, diferenciální počet funkcí více proměnných, numerická matematika (řešení rovnic, interpolace, integrace, derivace,...), komplexní čísla, pravděpodobnost a statistika
Základní kurz fyziky	25	mechanika, molekulová fyzika, termika, elektřina a magnetismus, optika, fyzika mikrosvěta
Fyzikální praktikum	17	měřidla, měřicí systémy a měřicí přístroje (jejich funkce, vlastnosti, chyby), chyby měření, numerické (statistické) zpracování experimentálních dat, měření základních fyzikálních veličin z mechaniky, termiky, elektřiny a magnetismu, optiky, fyziky mikrosvěta
Odborné předměty	31	vakuová, kryogenní, vysokoteplotní a vysokotlaká technika, nauka o materiálu, laserové technologie (princip a využití laseru), základy nanotechnologií, základy elektronové mikroskopie, mikroskopie skenovací sondou, metody RTG difrakce; základy HW, základy práce s PC, kancelářské programy, základy databázových systémů, Matlab, programování v jazyce C; senzory (typy, fyzikální principy), číslicové měřicí systémy (virtuální instrumentace, software LabVIEW, komunikační rozhraní), konstrukce měřicích systémů, analogové a číslicové zpracování signálů, modelování a simulace spojitých i číslicových systémů; úvod do astronomie a astrofyziky
Cizí jazyky	4	anglický jazyk

Z bloku povinně volitelných odborných předmětů je nutno si zapsat přibližně 10 předmětů o celkovém rozsahu cca 28 hodin týdně po dobu jednoho semestru (v závislosti na kreditové hodnotě a hodinové dotaci zvolených předmětů).

Na výběr jsou témata zaměřená na informatiku (základy Linuxu, programování v jazyce Python a C#, typografický systém Latex), aplikovanou fyziku (vlastnosti a zpracování kovových materiálů, využití laseru pro opracovávání materiálu, základy fotoniky, materiály a technologie pro výrobu optických prvků, fyzikální teorie barev), elektroniku (fyzikální základy, nejdůležitější prvky elektronických obvodů, praktické úlohy z elektroniky), senzory a měřicí systémy (snímače neelektrických veličin, programování číslicových měřicích systémů), teorii signálů a informace (přenos a zpracování analogových i číslicových signálů, včetně zpracování obrazu), astronomii (vznik planetárních soustav, vlastnosti těles Sluneční soustavy, astronomické dalekohledy, astronomická pozorování), moderní mikroskopické metody (mikroskopie světelná, ultrafialová, infračervená, fluorescenční, elektronová, skenující tunelová atp.), jemnomechanické konstruování a metrologii.

Studenti rovněž mají možnost docházet na technicky zaměřené volitelné předměty, které zahrnují např. technické kreslení, optické a optoelektronické lékařské přístroje, lékařskou přístrojovou techniku, CAD v optice a jemné mechanice atd.

V tomto oboru nejsou zařazeny žádné odborné stáže ani exkurze.

8.4 Aplikované počítačové modelování

(Zpracováno s použitím zdrojů [101, 102].)

Základní údaje o oboru:

Univerzita: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem

Fakulta: Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Aplikovaná fyzika

Forma studia: prezenční/kombinovaná

Standardní doba studia: 3 roky

Přijímací zkouška: nekoná se

Stručný popis oboru:

Aplikované počítačové modelování je nový prakticky a profesně orientovaný obor, jehož studenti jsou připravováni především pro uplatnění v praxi. Tento obor poskytuje vzdělání v oblasti moderních metod počítačového modelování využívaných zejména v technickém a průmyslovém vývoji, ale též v ekonomii i dalších oborech. Studenti získávají také nezbytné znalosti a dovednosti z matematiky, fyziky, programování a dalších, obecněji zaměřených předmětů. Součástí studia je rovněž řešení projektů a týmová spolupráce, včetně sdílení a prezentace získaných výsledků. Jazyková příprava je realizována kurzem anglického jazyka.

Profil a uplatnění absolventa:

Absolvent tohoto oboru je připraven především k nástupu do praxe. Je schopen analyzovat a numericky řešit rozsáhlou řadu praktických problémů zejména z oblastí zpracování dat, obrazu a signálu, spojitého modelování v mechanice a elektromagnetismu, transportu hmoty a tepla a také základního použití částicového modelování. Je též seznámen se softwarovými nástroji používanými v praxi pro vědecko-technické výpočty, modelování a simulace, jako jsou např. Matlab, Materials Studio či DL_POLY.

Absolventi se uplatní např. v průmyslu ve vývojových a konstrukčních odděleních firem při návrhu nových technických řešení. Konkrétně se může jednat o automobilový průmysl, materiálový design apod. Uplatnění však absolventi mohou nalézt také v softwarových firmách, ekonomii i v dalších oborech, v nichž se zpracovává velké množství dat nebo kde se užívá analytické myšlení.

Náplň výuky:

Základní přehled povinné náplně výuky oboru Aplikované počítačové modelování podává tabulka 7. Každý řádek tabulky obsahuje název jednoho bloku vyučovacích předmětů a dále uvádí:

- celkovou hodinovou dotaci povinných předmětů tohoto bloku,
- souhrn témat probíraných v povinných předmětech tohoto bloku.

Tabulka 7: Přehled povinné náplně výuky oboru Aplikované počítačové modelování

Blok výuky	Hodinová dotace	Témata povinných předmětů
Základní kurz matematiky	32	opakování středoškolské matematiky, práce s vektory a maticemi, lineární algebra, matematická analýza (limity, derivace, integrály), obyčejné diferenciální rovnice, diferenciální a integrální počet funkcí více proměnných, vektorová analýza, Fourierovy řady, tenzory, komplexní čísla, numerická matematika (řešení rovnic a jejich soustav, interpolace, aproximace, integrace, derivace, diferenciální rovnice), pravděpodobnost a statistika
Základní kurz fyziky	22	mechanika, molekulová fyzika, termika, elektřina a magnetismus, optika, mechanika tekutin
Odborné předměty	40	základy HW, základy práce s PC, kancelářské programy, programování v jazyce C/C++, Matlab, psaní odborných textů; úvod do počítačového modelování, počítačové modelování mechaniky tekutin, transportu tepla a hmoty; spojitě modelování, částicové modelování, zpracování obrazu a signálu, projektové semináře
Cizí jazyky	6	anglický jazyk, odborný anglický jazyk

K povinným studijním aktivitám náleží také absolvování týdenní odborné praxe.

Kromě povinných předmětů si každý student musí vybrat ještě cca 9 povinně volitelných předmětů o celkovém rozsahu přibližně 25 hodin týdně po dobu jednoho semestru (v závislosti na kreditové hodnotě a hodinové dotaci zvolených předmětů). Jedná se o odborné předměty zaměřené zejména na programování, počítačové modelování a simulace, analýzu dat atp.

Studenti také mohou navštěvovat volitelné fyzikálně-technické předměty zaměřené na elektroniku a elektromagnetické vlnění, počítačem řízený experiment, počítačové simulace apod. Typická fyzikální praktika tento obor neobsahuje.

8.5 Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika

(Zpracováno s použitím zdrojů [103, 104].)

Základní údaje o oboru:

Univerzita: Univerzita Hradec Králové

Fakulta: Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Fyzika

Forma studia: prezenční/kombinovaná

Standardní doba studia: 3 roky

Přijímací zkouška: ústní, s otázkami zaměřenými na praktické využití středoskolské fyziky

Stručný popis oboru:

Tento obor je určen zájemcům o fyzikálně-technické disciplíny, aplikace výpočetní techniky a průmyslová či environmentální měření. Studium zahrnuje obvyklé kurzy matematiky a fyziky, kromě toho jsou vyučovány základy chemie, programování a deskriptivní geometrie. Zařazena je také výuka elektroniky, počítačem řízených experimentů a praktického využití informačních technologií.

Profil a uplatnění absolventa:

Absolventi mají fyzikálně-technický základ doplněný znalostmi informační a výpočetní techniky. Mohou se uplatnit v oblasti průmyslových či laboratorních měření (např. jako technici ve zkušebnách), ale též jako technici měření pracovního a životního prostředí, v oboru IT i na dalších souvisejících pracovních pozicích.

Náplň výuky:

Základní přehled povinné náplně výuky oboru FTMB je uveden v tabulce 8. Každý řádek tabulky obsahuje název jednoho bloku vyučovacích předmětů a dále uvádí:

- celkovou hodinovou dotaci povinných předmětů tohoto bloku,
- souhrn témat probíraných v povinných předmětech tohoto bloku.

Tabulka 8: Přehled povinné náplně výuky oboru FTMB

Blok výuky	Hodinová dotace	Témata povinných předmětů
Základní kurz matematiky	24	opakování středoškolské matematiky, matematická analýza (limity, derivace, integrály), obyčejné diferenciální rovnice, diferenciální a integrální počet funkcí více proměnných, komplexní čísla, numerická matematika (posloupnosti a řady, řešení rovnic a jejich soustav, integrace, derivace, diferenciální rovnice), pravděpodobnost a statistika
Základní kurz fyziky	24	mechanika, molekulová fyzika, termika, elektřina a magnetismus, kmity, vlny, optika, úvod do fyziky mikrosvěta
Základní kurz chemie	5	základy obecné, anorganické a organické chemie; metody molekulové spektroskopie
Fyzikální praktikum	18	chyby měření, numerické (statistické) zpracování experimentálních dat, vlastnosti analogových a digitálních měřicích přístrojů, měření základních fyzikálních veličin z mechaniky, termiky, elektřiny a magnetismu, akustiky a optiky
Historie měření	3	historický vývoj metod měření a přístrojového vybavení; opakování vybraných fyzikálních témat ke státní zkoušce
Deskriptivní geometrie	2	Mongeovo promítání, zobrazení rovin, otáčení geometrických útvarů, kuželosečky, rovinné řezy těles, vzájemná poloha přímky a tělesa, průniky těles atp.

Odborné předměty	58	<p>fyzikálně-chemické analytické metody (konduktometrie, měření pH, refraktometrie, polarimetrie, kolorimetrie a fotometrie, chromatografie, elektroforéza, hmotnostní spektrometrie atd.), metody optické spektroskopie (atomová absorpční spektroskopie, atomová emisní spektroskopie, fluorescenční UV/VIS spektroskopie, IR spektroskopie apod.),</p> <p>lékařská přístrojová technika (ultrazvuk, RTG zobrazovací metody, magnetická rezonance, EKG, EEG, elektroterapie aj.);</p> <p>radioaktivita a ionizující záření, biomonitoring radiační kontaminace, systémy pro monitorování stavu životního prostředí a pro průmyslovou ekologii (monitoring vzdušných emisí a imisí, technologických procesů úpravy a čištění vody apod.);</p> <p>technické kreslení; konstruování, numerické výpočty a simulace v softwaru CAD/CAE Solidworks, základy elektroniky, počítačem řízené měření a zpracování dat, analýza číslicových signálů;</p> <p>principy počítačového HW, programování v jazyce C#, Matlab, Excel;</p>
Cizí jazyky	8	odborný anglický jazyk

Povinnou součástí výuky je také absolvování několika exkurzí do firem i na jiná odborná pracoviště. V rámci těchto exkurzí jsou navštíveny Státní úřad pro jadernou bezpečnost, Státní ústav radiační ochrany, uhelná elektrárna, úpravna pitné vody, čistírna odpadních vod a bioplynová stanice.

Absolvování všech povinných předmětů a exkurzí dostačuje k získání požadovaných 180 studijních kreditů, avšak studenti si mohou nad rámec těchto povinností zapisovat i volitelné předměty. Na výběr jsou předměty zaměřené na opakování či doplnění znalostí středoškolské matematiky a fyziky, procvičování a doplnění učiva základního kurzu vysokoškolské matematiky, akustiku, teorii relativity a praktickou elektroniku. Mimoto je možno navštěvovat tzv. závěrečné přednášky z fyziky, které

podávají jednotný a současně komplexní pohled na vybraná fyzikální témata (např. na pojem energie či na problematiku částic a polí).

8.6 Závěry z porovnání fyzikálně-technických oborů

Všechny porovnávané obory jsou určeny především pro přípravu k nástupu do fyzikálně-technické praxe, avšak poskytují také obecnější teoretický základ. Všechny vycházejí ze základních kurzů matematiky a fyziky, které se napříč obory tematicky příliš neliší.

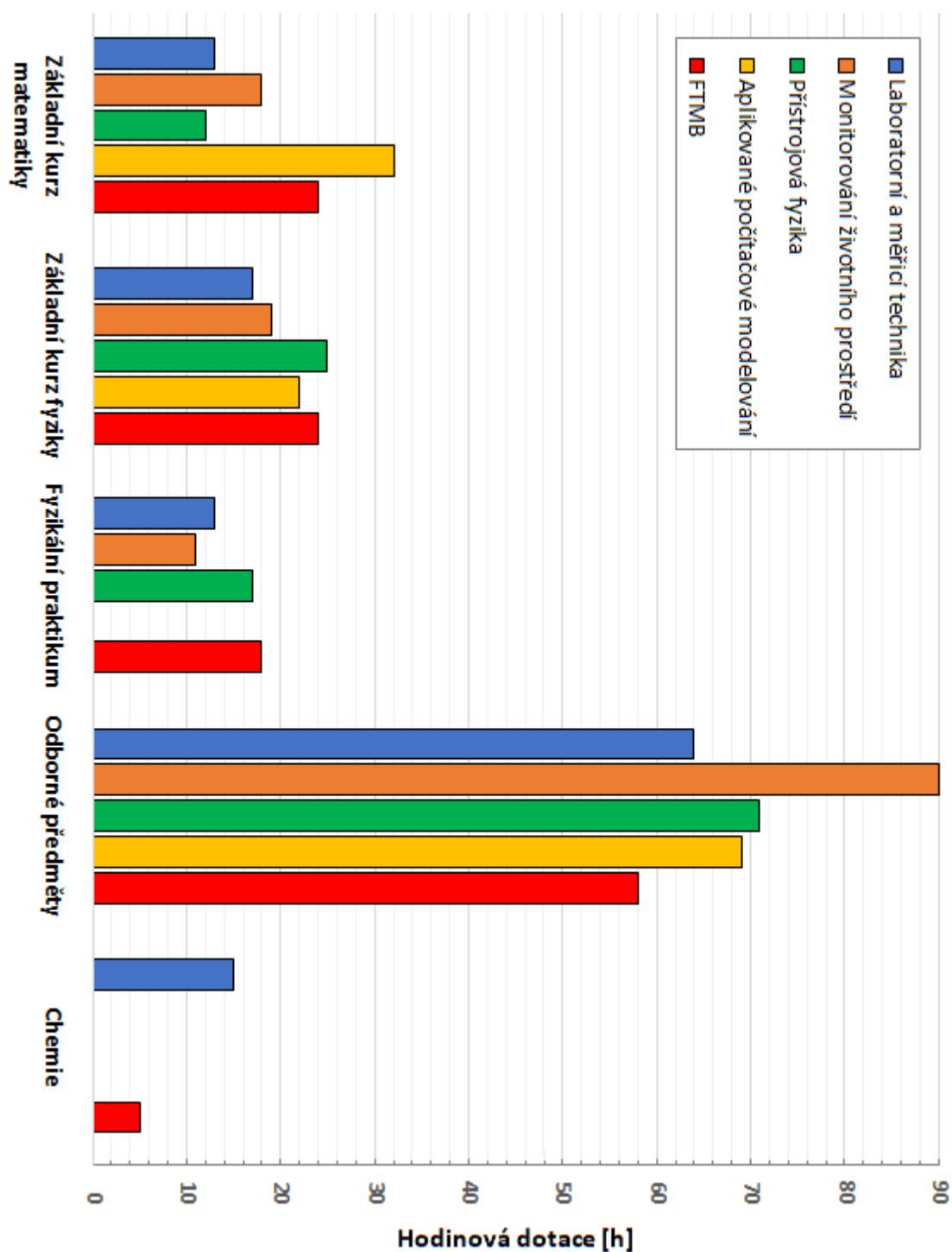
Největší hodinovou dotaci základního kurzu matematiky má obor Aplikované počítačové modelování, tudíž se dá očekávat, že jednotlivá témata jsou v něm probírána nejdůkladněji. Tento obor naopak jako jediný není doplněn fyzikálními praktiky. Náplň fyzikálních praktik v ostatních oborech je vzájemně velmi podobná: po základech teorie měření a zpracování naměřených dat následují laboratorní úlohy (měření) vycházející z tematických okruhů základního kurzu fyziky.

Povinná výuka chemie je zavedena pouze v oborech Laboratorní a měřicí technika a FTMB.

Nejvíce hodin výuky je ve všech oborech věnováno odborným předmětům, z nichž některé jsou povinné, další povinně volitelné či volitelné. Tento důraz na odborné předměty patrně souvisí s praktickým zaměřením oborů. Všechny obory nabízejí nějakou formu výuky elektroniky a programování, přičemž programování je vyučováno nejčastěji v jazyce C/C++/C# či v Matlabu. Výrazné zastoupení mezi odbornými předměty mají také analogová a číslicová měřicí technika a počítačem řízená měření. Odborné předměty dále zahrnují široké spektrum témat v závislosti na zaměření konkrétního oboru, některé z předmětů přednášejí odborníci z praxe.

Obrázek 20 podává grafické porovnání hodinových dotací vybraných skupin předmětů pro všech pět oborů. Do skupiny odborných předmětů jsou v tomto grafu zahrnuty i povinné a povinně volitelné odborné předměty, jejichž počty hodin byly určeny postupem uvedeným na začátku této kapitoly - jedná se tedy pouze o přibližný odhad. Základní kurz chemie a chemické praktikum byly pro přehlednost spojeny do jediné skupiny předmětů.

Pokud by si student zapsal nějaké předměty nad rámec povinnosti získat za celé studium 180 kreditů, vedlo by to pro jeho osobu ke zkreslení hodnot uvedených



Obrázek 20: Hodinové dotace vybraných skupin předmětů v jednotlivých oborech.

v grafu. Předpokládáme však, že případy výraznějšího překročení 180 kreditů nastávají pouze výjimečně, tudíž jejich vliv bude minimální.

Většina vyučovacích předmětů má přírodovědně-technickou (teoretickou či praktickou) náplň, výraznější zastoupení společenskovedních předmětů má pouze obor

Monitorování životního prostředí, v němž je kladen značný důraz na legislativu a mezilidskou komunikaci. V oborech Aplikované počítačové modelování, Přístrojová fyzika a FTMB je zařazena povinná výuka anglického jazyka, zbývající obory nabízejí výuku angličtiny volitelně.

V oboru Aplikované počítačové modelování je vyžadováno absolvování týdenní odborné praxe, obor Monitorování životního prostředí nabízí volitelné studijní i profesní stáže různých délek, zbývající obory ve svých plánech žádné praxe ani stáže nezahrnují. Exkurze do firem či na jiná odborná pracoviště byly zjištěny pouze v oboru FTMB.

Obecně lze říci, že u všech oborů je patrná snaha o propojení s praxí, a to především prostřednictvím odborných, prakticky zaměřených předmětů (včetně praktických cvičení). Dalším příspěvkem k praktickému vzdělávání jsou přednášky odborníků z praxe, odborné stáže či praxe studentů, příp. exkurze. To, jakou měrou a v jakém směru je studium propojeno s praxí, záleží také na tom, jaké povinně volitelné a volitelné předměty si konkrétní student vybere. Protože ve všech oborech s výjimkou FTMB je nabídka těchto předmětů dosti bohatá, má většina studentů možnost profilovat se podle svých zájmů.

Poznatky získané rozbořem učební náplně těchto fyzikálně-technických oborů budou použity při přípravě a posuzování učebních plánů nové environmentálně zaměřené specializace na PřF UHK. Naší snahou bude, aby absolventi disponovali dostatečnými teoretickými základy a měli též odborné znalosti a zkušenosti potřebné pro úspěšné působení v praxi.

9 Doporučení pro přípravu nové environmentálně zaměřené specializace na PřF UHK

Při návrhu nové specializace bude vhodné vycházet nejen z výsledků výše popsaných didaktických výzkumů, ale též z odborného zaměření současných akademických pracovníků KFy, z výzkumných témat řešených na této katedře, z předmětů, které jsou zde v současnosti vyučovány, i z dostupné laboratorní techniky a dalšího vybavení. S ohledem na stávající situaci na KFy se nám jeví vhodným řešením zaměřit tuto novou specializaci na měření a modelování znečištění z průmyslových zdrojů, analýzu toxických látek v životním prostředí, případně též na dozimetrii a radiační ochranu.

Předpokládáme, že nová specializace bude určena především pro přípravu k nástupu do fyzikálně-technické praxe, největší důraz by proto měl být kladen na odborné, prakticky zaměřené předměty. Přesto se domníváme, že výuka má vycházet z obecnějšího teoretického základu, jehož obsahem by měly být základní kurzy matematiky a fyziky. Základní kurz fyziky bude vhodné doplnit fyzikálním praktikem tak, jak je tomu v současném oboru FTMB. S ohledem na plánované environmentální zaměření nové specializace by stálo za úvahu také zařazení základů chemie a chemického praktika. V rámci jazykové přípravy doporučujeme zavést povinný kurz anglického jazyka, který by však nemuseli absolvovat držitelé certifikátu z angličtiny stanovené úrovně.

Mezi odbornými předměty by neměly chybět základy elektroniky a programování (v jazyce C/C++/C#, případně v nástroji Matlab), na které by navazovala výuka analogové i číslicové měřicí techniky a počítačem řízených experimentů, včetně statistického zpracování naměřených dat. Tato témata jsou v současnosti vyučována v příbuzných oborech jiných vysokých škol (viz srovnání v kap. 8) i v oboru FTMB na PřF UHK a považujeme je za důležitou součást přírodovědně-technického vzdělání.

Další oblastí vzdělávání by měla být přístrojová technika orientovaná na mikroskopické a spektrální metody. Kromě Ramanova spektrometru nyní KFy disponuje také skenovacím elektronovým mikroskopem (včetně možnosti prvkové analýzy vzorků), mikroskopem atomárních sil a skenovacím tunelovým mikroskopem. Považujeme za vhodné seznámit studenty se všemi těmito přístroji, přičemž nejvíce

času věnovat skenovacímu elektronovému mikroskopu a Ramanovu spektrometru (jedná se o relativně rozšířené přístroje s širokými možnostmi uplatnění v doméně environmentálních měření i jinde).

Součástí výuky může být též hodnocení znečištění ovzduší, zejména využití metodiky SYMOS'97 pro matematické modelování rozptylu ZL např. z uhelných elektráren či z bioplynových stanic. Tato témata jsou na KFy již vyučována, rovněž zde probíhají výzkumy s tímto zaměřením. Příbuzným tématem je biomonitoring životního prostředí s užitím fyzikálních metod, této oblasti se někteří akademičtí pracovníci KFy také věnují. Za užitečný považujeme i nový předmět zaměřený na dozimetrii a radiační ochranu, který je v současnosti připravován. Zde by bylo možno pokračovat v již zavedené spolupráci s odborníky ze Státního úřadu pro jadernou bezpečnost a Státního ústavu radiační ochrany. Za úvahu stojí také navázání spolupráce s Katedrou biologie PřF UHK, která zajišťuje výuku různých předmětů týkajících se ochrany životního prostředí.

Vyučovaná teorie by měla být vhodným způsobem propojena s praxí, proto navrhuje zařadit do výuky přístrojové techniky praktické ukázky přístrojů a dostatek laboratorních cvičení. Matematické modelování znečištění ovzduší si studenti budou moct procvičovat v softwaru SYMOS'97, jehož plnou verzi má KFy k dispozici. Součástí učebního plánu může být také několikátýdenní stáž v průmyslovém podniku či na jiném odborném pracovišti. Vhodným doplněním výuky by mohly být též zvané přednášky odborníků z praxe či exkurze na různá pracoviště, na nichž je používána probíraná přístrojová technika. Zde je však potřeba upozornit na organizační náročnost zajišťování takovýchto akcí.

Do učebního plánu je jistě možno včlenit i rozličná další témata, proces přípravy nové specializace ještě zdaleka není u konce. Otázkou ke společné diskusi zůstává též stanovení hodinových dotací jednotlivých předmětů a rozhodnutí, které z předmětů zavést jako povinné, resp. povinně či nepovinně volitelné. Bude také potřeba zajistit dobrou návaznost vyučovacích předmětů. (Autor zná z vlastní zkušenosti frustraci pramenící ze situace, kdy při studiu fyzikálních předmětů bylo nezbytné řešit např. diferenciální rovnice, aniž by toto téma bylo předtím probráno.)

Dalším důležitým úkolem bude nastavit přiměřenou náročnost studia a zajistit dobrou kvalitu absolventů, aby byli pozitivně vnímáni ze strany zaměstnavatelů a ti měli zájem přijímat i další absolventy této specializace.

Neměla by být opomenuta ani propagace nově připravované specializace, aby nenastávaly potíže spojené s nedostatkem uchazečů o studium. V rámci propagace bude jistě vhodné představit potenciálním uchazečům zajímavá témata vyučovaná v tomto oboru (příp. toto spojit s prohlídkou laboratoří) a poukázat na možnosti pracovního uplatnění absolventů. Zdánlivou drobností, kterou však nelze podcenit, je volba názvu této specializace, který by měl být dostatečně atraktivní pro potenciální uchazeče.

10 Fyzikální výzkumy s využitím moderní měřicí přístrojové techniky

10.1 Studium znečištění životního prostředí rtutí

Na Kfy PřF UHK jsou již několik let vyučovány metody fyzikálního biomonitoringu a prováděny související výzkumy kontaminace životního prostředí nebezpečnými látkami. Autor spolupracoval na biomonitoringu emisí rtuti v česko-polském pohraničí a na matematickém modelování rozptylu emisí rtuti z uhelných elektráren, které v minulosti způsobovaly značnou environmentální zátěž této oblasti. Zmíněné výzkumy jsou popsány v článku [105], z něhož čerpá následující stručné přiblížení tohoto tématu.

Rtuť přítomná v životním prostředí představuje závažné zdravotní riziko, protože je silným neurotoxinem, který se navíc akumuluje v potravních řetězcích. Rtuť se může vyskytovat v elementární formě (Hg^0), v oxidované formě (Hg^{2+}) nebo vázaná na velmi jemnozrnné částice aerosolů [106]. Do lidského těla proniká především vdechováním rtuťových par, které setrvávají relativně dlouho v atmosféře, avšak může být přijímána také konzumací kontaminovaných potravin [107].

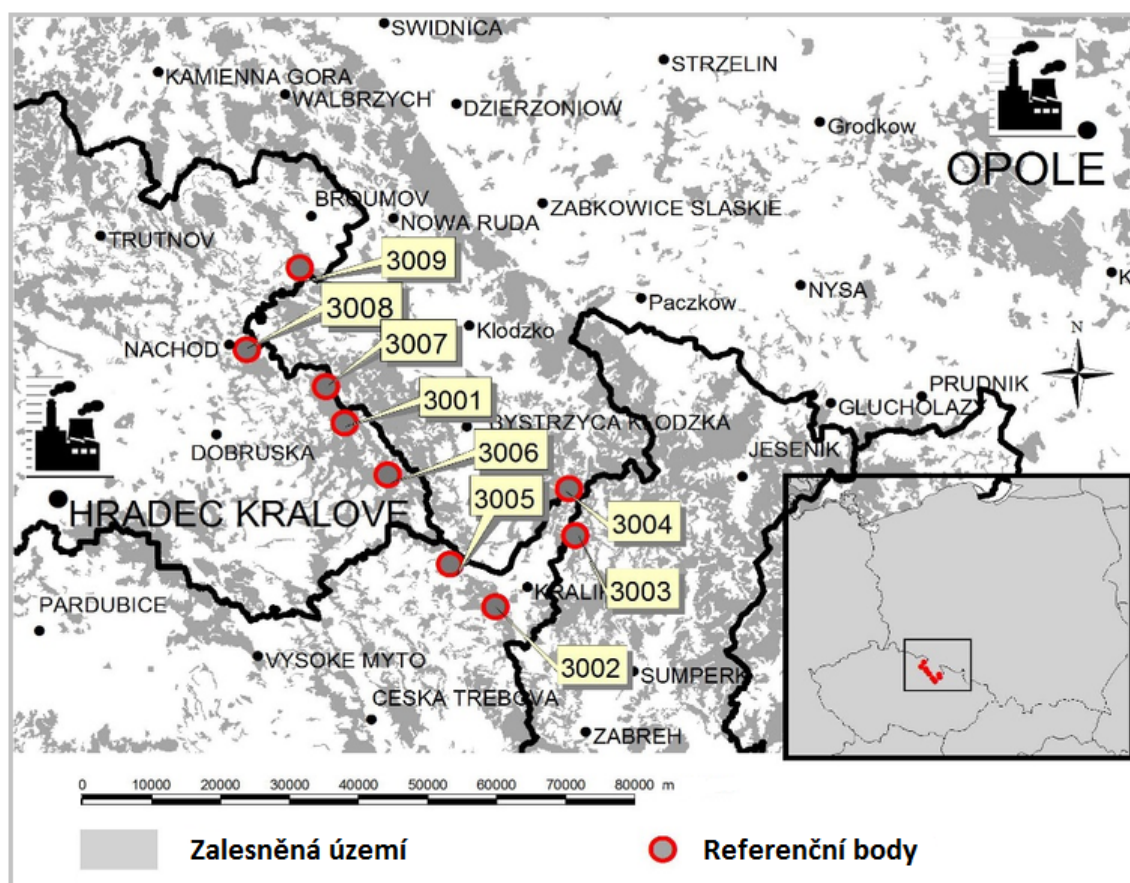
Protože k významným zdrojům znečištění životního prostředí rtutí náleží uhelné elektrárny [108], součástí výzkumu bylo i studium vlivu Elektrárny Opatovice na znečištění rtutí v česko-polském pohraničí. Tato elektrárna byla vybrána díky své poloze v blízkosti zájmového území (nedaleko obce Opatovice nad Labem), ale též proto, že v roce 2015 v ní byly vyměněny původní elektrostatické filtry zplodin za výrazně účinnější filtry tkaninové. V našem výzkumu tedy bylo možno posoudit vliv výměny filtrů na znečištění zájmového území rtutí.

Biomonitoring rtuti na česko-polském pomezí byl prováděn v letech 2014 a 2016, jako bioindikátor¹⁸ při něm byl využit suchohřib hnědý (*Boletus badius*). Vzorčky těchto hub byly sbírány v devíti místech („referenčních bodech“) znázorněných na mapce na obr. 21.

¹⁸Bioindikátory jsou organismy, které se používají k posuzování stavu životního prostředí, zejména z hlediska jeho znečištění. Jako bioindikátory často slouží některé druhy lišejníků, mechů, hub, ale též vodních organismů, např. ryb, raků atd.

Sběr vzorků probíhal v lese, ve vzdálenosti nejméně 100 metrů od jeho okraje a nejméně 200 metrů od budov a cest přístupných automobilům. Vzdálenost mezi každou houbou a kmenem stromu byla nejméně 2 metry. V každém referenčním bodě byly vzorky odebrány ze šesti vzájemně blízkých míst, pokud to bylo možné.

Sbírány a následně očištěny byly nadzemní části tření a klobouky hub, hmotnost vzorků získaných tímto způsobem v každém referenčním bodě činila zhruba 0,2 kg. Poté byly klobouky odděleny od tření, obojí bylo nakrájeno na plátky plastovým nožem a vysušeno při teplotě 298 K. Materiál klobouků i tření byl (každý zvlášť) homogenizován ve třecí misce, proset sítkem o průměru oka 0,4 mm a umístěn do uzavíratelných schránek z polyethylenu či polypropylenu.



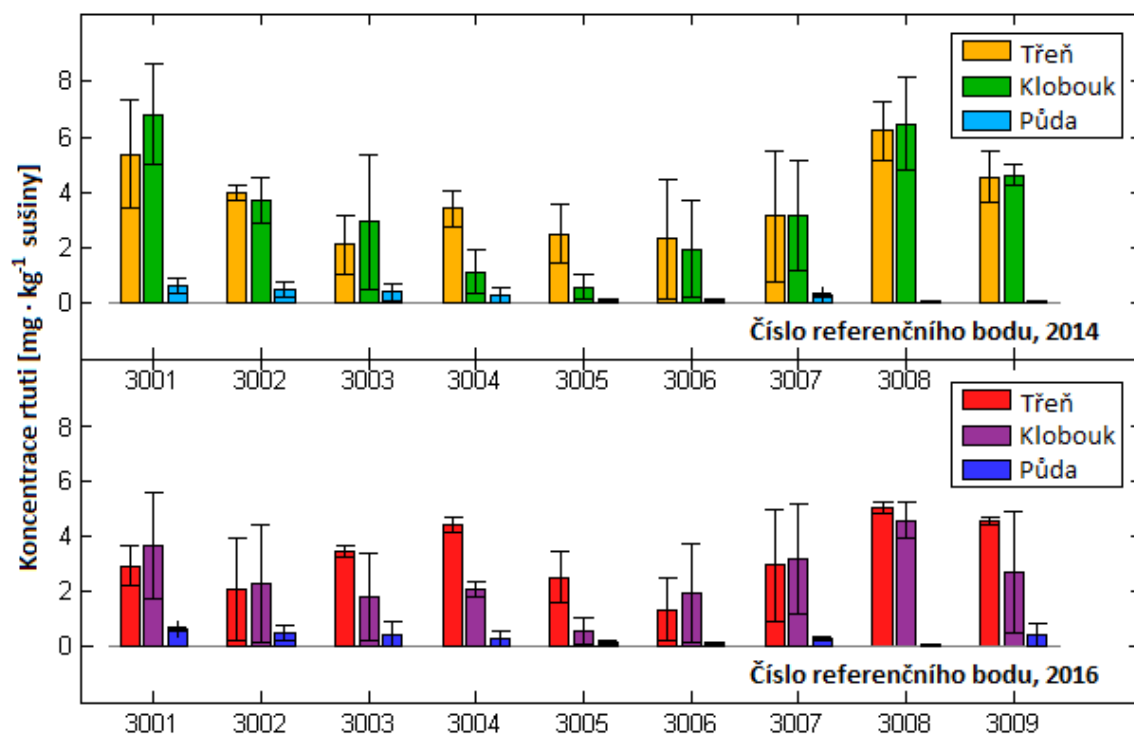
Obrázek 21: Mapa zájmového území s vyznačenými polohami referenčních bodů pro biomonitoring imisí rtuti (upraveno podle [105]).

Kromě vzorků hub byly odebrány také vzorky organické vrstvy půdy. Odběry byly prováděny z hloubky maximálně 10 cm, protože tato svrchní vrstva půdy je

z hlediska kontaminace toxickými kovy nejvýznamnější. V každém referenčním bodě byly vzorky odebrány z pěti navzájem blízkých míst (body odběru byly vzájemně vzdáleny přibližně 50 cm, přičemž jeden z těchto bodů byl v místě, na němž byl předtím odebrán *Boletus badius*). Půda vykopaná z těchto pěti bodů byla sesypána dohromady a důkladně promíchána (její hmotnost činila cca 0,5 kg). Poté byla proseta plastovým sítkem o průměru oka 2 mm a vysušena při teplotě 373 K.

Celý proces zpracování vzorků probíhal tak, aby nedošlo k jejich kontaminaci z okolního prostředí.

Rtuť v takto upravených vzorcích hub i půdy byla stanovena atomovým absorpčním spektrometrem AMA254. Analyzovány byly vzorky odebrané v letech 2014 a 2016 ze všech referenčních bodů, výsledky jsou uvedeny na obr. 22. V tomto grafu je vidět, že od roku 2014 do roku 2016 ve většině referenčních bodů poklesly koncentrace rtuti v bioindikátoru, což je v souladu se zmíněným zdokonalením filtrace zplodin z Elektrárny Opatovice.



Obrázek 22: Výsledky měření koncentrace rtuti v sušině *Boletus badius* v letech 2014 a 2016 (upraveno podle [105]).

Další část výzkumu spočívala v matematickém modelování rozptylu emisí z této elektrárny podle metodiky SYMOS'97: pro každý referenční bod na obr. 21 byla vypočtena průměrná roční koncentrace rtuti. Výsledek modelování je stručnou formou uveden v levé části tabulky 9, hodnota v každé buňce má význam průměru vypočteného z průměrných ročních koncentrací rtuti ve všech devíti referenčních bodech.

Tabulka 9: Výsledky modelování rtuti podle metodiky SYMOS'97 a biomonitoringu rtuti s využitím *Boletus badius* jako bioindikátoru.

Modelování SYMOS'97 (roční průměrné koncentrace imisí Hg) [$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]		Biomonitoring (průměrné koncentrace Hg ve vzorcích) [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-3}$ sušiny]			
Rok	-	Rok	Třeň	Klobouk	Půda
2012	$0,0012 \cdot 10^{-3}$	2014	$3,72 \pm 1,93$	$3,44 \pm 2,44$	$0,32 \pm 0,23$
2016	$0,001 \cdot 10^{-3}$	2016	$3,53 \pm 1,58$	$3,41 \pm 1,95$	$0,30 \pm 0,24$

Pravá část tabulky 9 obsahuje průměry koncentrací rtuti v bioindikátoru a v půdě, vypočtené opět ze všech referenčních bodů.

Výsledky biomonitoringu i modelování ukázaly, že znečištění česko-polského pohraničí rtutí v posledních letech klesá, což je dobrou zprávou pro místní obyvatele i rekreanty. Vliv na snížení kontaminace životního prostředí rtutí mohlo mít i použití účinnější technologie filtrace spalin v Elektrárně Opatovice.

Tímto výzkumem bylo také ověřeno, že *Boletus badius* je vhodným bioindikátorem pro dlouhodobé monitorování změn imisí rtuti v této oblasti. Výhodou této houby je kromě schopnosti bioakumulace rtuti také to, že každoročně hojně roste v blízkosti všech devíti referenčních bodů.

10.2 Charakterizace produktů laserového řezání slitin

Další oblastí bádání je laserové řezání kovových materiálů - konkrétně se jedná o studium vlivu laserového paprsku na povrch řezaného materiálu a vlastností odpadních mikro- a nanočástic vznikajících při laserovém řezání. Tento výzkum, na

němž se autor podílí, byl zatím proveden pro nerezovou ocel AISI 304 a pro slitinu hliníku AW 3103. Výsledky týkající se nerezové oceli jsou popsány v publikaci [109], příspěvek o výzkumu hliníkové slitiny je připravován. O uvedených tématech stručně pojednává následující text.

Řezání laserem se v posledních letech stalo rozšířenou technologií, která je pro svoji rychlost a přesnost hojně využívána při průmyslovém zpracování kovových materiálů. Je založeno na nasměrování laserového paprsku na materiál, který se následně v zasaženém místě taví a vypařuje. Takto vznikající tekutý materiál je průběžně odstraňován z místa řezu proudem plynu, typicky argonu či dusíku, přiváděného tryskou řezacího stroje. Při průchodu atmosférou kapičky roztaveného materiálu tuhnou, čímž vzniká kovový prášek, který je obvykle vyhazován jako nepotřebný odpad [110]. Podle zástupců firem, které provádějí laserové řezání kovů, vyprodukuje typický průmyslový řezací laser při běžném provozu přibližně 200 litrů práškového odpadu měsíčně.

V posledních letech jsou hledány možnosti využití tohoto odpadního materiálu. Bylo zjištěno, že tento prášek může být použit jako vstupní materiál pro práškovou metalurgii [111], rovněž má potenciál sloužit jako nosič různých látek, např. pesticidů, hnojiv či léčiv [110]. Pozornost je věnována také zdravotním rizikům spojeným s takto drobnými částicemi [112].

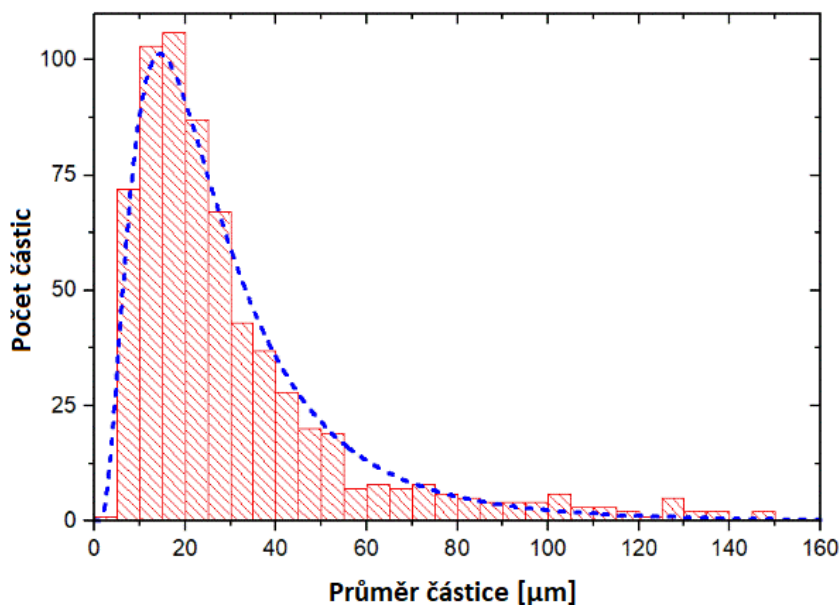
Výsledky našeho výzkumu by měly přispět k hledání nových způsobů znovupoužití práškového odpadu vytvářeného při laserovém řezání i k vyhodnocení zdravotních rizik spjatých především s jeho vdechováním.

10.2.1 Laserem řezaná nerezová ocel AISI 304

V tomto případě byly výzkumné vzorky získány laserovým řezáním chromniklové nerezové oceli AISI 304, široce používané v průmyslu. Řezání bylo provedeno průmyslovým polovodičovým vláknovým laserem YLR-1000-MM-WC v ochranné dusíkové atmosféře. Výkon laseru byl nastaven na 300 W, i ostatní provozní parametry byly obvyklé pro běžný průmyslový provoz laserového řezacího stroje.

Mikrostrukturní charakterizace odpadního prášku byla provedena pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM). Bylo zjištěno, že prášek je tvořen převážně kulovými mikročásticemi o průměrné hodnotě průměru $(27,2 \pm 20,6)$ μm . Průměry

mikročásteč mají logaritmicko-normální rozdělení, jak je patrné z histogramu na obr. 23. Povrchy mikročásteč mají dendritický charakter s viditelnými oktaedrickými krystalky, některé z mikročásteč jsou duté (obr. 24).

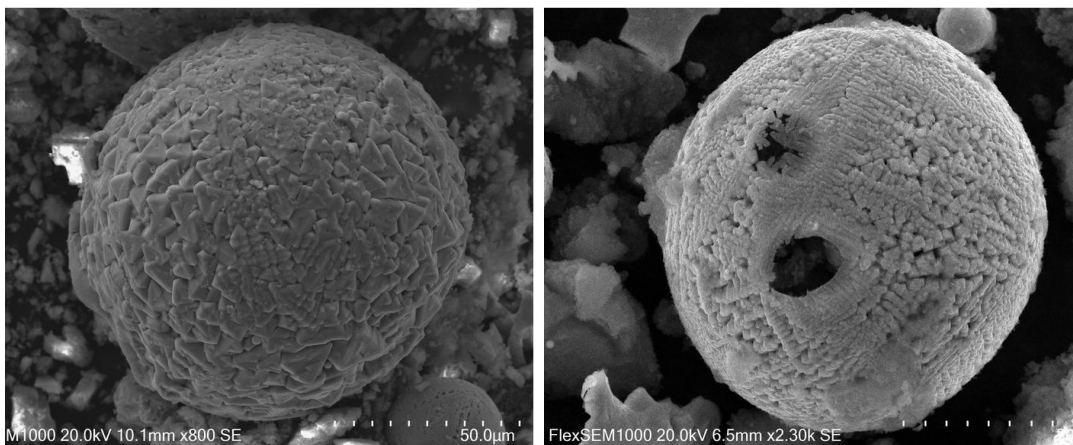


Obrázek 23: Rozdělení průměrů kulových mikročásteč vzniklých při laserovém řezání oceli AISI 304 (upraveno podle [109]). Modrá křivka: teoretické logaritmicko-normální rozdělení.

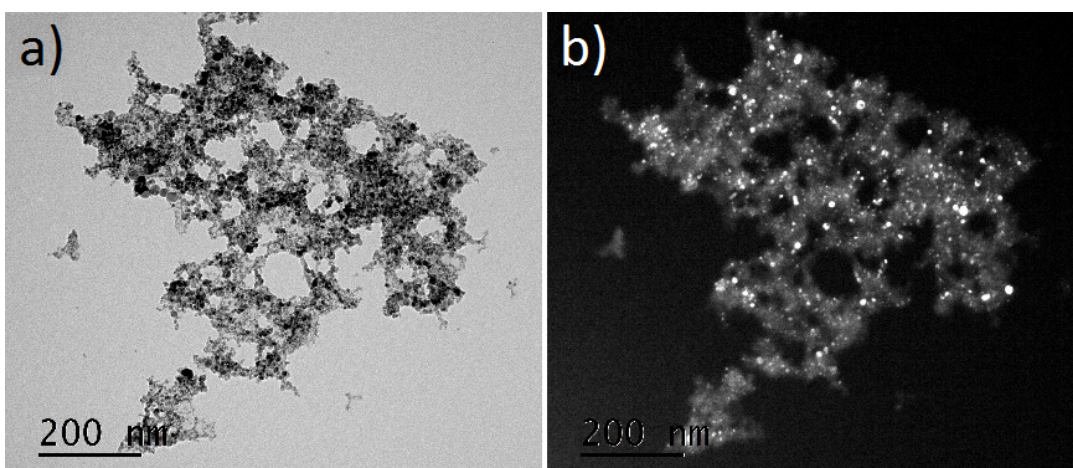
Pro určení chemického složení vzorků byla použita energiově disperzní spektroskopie (EDS). Výsledky EDS analýz ukázaly, že složení mikročásteč odpovídá složení řezané nerezové oceli a že vnější povrch mikročásteč je oxidován, zatímco jejich vnitřek nikoliv.

Metodou transmisní elektronové mikroskopie (TEM) bylo zjištěno, že odpadní prášek obsahuje také nanočásteč (obr. 25). Jejich průměry mají opět logaritmicko-normální rozdělení, přičemž průměrný průměr má hodnotu $(8,46 \pm 3,5)$ nm.

Dále byla provedena fázová analýza metodou rentgenové práškové difraxe (X-ray Powder Diffraction, XRD). Ukázalo se, že částeč odpadního prášku se skládají zejména z magnetitu (Fe_3O_4) a α -Fe fáze. Přítomnost magnetitu ve vzorku byla ověřena metodou difrakce zpětně odražených elektronů (Electron Backscatter Diffraction, EBSD).



Obrázek 24: Kulové mikročástice práškového odpadu. Snímky byly pořízeny pomocí SEM se zvětšením 800x (vlevo), resp. 2300x (vpravo).



Obrázek 25: Snímky nanočástic práškového odpadu, pořízené pomocí TEM a) ve světlém poli, b) v temném poli (upraveno podle [109]). Zvětšení 80 000x.

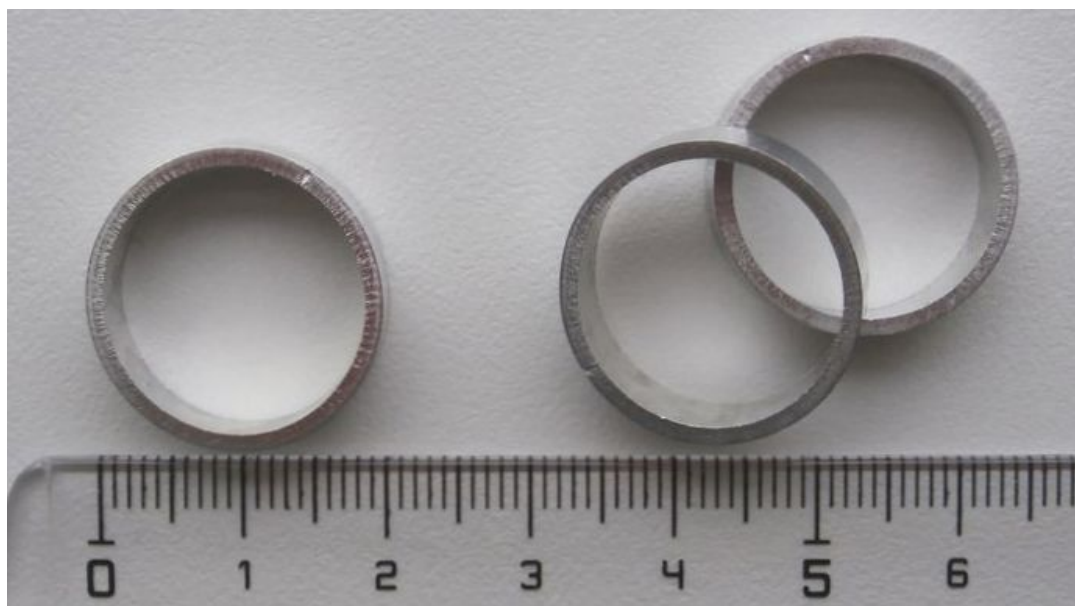
Z provedených analýz vyplynulo, že práškový odpad vytvářený laserovým řezáním nerezové oceli AISI 304 má potenciál pro další průmyslové využití, mohl by sloužit např. jako vstupní materiál pro aditivní výrobu. Přítomnost nanočástic však přináší zvýšené zdravotní riziko spojené především se vdechováním tohoto materiálu. Podrobnější popis tohoto výzkumu a jeho výsledků lze nalézt ve zmíněném článku [109].

10.2.2 Laserem řezaná hliníková slitina AW 3103

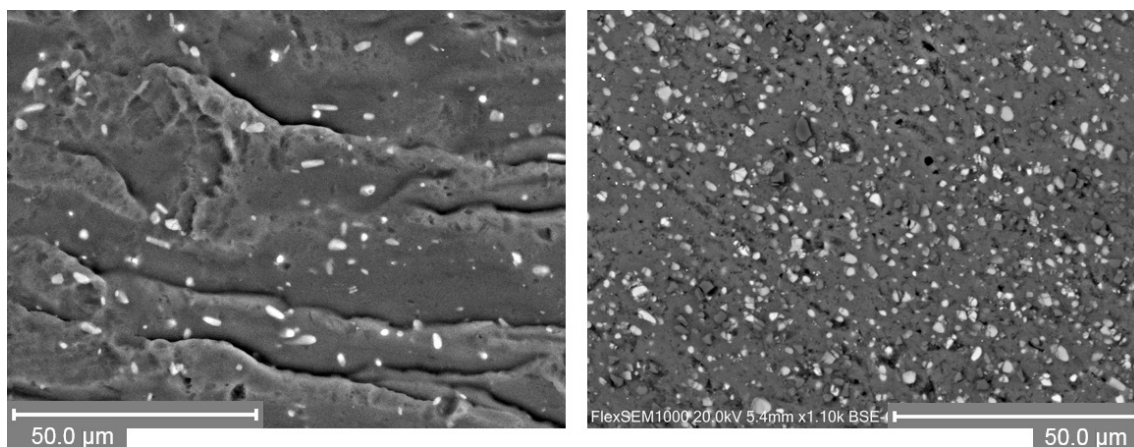
Vzorky pro tuto část výzkumu byly připraveny laserovým řezáním trubiček z hliníkové slitiny AW 3103 s obsahem manganu, k řezání byl použit stejný laserový stroj jako v předchozím případě. Ochranná atmosféra byla opět tvořena dusíkem, výkon laseru byl tentokrát 1 kW. Řezány byly dva druhy trubiček: silnější trubička o vnějším průměru 20 mm a tloušťce stěny 1,2 mm a tenčí trubička o vnějším průměru 16 mm a tloušťce stěny 1,3 mm.

Nejprve byl pomocí SEM zobrazen povrch hliníkových kroužků, které vznikly laserovým řezáním trubiček (obr. 26). Tento laserovým řezáním vytvořený povrch byl porovnán s vyleštěným povrchem téhož materiálu. Jak je vidět na obrázku 27, na obou druzích povrchů se vyskytují vytvrzující sraženiny (vytvrzující „částice“), avšak výrazně se liší jejich prostorová uspořádání. Rovněž je zřejmé, že povrch po řezání laserem je v porovnání s vyleštěným povrchem značně nerovný.

Snímky ze SEM dále prozradily, že vytvrzující sraženiny na laserem řezaném povrchu jsou rozmístěny nerovnoměrně - hromadí se v blízkosti vnějšího obvodu kroužků. Na vyleštěném povrchu toto nebylo pozorováno.



Obrázek 26: Fotografie kroužků z hliníkové slitiny AW 3103. Mikroskopovány byly jejich povrchy vytvořené laserovým řezáním (tj. „podstavy“ kroužků).



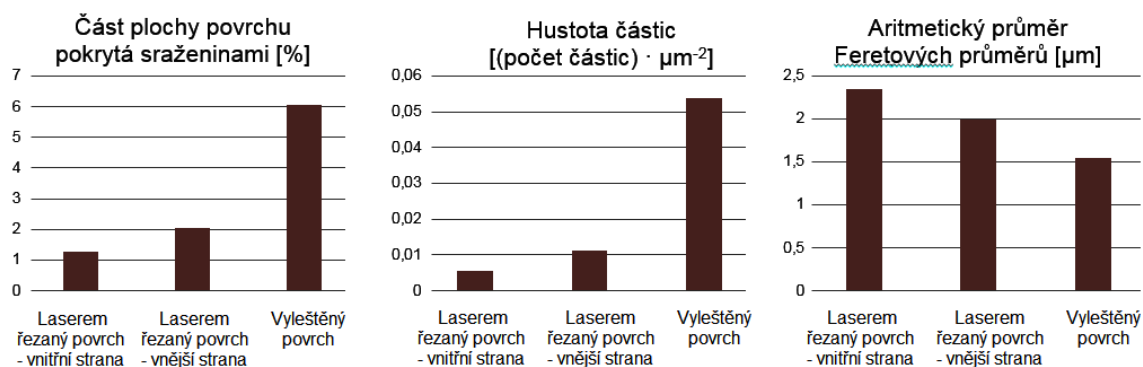
Obrázek 27: Porovnání laserem řezaného (vlevo) a vyleštěného (vpravo) povrchu slitiny AW 3103. Bílé částice zřetelné na obou površích představují vytvrzující sraženiny. Zvětšení 1100x.

Po těchto zjištěních bylo provedeno statistické vyhodnocení velikostí a prostorové distribuce vytvrzujících sraženin. Výsledky pro silnější trubičku jsou uvedeny na obrázku 28, výsledky pro tenčí trubičku jsou podobné. V obou případech se ukázalo, že sraženiny pokrývají menší procento povrchu řezaného laserem, než povrchu vyleštěného. Rovněž hustota částic, vyjádřená počtem částic nacházejících se na jednotkové ploše, je na laserem řezaném povrchu menší. Naopak střední hodnota Feretova průměru¹⁹ sraženin je na laserem řezaném povrchu vyšší. Domníváme se, že příčinou může být překrývání některých (zejm. menších) sraženin taveninou hliníku vznikající v průběhu řezání.

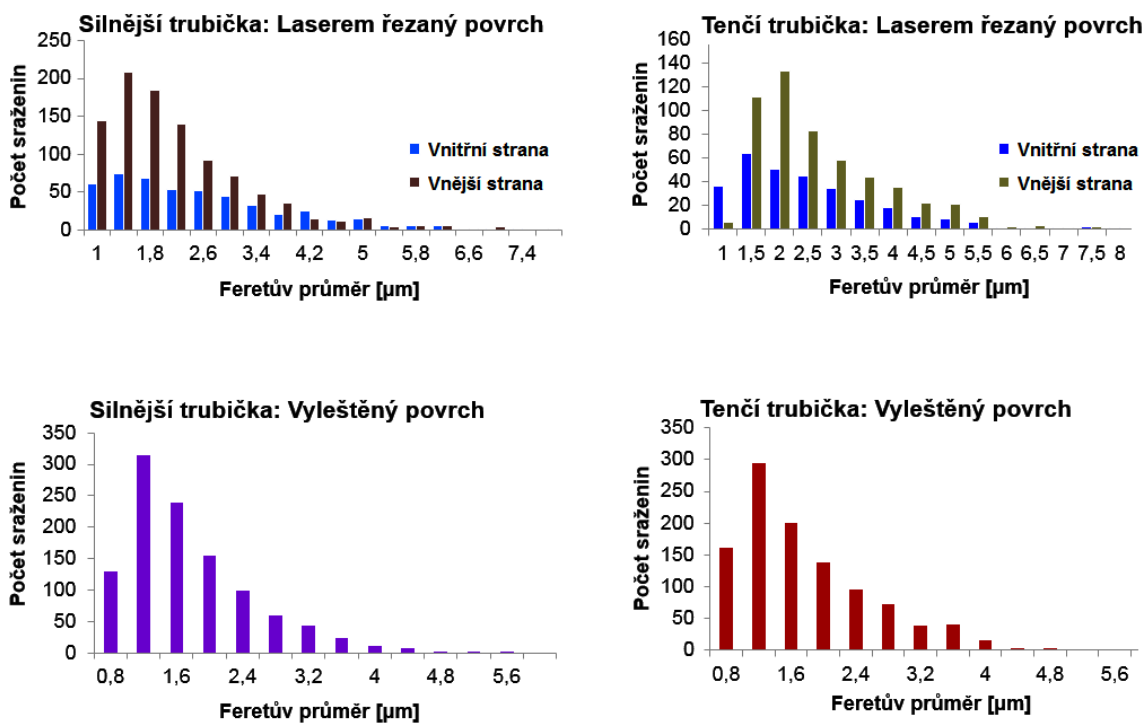
Na obrázku 28 jsou též vidět rozdíly v míře pokrytí povrchu sraženinami i v hustotě sraženin (zavedené výše uvedeným způsobem) mezi vnějším a vnitřním okrajem laserem řezaných kroužků.

Obrázek 29 ukazuje statistická rozdělení Feretových průměrů sraženin pro laserem řezaný i vyleštěný povrch silnějších i tenčích trubiček. Tato rozdělení jsou opět logaritmicko-normální.

¹⁹Feretův průměr je zde chápán jako nejdelší ze vzdáleností mezi libovolnými dvěma body obvodu uvažované oblasti (uvažované částice).

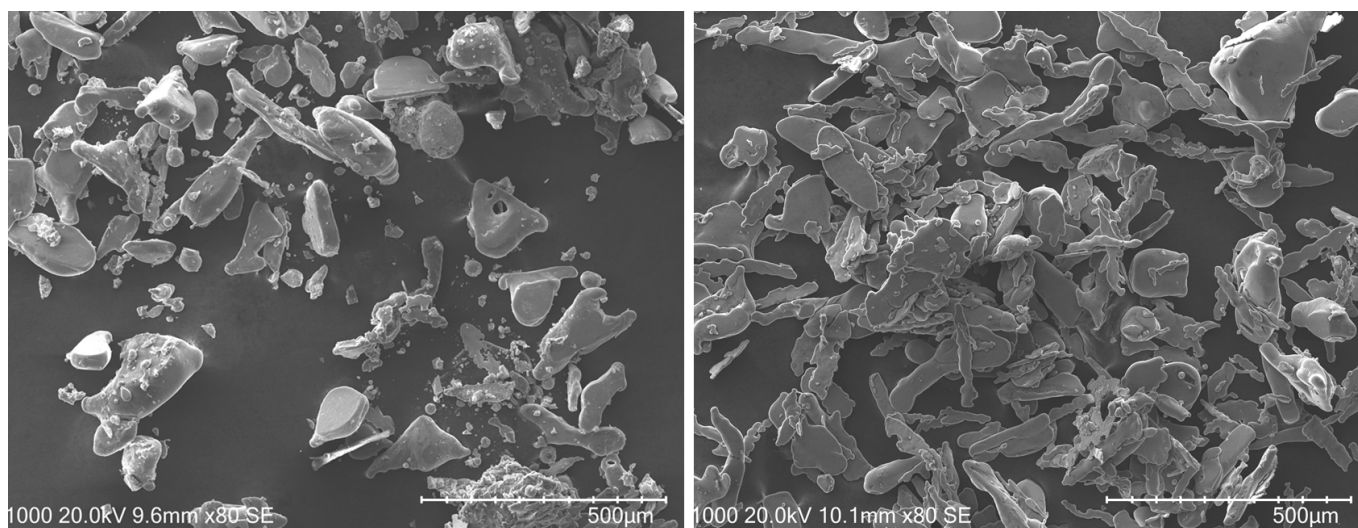


Obrázek 28: Výsledky vyhodnocení velikostí a prostorové distribuce sraženin na laserem řezaném a na vyleštěném povrchu slitiny AW 3103.

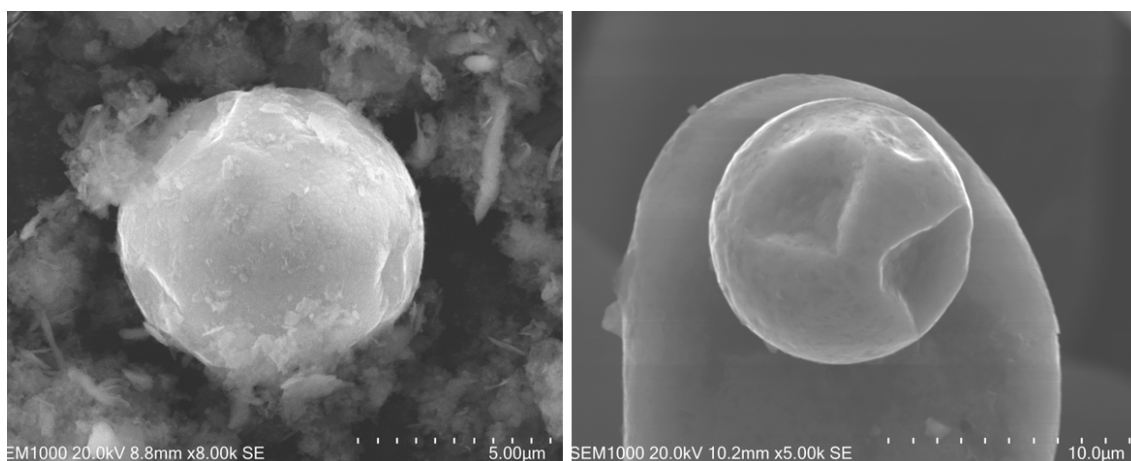


Obrázek 29: Histogramy Feretových průměrů sraženin na povrchu materiálu AW 3103. U laserem řezaných povrchů byly histogramy vytvořeny zvlášť pro vnitřní a zvlášť pro vnější okraje kroužků.

SEM byla použita také pro studium morfologie kovových mikročástic vzniklých při laserovém řezání slitiny AW 3103. Ukázky tohoto práškového odpadu jsou na obrázku 30. Většina pozorovaných mikročástic má deskovitý tvar, avšak byly nalezeny i menší částice přibližně kulového tvaru (obr. 31).

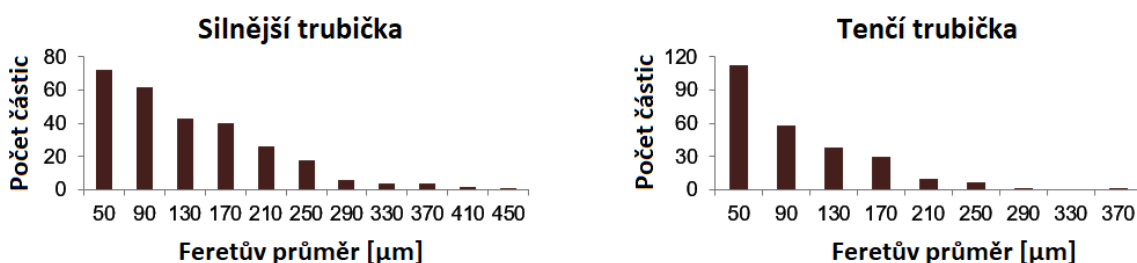


Obrázek 30: Kovový prášek vyprodukovaný při řezání silnější trubičky (vlevo) a tenčí trubičky (vpravo). Zvětšení 80x.



Obrázek 31: Mikročástice přibližně kulového tvaru nalezené v práškovém odpadu z řezání silnější trubičky (vlevo, zvětšení 8 000x) a tenčí trubičky (vpravo, zvětšení 5 000x).

Průměrná hodnota Feretova průměru deskovitých částic ze silnější trubičky je $(114,1 \pm 82,4)$ μm , pro deskovité částice z tenčí trubičky činí $(81,0 \pm 67,5)$ μm . Histogramy Feretových průměrů deskovitých částic ukazuje obrázek 32.



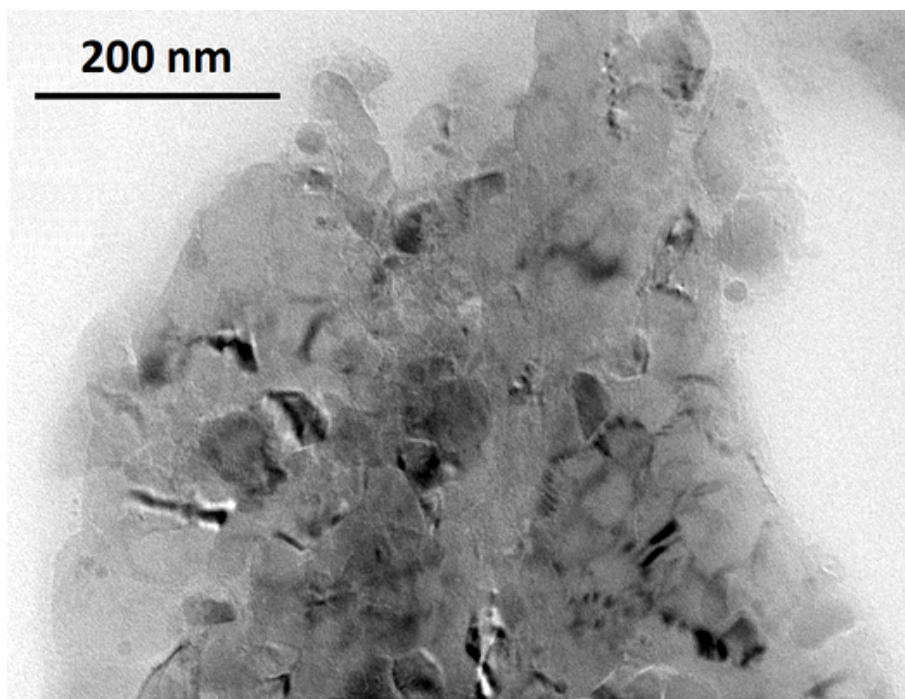
Obrázek 32: Histogramy Feretových průměrů deskovitých odpadních částic ze silnější trubičky (vlevo) a z tenčí trubičky (vpravo).

Chemické složení vzorků bylo určeno opět metodou EDS. Zmiňované vytvrzující sraženiny na povrchu materiálu obsahují především mangan a železo. Na vyleštěném povrchu byly v těchto sraženinách naměřeny vyšší koncentrace manganu, navíc zde byly nalezeny i křemíkové částice, které se na povrchu řezaném laserem nevyskytují. Mikročástice odpadního prášku mají povrch tvořený téměř čistým hliníkem.

Fázová analýza odpadního prášku, provedená pomocí XRD, potvrdila, že jeho mikročástice jsou tvořeny převážně z hliníku a obsahují pouze malé množství nečistot.

Transmisní elektronová mikroskopie odhalila, že i tento odpadní prášek obsahuje nanočástice (viz obr. 33). Změřené Feretovy průměry těchto nanočástic se pohybují v rozmezí přibližně 20 až 80 nm.

Na základě provedených analýz se domníváme, že i práškový odpad z laserového řezání hliníkové slitiny AW 3103 by mohl být využit v aditivní výrobě. Opět zde však existuje určité zdravotní riziko vyplývající z přítomnosti nanočástic v tomto prášku. Další informace o tomto výzkumu budou uvedeny v připravovaném příspěvku do sborníku z konference ERIN 2019.



Obrázek 33: Nanočástice hliníkového práškového odpadu, pořízené pomocí TEM ve světlém poli. Zvětšení 100 000x.

11 Závěr

Disertační práce představila autorův disertační projekt zaměřený na náplň výuky vybraných bakalářských fyzikálně-technických oborů a na začleňování Ramanovy spektroskopie a matematického modelování do výuky na PřF UHK.

V první polovině práce jsou popsány základy Ramanovy spektroskopie, modelování produkce bioplynu v bioplynových stanicích a modelování rozptylu znečišťujících látek v ovzduší. Kromě základní teorie jsou zde uvedeny také přehledy možností vzdělávání v těchto oblastech a návrhy výukových úloh na tato témata. Teoretické části těchto kapitol budou využity jako studijní texty pro studenty oboru FTMB a později pravděpodobně také pro studenty nově připravované environmentálně zaměřené specializace, přičemž výuka bude doplněna autorem navrženými úlohami na uvedená témata.

Názory studentů a absolventů oboru FTMB na tento obor, který v současné době dobíhá na PřF UHK, byly zjištěny formou dotazníkového šetření. Respondenti jsou s tímto oborem vcelku spokojeni, přestože studium v průměru považují za spíše obtížné. Z výsledků je též patrné, že respondenti přikládají značný význam tomu, aby studium bylo prakticky zaměřeno - mají zájem o praktické ukázky přístrojové techniky, laboratorní cvičení i odborné stáže např. v průmyslových podnicích.

Dá se očekávat, že praktické zaměření studia a dobrá uplatnitelnost absolventů budou hrát významnou roli i pro studenty nově připravované environmentálně zaměřené specializace a rovněž pro potenciální uchazeče o studium této specializace.

Praktické úlohy na Ramanovu spektroskopii byly pilotovány na studentech oboru FTMB a na skupině zahraničních studentů, zhodnocení této výuky bylo provedeno formou polostrukturovaných skupinových rozhovorů. Ukázalo se, že domácí i zahraniční studenti vesměs vnímají RS jako zajímavé téma, kterému by se rádi věnovali i v budoucnu. Toto kladné přijetí RS může být dáno i tím, že většina z dotazovaných studentů dosud neměla příležitost pracovat s jinými moderními měřicími přístroji - nelze proto vyloučit, že po hlubším poznání další přístrojové techniky budou někteří ze studentů preferovat jiné přístroje (např. skenovací elektronový mikroskop, skenovací tunelový mikroskop či mikroskop atomárních sil).

V každém případě lze považovat za úspěch přinejmenším to, že studenti získali prostřednictvím výuky RS kladný vztah k moderní přístrojové technice a chuť dále

se vzdělávat v tomto tématu. Dotazovaní studenti mají zájem především o praktické využívání RS, avšak uvědomují si i důležitost teorie nezbytné k pochopení činnosti Ramanova spektrometru. Uvítali by, kdyby výuce RS bylo věnováno více času.

Při přípravě nové specializace studia může posloužit porovnání učební náplně pěti fyzikálně-technických oborů zavedených na různých českých univerzitách (jedním z nich je i FTMB na PřF UHK). Z tohoto porovnání vyplynulo, že nejvíce hodin výuky je ve všech srovnávaných oborech věnováno odborným předmětům rozličného zaměření. Přestože všechny obory se snaží o propojení s praxí, absolvování odborné praxe je povinné jen v oboru Aplikované počítačové modelování, přičemž její požadovaná délka je pouze jeden týden.

V disertační práci byl stručně představen také autorův environmentální výzkum zaměřený na matematické modelování rozptylu emisí rtuti z uhelných elektráren a na související měření obsahu rtuti v životním prostředí. Rovněž zde byly popsány výsledky charakterizace odpadních kovových mikro- a nanočástic, které vznikají při laserovém řezání různých kovových materiálů. Do budoucna je v plánu se na Katedře fyziky PřF UHK věnovat obdobným výzkumným tématům s využitím nově zakoupené přístrojové techniky (Ramanův spektrometr, elektronový mikroskop aj.) a zapojovat do vědecké práce i nadané studenty.

12 Použité zdroje

- [1] Dlouhodobý záměr vzdělávání a rozvoje vzdělávací soustavy České republiky na období 2015-2020. *MŠMT* [online]. Praha: MŠMT [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: http://www.msmt.cz/file/35188_1_1/
- [2] Dlouhodobý záměr vzdělávací a vědecké, výzkumné, vývojové a inovační, umělecké a další tvůrčí činnosti pro oblast vysokých škol na období 2016 – 2020. *MŠMT* [online]. Praha: MŠMT [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: http://www.msmt.cz/uploads/odbor_30/Jakub/DZ_2016_2020.pdf
- [3] Doporučené postupy pro přípravu studijních programů. *Národní akreditační úřad pro vysoké školství: Metodické materiály* [online]. Praha: NAÚ, 2017 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: https://www.nauvs.cz/attachments/article/71/Dopor_postupy_pro_pripravu_SP_2017_01_08.pdf
- [4] *Akreditované studijní programy vysokých škol* [online]. Praha: MŠMT, ©2018 [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <https://aspvs.isacc.msmt.cz/>
- [5] SMITH, Ewen a Geoffrey DENT. *Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach*. Chichester (West Sussex): Wiley, 2005. ISBN 0-471-49794-0.
- [6] DENDISOVÁ, Marcela, Pavel ŽVÁTORA a Pavel MATĚJKA. Ramanova spektrometrie. *Ústav analytické chemie VŠCHT Praha* [online]. Praha: VŠCHT [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/anl/lach2/RAMAN.pdf>
- [7] JANDERA, Pavel. *Atomová a molekulová spektroskopie se zaměřením na stopovou analýzu kontaminantů: Díl B - Molekulová spektroskopie v organické analýze*. Vyd. 2. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2006. ISBN 978-80-7395-392-8.
- [8] KALINA, Jiří a Vladimír ŠPUNDA. *Optická spektroskopie I*. Ostrava: Ostravská univerzita, 2004. ISBN 80-736-8000-9.
- [9] ŠTĚPÁNEK, Josef. *Metody optické spektroskopie v biofyzice: stacionární stavy mnohoatomových molekul z hlediska optické spektroskopie*. *Oddělení*

- fyziky biomolekul, Fyzikální ústav UK* [online]. Praha: Fyzikální ústav UK, ©2018 [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Stacionarni_stavy_BCM113.pdf
- [10] NOVOTNÁ, Radka, Tomáš ŠILHA a Zdeněk TRÁVNÍČEK. Spektrální metody studia chemických látek. *Katedra anorganické chemie PřF UPOL* [online]. Olomouc: UPOL, 2011 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: http://agch.upol.cz/userfiles/file/Spektralni_metody.pdf
- [11] SIEBERT, Friedrich a Peter HILDEBRANDT. *Vibrational Spectroscopy in Life Science*. Weinheim (Německo): Wiley-VCH Verlag, 2008. ISBN 978-3-527-40506-0.
- [12] ASSIRELLI, Melissa, Weiyin XU a Wee CHEW. Reactor Kinetics Studies via Process Raman Spectroscopy, Multivariate Chemometrics, and Kinetics Modeling. *Org. Process Res. Dev.* 2011, 15(3), 610-621. DOI: 10.1021/op100337v.
- [13] STEVENS, Oliver et al. Developing fibre optic Raman probes for applications in clinical spectroscopy. *Chem. Soc. Rev.* 2016, 45(7), 1919-1934. DOI: 10.1039/C5CS00850F.
- [14] ŠLÉGR, Jan. *Částice a pole*. Hradec Králové: Gaudeamus, 2017. ISBN 978-80-7435-670-4.
- [15] Raman Spectral Databases. *Bio-Rad* [online]. Hercules (California): Bio-Rad Laboratories, ©2018 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <http://www.bio-rad.com/en-kh/product/raman-spectral-databases>
- [16] LabSpec 6 Spectroscopy Suite Software. *Horiba Scientific* [online]. Kyoto (Japan): Horiba, ©2018 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <http://www.horiba.com/us/en/scientific/products/raman-spectroscopy/software/>
- [17] Raman software: analysis. *Renishaw* [online]. Gloucestershire (United Kingdom): Renishaw, ©2018 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/raman-software-analysis--25909>

- [18] JORIO, Ado a Antonio G. SOUZA FILHO. Raman Studies of Carbon Nanostructures. *Annual Review of Materials Research*. 2016, 46(1), 357-382. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-032140.
- [19] QIU, Wei et al. Measurement of residual stress in a multi-layer semiconductor heterostructure by micro-Raman spectroscopy. *Acta Mech. Sin.* 2016, 32(5), 805-812. DOI: 10.1007/s10409-016-0591-1.
- [20] SUN, Zhenli, Jingjing DU a Chuanyong JING. Recent progress in detection of mercury using surface enhanced Raman spectroscopy — A review. *Journal of Environmental Sciences*. 2016, 39, 134-143. DOI: 10.1016/j.jes.2015.11.009.
- [21] ZHAO, Yan-ru et al. Application of Raman Spectroscopy Technique for Detecting the Physiological Information of Plants: A Review. *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 2017, 37(5), 1350-1356. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2017)05-1350-07.
- [22] SUN, Da-Wen, Yingfen JIANG, Qingyi WEI a Hongbin PU. Surface enhanced Raman spectroscopy (SERS): A novel reliable technique for rapid detection of common harmful chemical residues. *Trends in Food Science and Technology*. 2018, 75(1), 10-22. DOI: 10.1016/j.tifs.2018.02.020. ISSN 09242244.
- [23] KONG, Kenny, Catherine KENDALL, Nicholas STONE a Ioan NOTTINGHER. Raman spectroscopy for medical diagnostics: From in-vitro biofluid assays to in-vivo cancer detection. *Advanced Drug Deliv Rev*. 2015, 89(1), 121-134. DOI: 10.1016/j.addr.2015.03.009.
- [24] PAUDEL, Amrit, Dhara RAIJADA a Jukka RANTANEN. Raman spectroscopy in pharmaceutical product design. *Adv Drug Deliv Rev*. 2015, 89(1), 3-20. DOI: 10.1016/j.addr.2015.04.003.
- [25] Using Raman Spectroscopy in Forensic Science. *AZO Materials* [online]. Manchester (United Kingdom): AZoNetwork UK, 2015 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11733>

- [26] RAZA, Ali a Basudeb SAHA. Application of Raman spectroscopy in forensic investigation of questioned documents involving stamp inks. *Science and Justice*. 2013, 53(3), 332-338. DOI: 10.1016/j.scijus.2012.11.001.
- [27] PENIDO, Ciro, Marcos TADEU PACHECO, Igor LEDNEV a Landulfo SILVEIRA Jr. Raman spectroscopy in forensic analysis: identification of cocaine and other illegal drugs of abuse. *J. Raman Spectrosc.* 2016, 47(1), 28-38. DOI: 10.1002/jrs.4864.
- [28] FirstDefenderTM RM Chemical Identification System. *Thermo Fisher Scientific* [online]. Waltham (Massachusetts): Thermo Fisher Scientific, ©2016 [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/FIRSTDEFENDERRM>
- [29] LYDŹBA-KOPCZYŃSKA, Barbara, Bogusław GEDIGA, Jan CHOJCAN a Michał SACHANBIŃSKI. Provenance investigations of amber jewelry excavated in Lower Silesia (Poland) and dated back to Early Iron Age. *J. Raman Spectrosc.* 2012, 43(11), 1839-1844. DOI: 10.1002/jrs.4187.
- [30] ZANNINI, Paolo et al. Identification of colorants on XVIII century scientific hand-coloured print volumes. *J. Raman Spectrosc.* 2012, 43(11), 1722-1728. DOI: 10.1002/jrs.4119.
- [31] LE RU, Eric. a Pablo G. ETCHEGOIN. *Principles of surface-enhanced Raman spectroscopy and related plasmonic effects*. Amsterdam: Elsevier, 2009. ISBN 978-0-444-52779-0.
- [32] LE RU, Eric, Evan BLACKIE, M. MEYER a Pablo G. ETCHEGOIN. Surface Enhanced Raman Scattering Enhancement Factors: A Comprehensive Study. *J. Phys. Chem.* 2007, 111(37), 13794-13803. DOI: 10.1021/jp0687908.
- [33] Raman spectroscopy setup and experiments for the advanced undergraduate lab. In: CORMIER, Eric a Laurent SARGER. *Proc. of SPIE*. SPIE, 2015, 2015-10-8, 97931M. DOI: 10.1117/12.2223121.
- [34] PAVEL, Ioana et al. Estimating the Analytical and Surface Enhancement Factors in Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS): A Novel Physical

- Chemistry and Nanotechnology Laboratory Experiment. *J. Chem. Educ.* 2012, 89(2), 286–290. DOI: 10.1021/ed200156n.
- [35] CREIGHTON, J. Alan, Christopher G. BLATCHFORD a M. Grant ALBRECHT. Plasma Resonance Enhancement of Raman Scattering by Pyridine Adsorbed on Silver or Gold Sol Particles of Size Comparable to the Excitation Wavelength. *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 2.* 1979, 75, 790-798. DOI: 10.1039/f29797500790.
- [36] SCHAFTENAAR, Gijs. *MOLDEN: a pre- and post processing program of molecular and electronic structure* [online]. Nijmegen (Netherlands): Centre for Molecular and Biomolecular Informatics [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.cmbi.ru.nl/molden/>
- [37] *Jmol: an open-source browser-based HTML5 viewer and stand-alone Java viewer for chemical structures in 3D* [online]. La Jolla (California): Slashdot Media [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://jmol.sourceforge.net/>
- [38] Phenylnitrene vibrations. *Jmol: an open-source browser-based HTML5 viewer and stand-alone Java viewer for chemical structures in 3D* [online]. La Jolla (California): Slashdot Media [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://jmol.sourceforge.net/demo/vibration/>
- [39] LAURIN, Mathias. QVibeplot: A Program To Visualize Molecular Vibrations in Two Dimensions. *J. Chem. Educ.* 2013, 90(7), 944-946. DOI: 10.1021/ed300554z.
- [40] MCCLAIN, Brian L. Educational Applications of IR and Raman Spectroscopy: A Comparison of Experiment and Theory. *J. Chem. Educ.* 2000, 77(5), 654-660. DOI: 10.1021/ed077p654.
- [41] Kurzy vibračních spekter 2018. *Spektroskopická společnost Jana Marka Marci* [online]. Praha: SSJMM [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.spektroskopie.cz/?q=kurzyVS2018>
- [42] Molekulární spektroskopie. *Výzkumný ústav pro farmacii a biochemii* [online]. Brno: VUFB, 2018 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z:

<http://www.vufb.eu/cs-cz/kurzy/hardskills/molekul%C3%A1rn%C3%ADspektroskopie.aspx>

- [43] Kurzy Molekulové spektroskopie 2018. *Nicolet CZ* [online]. Praha: Nicolet CZ [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.nicoletcz.cz/kurzy-molekulove-spektroskopie-2018>
- [44] Webináře. *Nicolet CZ* [online]. Praha: Nicolet CZ [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.nicoletcz.cz/webinare>
- [45] Akce Optik Instruments pro rok 2018. *Optik Instruments* [online]. Brno: Optik Instruments [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.brukeroptics.cz/cs/novinky/optik-instruments-novinky/akce-optik-instruments-pro-rok-2018/>
- [46] Raman - školení. *Renishaw* [online]. Brno: Renishaw [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/raman-skoleni--25940>
- [47] LOSKOT, Jan et al. Innovative Educational Program for Biogas Production Carried Out at University of Hradec Králové (CZ) and at University of Opole (PL). *Chem Didact Ecol Metrol.* 2016, 21(1-2), 57-70. DOI: 10.1515/cdem-2016-0005.
- [48] IGLIŃSKI, Bartłomiej, Grzegorz PIECHOTA a Roman BUCZKOWSKI. Development of biomass in polish energy sector: an overview. *Clean Techn Environ Policy.* 2014, 17(2), 317-329. DOI: 10.1007/s10098-014-0820-x.
- [49] The agricultural biogas plants in Poland. *Oil and Gas Institute - National Research Institute Poland* [online]. Global Methane Initiative, 2014 [cit. 2018-10-26]. Dostupné z: <https://www.globalmethane.org/documents/Poland-Ag-Biogas-Plants-April-2014.pdf>
- [50] LEBUHN, Michael, Bernhard MUNK a Mathias EFFENBERGER. Agricultural biogas production in Germany - from practice to microbiology basics. *Energ Sustain Soc.* 2014, 4, 10. DOI: 10.1186/2192-0567-4-10.
- [51] CLIFFORD, Caroline B. Anaerobic Digestion. *Alternative Fuels from Biomass Sources* [online]. State College, PA, Pennsylvania: John A. Dut-

ton e-Education Institute, ©2018 [cit. 2018-10-27]. Dostupné z: <https://www.e-education.psu.edu/egee439/node/727>

- [52] ACHINAS, Spyridon a Gerrit J. W. EUVERINK. Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. *Resource-Efficient Technologies*. 2016, 2(3), 143-147. DOI: 10.1016/j.reffit.2016.08.001.
- [53] PEPPEL, Tim et al. Methods for the Trace Oxygen Removal from Methane-Rich Gas Streams. *Chem. Eng. Technol.* 2017, 40(1), 153–161. DOI: 10.1002/ceat.201600171.
- [54] EL MONAYERI, D. S., N. N. ATTA, S. M. EL MOKADEM a A. M. ABOULFOTOH. Improvement of anaerobic digesters using pre-selected micro-organisms. *Inter Water Technol J.* 2013, 3(1), 45-59. Dostupné z: <http://iw tj.info/wp-content/uploads/2013/04/V3-N1-P5.pdf>
- [55] WEILAND, Peter. Biogas production: Current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2010, 85(4), 849-860. DOI: 10.1007/s00253-009-2246-7.
- [56] BOND, Tom a Michael R. TEMPLETON. History and future of domestic biogas plants in the developing world. *Energy for Sustainable Development.* 2011, 15(4), 347–354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.003>.
- [57] KOWALCZYK-JUŚKO, Alina and Aleksander MAZANEK. Agricultural biogas – characteristics, substrates and its use. *Combustion Engines.* 2012, 51(1), 8-14. Dostupné z: http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-L0DC-0003-0002/c/kowalczyk-jusko_mazanek_agricultural_ss_1_2012.pdf
- [58] MATHIEU, Brulé, Hans OECHSNER a Thomas JUNGBLUTH. Exponential model describing methane production kinetics in batch anaerobic digestion: a tool for evaluation of biochemical methane potential assays. *Bioprocess Biosyst Eng.* 2014, 37(9), 1759-1770. DOI: 10.1007/s00449-014-1150-4.
- [59] ECHIEGU, Emmanuel A. Kinetic Models for Anaerobic Fermentation Processes-A Review. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology.* 2015, 11(3), 132-148. DOI: 10.3844/ajbbbsp.2015.132.148.

- [60] VAVILIN, V.A., B. FERNANDEZ, J. PALATSI a X. FLOTATS. Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. *Waste Management*. 2008, 28(6), 939-951. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.03.028.
- [61] Anaerobní technologie. *Bioprofit* [online]. Lišov: BIOPROFIT, ©2007 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm
- [62] ANGELONIDI, Eleni a Stephen R. Smith. A comparison of wet and dry anaerobic digestion processes for the treatment of municipal solid waste and food waste. *Water and Environment Journal*. 2015, 29(4), 549-557. DOI: 10.1111/wej.12130.
- [63] KŘÍŽ, Jan et al. Technologické a environmentální modely ve výuce Katedry fyziky PřF UHK. Část 1: Modelování šíření emisí z bioplynových stanic. *Media4u Magazine*. 2016, 16(2), 59-65. Dostupné z: <http://media4u.cz/mm022016.pdf>
- [64] HASHIMOTO, Andrew G. a CHEN Y.R. Kinetics of methane fermentation. In: *Biotechnol Bioeng Symp*. 1978, 269-282. ISSN 0572-6565. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/236522506_Kinetics_of_methane_fermentation
- [65] BLESGEN, Andree a Volker C. HASS. Efficient Biogas Production through Process Simulation. *Energy Fuels*. 2010, 24(9), 4721-4727. DOI: 10.1021/ef9012483.
- [66] SIMBA#biogas. *InCTRL Solutions* [online]. Oakville, Ontario (Canada): inCTRL Solutions, ©2018 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.inctrl.ca/software/simba/simbabiogas/>
- [67] *SIMBA#biogas: Simulation Platform for Biogas Plants*. InCTRL Solutions [online]. Oakville, Ontario (Canada): inCTRL Solutions, ©2018 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: https://www.inctrl.ca/wp-content/uploads/2016/05/SIMBAbiogas_2.0.pdf
- [68] VACH, Marek. *Ochrana ovzduší*. Praha: ČZU, 2005. ISBN 80-213-1388-9.

- [69] JANČÍK, Petr. *Modelování rozptylu znečišťujících látek v ovzduší* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, 1998 [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <http://katedry.fmmi.vsb.cz/616/soubory/modelovani.pdf>
- [70] BRANIŠ, Martin a Iva HŮNOVÁ, ed. *Atmosféra a klima: Aktuální otázky znečištění ovzduší*. Praha: Nakladatelství Karolinum, 2009. ISBN 978-80-246-1598-1.
- [71] MAZZOCCHI, Mario, Francesca HANSSTEIN a Maddalena RAGONA. *The 2010 Volcanic Ash Cloud and Its Financial Impact on the European Airline Industry*. CESifo Forum. 2010, 11(2), 92-100. ISSN 1615-245X.
- [72] BUBNÍK, Jiří et al. *SYMOS'97: Systém modelování stacionárních zdrojů. Metodická příručka*. Praha: ČHMÚ, 1998 (aktualizováno 2014). ISBN 80-85813-55-6.
- [73] VÝTISK, Tomáš. *Legislativa a monitoring v ochraně ovzduší u spalovacích zdrojů. Inovace odborného vzdělávání na středních školách zaměřené na využití energetických zdrojů pro 21. století a jejich dopad na životní prostředí* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, 2012 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/010/downloads/texty/Legislativa_a_monitoring_v_ochrane_ovzdusi-Vytisk.pdf
- [74] BRAUN, Petr et al. *Příručka ochrany kvality ovzduší*. Praha: Sdružení společností IREAS centrum; Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2013. ISBN 978-80-86832-77-7.
- [75] MACOUN, Jan. *Modelování mezní vrstvy atmosféry s aplikacemi na problémy čistoty ovzduší*. Praha, 1999. Disertační práce. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/108132/>
- [76] RŮŽIČKOVÁ, Kateřina. *Modelování a simulace v geovědách: Studijní text. Dokumentační portál Centra informačních technologií VŠB-TUO* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, 2013 [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~ruz02/msg/prednasky/msg_skripta_v2.pdf

- [77] ŽALUD, Zdeněk. Bioklimatologie. *Kiwi: uživatelský server Mendelovy univerzity v Brně* [online]. Brno: Mendelova Univerzita v Brně, 2015 [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_217_multitext/ke_stazeni/bioklimatologie/bioklimatologie_2015.pdf
- [78] Transport, rozptyl a transformace znečišťujících látek v atmosféře; Depozice: Podklady k semináři Rozptylové studie látek znečišťujících ovzduší. *Třetí Ruka* [online]. Praha: České ekologické manažerské centrum, 2010 [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: https://tretiruka.cz/_files/200001883-2718328120/Teorie.doc
- [79] MĀRUNŤĀLU, Oliver et al. Numerical Simulation of the Air Pollutants Dispersion Emitted by CHP Using ANSYS CFX. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*. 2015, 9(9), 1058-1064.
- [80] *Idea-Envi* [online]. Valašské Meziříčí: Idea-Envi, ©2017 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://www.idea-envi.cz/>
- [81] Grafická ročenka 2016: Znečišťování ovzduší. *Portál ČHMÚ* [online]. Praha: ČHMÚ, ©2017 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/16groc/gr16cz/II_ovzd_CZ.html
- [82] Grafická ročenka 2016: Rozdělení zdrojů znečišťování podle způsobu sledování emisí. *Portál ČHMÚ* [online]. Praha: ČHMÚ, ©2017 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/16groc/gr16cz/tab/tabII1_CZ.html
- [83] ZABAGED - výškopis: Úvod. *Geoportál ČÚZK* [online]. Praha: ČÚZK, 2018 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(1tzjgh3bk5jvr0y1hiwrcokt\)\)/default.aspx?mode=TextMeta&text=vyskopisZBG&side=vyskopis&head_tab=sekce-02-gp&head_tab=sekce-02-gp&menu=30](http://geoportal.cuzk.cz/(S(1tzjgh3bk5jvr0y1hiwrcokt))/default.aspx?mode=TextMeta&text=vyskopisZBG&side=vyskopis&head_tab=sekce-02-gp&head_tab=sekce-02-gp&menu=30)
- [84] LOSKOT, Jan. Innovative Educational Course II: Modelling of Odour Dispersion from Agricultural Biogas Plants. *Chem Didact Ecol Metrol*. 2017, 22(1-2), 135-150. DOI: 10.1515/cdem-2017-0008.

- [85] GEBICKI, Jacek, Hubert BYLIŃSKI a Jacek NAMIEŚNIK. Measurement techniques for assessing the olfactory impact of municipal sewage treatment plants. *Environ Monit Assess.* 2016, 188(1), 32-46. DOI: 10.1007/s10661-015-5024-2.
- [86] BUBNÍK, Jiří et al. Podkladové materiály pro závěrečný kontrolní den projektu: Výzkum, vývoj a implementace nových měřicích metod pro hodnocení znečištění ovzduší a využití v rámci legislativy ES. *Portál ČHMÚ* [online]. Praha: ČHMÚ, 2003 [cit. 2018-12-26]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/ome/modely/SF-740-2-02_zpr2003.pdf
- [87] WILSON, Alphus D. a Manuela BAIETTO. Applications and Advances in Electronic-Nose Technologies. *Sensors.* 2009, 9(7), 5099-5148. DOI: 10.3390/s90705099.
- [88] KEDER, Josef. Adaptation of the Czech regulatory dispersion model for odour dispersion calculation, its validation and critical evaluation. *Chemical Engineering Transactions.* 2008, 15, 17-22.
- [89] FREEMAN, Tracy a Roger CUDMORE. Review of Odour Management in New Zealand. *Air Quality Technical Report No. 24* [online]. Wellington: New Zealand Ministry for the Environment, 2002 [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <http://www.cschi.cz/odour/files/world/odour-tr-aug021.pdf>
- [90] HERRING, Stephanie C. et al, ed. Explaining Extreme Events of 2014 from a Climate Perspective. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2015, 96(12), S1–S172. Dostupné také z: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-ExplainingExtremeEvents2014.1>
- [91] Laboratorní a měřicí technika. *Informační systém Masarykovy Univerzity: Katalog oborů* [online]. Brno: Masarykova Univerzita [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/obory/18723?fakulta=1431>
- [92] *Studijní katalog Přírodovědecké fakulty MU: Akademický rok 2017/2018, Fyzika* [online]. Brno: Masarykova Univerzita, 2017 [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <http://www.sci.muni.cz/katalog/katalog2017/katalogF.pdf>

- [93] *Informační systém Masarykovy Univerzity: Vyhledávání* [online]. Brno: Masarykova Univerzita [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/vyhledavani/>
- [94] Uchazeči o bakalářské studium: Přijímací zkoušky. *Přírodovědecká fakulta MU* [online]. Brno: Masarykova Univerzita, ©2011 [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <http://www.sci.muni.cz/cz/PriBc/Prijimaci-zkousky>
- [95] Studijní plány pro akademický rok 2017-2018. *Filozoficko-přírodovědecká fakulta SU* [online]. Opava: Slezská univerzita v Opavě [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <https://www.slu.cz/su/fpf/cz/studijni-oddeleni/studijni-plany/studijni-plany-pro-akademicky-rok-2017-2018>
- [96] *Portál SLU: Prohlížení* [online]. Opava: Slezská univerzita v Opavě [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <https://stag.slu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>
- [97] Podmínky přijímacího řízení pro akademický rok 2018/2019. *Filozoficko-přírodovědecká fakulta SU* [online]. Opava: Slezská univerzita v Opavě [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: https://www.slu.cz/fpf/cz/studijni-oddeleni/prijimaci-rizeni/2018-2019/Podminky_prijimaciho_rizeni_pro_ar_2018_2019.pdf
- [98] Zájemci o studium. *Přírodovědecká fakulta UPOL* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <https://www.prf.upol.cz/zajemci-o-studium/>
- [99] Přístrojová fyzika. *Katalog studijních oborů UPOL* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <https://obory.upol.cz/nc/obor/detail/pristrojova-fyzika/>
- [100] *Portál UPOL: Prohlížení* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <https://stag.upol.cz/portal/studium/prohlizeni.html>
- [101] Studijní obor B1702 - Aplikované počítačové modelování. *Katedra fyziky PřF UJEP* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 2015 [cit.

- 2018-02-05]. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/CZ/view.php?cisloclanku=2015020003>
- [102] *Portál UJEP: Prohlížení* [online]. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <https://portal.ujep.cz/portal/studium/prohlizeni.html>
- [103] Studijní obory. *UHK - Přírodovědecká fakulta* [online]. Hradec Králové: UHK, ©2014-2016 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://www.uhk.cz/cs-CZ/PRF/Studium/Studijni-obory>
- [104] *Portál UHK - IS/STAG: Prohlížení* [online]. Hradec Králové: UHK [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://stag.uhk.cz/portal/studium/prohlizeni.html>
- [105] KRŽÍŽ, Jan, Jan LOSKOT et al. Modelling of Mercury Emissions from Large Solid Fuel Combustion and Biomonitoring in CZ-PL Border Region. *Ecol Chem Eng S.* 2016, 23(4), 593-604. DOI: 10.1515/eces-2016-0042.
- [106] PUDASAINEE, Deepak, Jeong H. KIM a Yong C. SEO. Mercury emission trend influenced by stringent air pollutants regulation for coal-fired power plants in Korea. *Atmos Environ.* 2009, 43(39), 6254-6259. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.06.007.
- [107] BOENING, Dean W. Ecological effects, transport, and fate of mercury: a general review. *Chemosphere.* 2000, 40(12), 1335-1351. DOI: 10.1016/S0045-6535(99)00283-0.
- [108] PACYNA, Elisabeth G., Jozef M. PACYNA, Frits STEENHUISEN a Simon WILSON. Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000. *Atmos Environ.* 2006, 40(22), 4048-4063. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.03.041.
- [109] ZUBKO, Maciej, Jan LOSKOT, Paweł ŚWIEC a Zbigniew JANIKOWSKI. Analysis of Stainless Steel and Waste Products Generated During Laser Cutting in Nitrogen Atmosphere. *J Mater Sci.* (v recenzním řízení)

- [110] MERCADER, R. C. et al. Characterization of scraps produced by the industrial laser cutting of steels. *Hyperfine Interact.* 2010, 195(1-3), 249–255. DOI: 10.1007/s10751-009-0126-2.
- [111] DE SOUZA, José et al. Analysis of Metallic Waste from Laser Cutting for Utilization in Parts Manufactured by Conventional Powder Metallurgy. *IJRES.* 2016, 4(11), 1-5.
- [112] ELIHN, Karine a Peter BERG. Ultrafine Particle Characteristics in Seven Industrial Plants. *Ann. Occup. Hyg.* 2009, 53(5), 475–484. DOI: 10.1093/annhyg/mep033.

13 Konference a publikační činnost

V této kapitole je uveden přehled konferencí, kterých se autor v rámci svého postgraduálního studia aktivně účastnil, a autorovy publikační činnosti k datu 19. 4. 2019.

13.1 Aktivní účast na konferencích

Konference **ERIN 2019 (Education - Research - Innovation)**, Blansko (ČR), 9. - 11. 4. 2019, téma příspěvku: *Analyses of Waste Products Obtained by Laser Cutting of AW-3103 Aluminium Alloy* (ústní vystoupení).

Konference **Renewable Energy Sources - Theory and Practice**, Opole (Polsko), 22. - 23. 11. 2017, téma příspěvku: *Modelling of Biogas Production* (ústní vystoupení).

Konference **MED'17 (Metrologia - Ekologia - Dydaktyka)**, Piechowice (Polsko), 15. - 17. 6. 2017, téma příspěvku: *Application of Mathematical Models in Biogas Production Predictions and in Related Education* (ústní vystoupení).

Konference **International Workshop for Young Scientists BioPhys Spring**, Lublin (Polsko), 1. - 3. 6. 2017, téma příspěvku: *Predictive Models of Biogas Production from Agricultural Waste* (ústní vystoupení).

Konference **Central European Conference ECOpole'16**, Zakopane (Polsko), 5. - 8. 10. 2016, téma příspěvku: *Modeling and Biomonitoring of Mercury Emissions from Large Solid Fuel Combustion in the Czech-Polish Border Region* (posterové sdělení).

Konference **MED'16 (Metrologia - Ekologia - Dydaktyka)**, Bělá pod Pradědem (ČR), 26. - 28. 6. 2016, téma příspěvku: *Raman Microspectroscopy, New Trends in the Biophysical Research, Environmental Protection and Science Education* (ústní vystoupení).

13.2 Publikační činnost

ZUBKO, Maciej, Jan LOSKOT, Paweł ŚWIEC a Zbigniew JANIKOWSKI. Analysis of Stainless Steel and Waste Products Generated During Laser Cutting in Nitrogen Atmosphere. *J Mater Sci.* (odesláno do recenzního řízení)

LOSKOT, Jan. Měření a modelování rozptylu emisí pachových látek ze zemědělských bioplynových stanic (kapitola do připravované učebnice environmentálních měření a modelování, odesláno k publikaci)

LOSKOT, Jan. Innovative Educational Course II: Modelling of Odour Dispersion from Agricultural Biogas Plants. *Chem Didact Ecol Metrol.* 2017, 22(1-2), 135-150. DOI: 10.1515/cdem-2017-0008.

LOSKOT, Jan, Marek SMOLÍK et al.: Innovative Educational Program for Biogas Production Carried Out at University of Hradec Králové (CZ) and at University of Opole (PL). *Chem Didact Ecol Metrol.* 2016, 21(1-2), 57-70. DOI: 10.1515/cdem-2016-0005.

KŘÍŽ, Jan, Jan LOSKOT et al.: Modelling of Mercury Emissions from Large Solid Fuel Combustion and Biomonitoring in CZ-PL Border Region. *Ecol Chem Eng S.* 2016, 23(4), 593-604. DOI: 10.1515/eces-2016-0042.

LOSKOT, Jan. Aplikace mikrokontrolérů při výuce informatiky. *Media4u Magazine.* 2013, 10(X1), 40-43. ISSN: 1214-9187.

Příloha A

Návody k laboratorním úlohám z Ramanovy spektroskopie

Úloha 1: Kalibrace spektrometru, základní vlastnosti Ramanova spektra

Témata:

- automatická kalibrace spektrometru
- pozorování Rayleighova a Stokesova rozptylu
- studium vlivu změny výkonu laseru, použité difrakční mřížky, velikosti štěrbiny (slit) a clony (hole), doby měření a počtu akumulací na měřené spektrum

Pomůcky: kalibrační křemíková destička

Postup:

1. Zapojíme do zásuvky chladič detektoru rozptýleného záření.
2. Zapneme sestavu spektrometru, tj. řídicí počítač, hlavní řídicí modul pro spektrometr, zdroj energie pro laser a modul pro ovládání polohovacího stolku (tzv. stage).
3. Kolečkem uvnitř vzorkové komory nastavíme polohovací stolek do dolní polohy a zkontrolujeme, že na něm není umístěn žádný vzorek. Pokud tam nějaký vzorek je, vyjmeme jej a uklidíme. Nastavíme objektiv „10x“ do pracovní polohy.
4. Spustíme software LabSpec 6 (ikonou na ploše počítače). Necháme proběhnout automatické nastavení polohy polohovacího stolku.
5. Počkáme, dokud není detektor rozptýleného záření vychlazený na pracovní teplotu (vychlazení detektoru je signalizováno zeleným podbarvením tlačítka „**Detector**“ na dolní liště v LabSpec 6). Proč je potřeba chladit detektor?
6. Na polohovací stolek umístíme kalibrační křemíkovou destičku.
7. V softwaru LabSpec 6 zapneme kameru pro snímání optického obrazu vzorku (tlačítkem „**Start video acquisition**“ na horní liště). Joystickem nastavíme horizontální polohu stolku tak, aby shora dopadající světelný parsek dopadal na křemíkovou destičku.
8. Pomalu zvedáme stolek tak dlouho, dokud na monitoru nevidíme zaostřený obraz vzorku.
9. Joystickem doostříme obraz vzorku. Při doostřování si můžeme pomoci zapnutím laserového paprsku (tlačítkem „**Laser Off/On**“ na dolní liště v LabSpec 6) a hledáním nejmenšího průměru světelného obrazce vytvářeného na vzorku tímto paprskem.
10. V softwaru LabSpec 6 v záložce *Acquisition* nastavíme polohu spektrografu (**Spectro**) na 650 cm^{-1} a dobu měření v „reálném čase“ (**RTD time**) na 1 s, zvolíme difrakční mřížku (**Grating**) 1200 (tj. mřížku s 1200 vrypy na milimetr), nastavíme výkon laseru (**Filter**) na 100 %, průměr štěrbiny (**Slit**) na $100\text{ }\mu\text{m}$ a průměr clony (**Hole**) na $100\text{ }\mu\text{m}$.
11. Spustíme měření v „reálném čase“ (tlačítkem „**Start RTD**“ na horní liště). Pozorujeme měřené Stokesovo spektrum, pomocí joysticku můžeme zkusit ještě doostřit (lepší doostření poznáme zvýšením intenzity peaků ve spektru).
12. Zastavíme měření (tlačítkem „**Stop ALL**“ na horní liště).

13. Spustíme a necháme proběhnout automatickou kalibraci spektrometru (tlačítko „**AC**“ na dolní liště v LabSpec 6).
14. V záložce *Acquisition* nastavíme spektrální rozsah (**Range**) od 20 do 1100 cm^{-1} , dobu měření (**Acquisition time**) na 2 s a počet akumulací (**Accumulation**) na 2.
15. Spustíme sběr dat (tlačítkem „**Start spectrum acquisition**“ na horní liště) a necháme jej proběhnout.
16. Obdobným způsobem provedeme další měření s parametry uvedenými v následující tabulce (každý řádek tabulky odpovídá jednomu sběru dat, měření č. 1 je již provedeno).

Číslo měření	Range [cm^{-1}]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
1	20 - 1100	2	2	1200	100	100	100
2	20 - 1100	2	2	1200	50	100	100
3	20 - 1100	2	2	1200	25	100	100
4	20 - 1100	2	2	1200	10	100	100
5	20 - 1100	2	2	1200	1	100	100
6	20 - 1100	2	2	1200	0,1	100	100
7	20 - 1100	2	2	600	100	100	100
8	20 - 1100	2	2	1800	100	100	100
9	850 – 1100	2	2	1200	100	100	100
10	850 – 1100	10	2	1200	100	100	100
11	850 - 1100	30	2	1200	100	100	100
12	850 - 1100	2	10	1200	100	100	100
13	20 - 1100	2	2	1200	100	50	100
14	20 - 1100	2	2	1200	100	200	100
15	20 - 1100	2	2	1200	25	100	300
16	20 - 1100	2	2	1200	25	100	500

Porovnáme takto získaná spektra a diskutujeme, jaký vliv mají jednotlivé parametry měření na Ramanovo spektrum.

17. Nastavíme spektrální rozsah (**Range**) od -1500 do 1000 cm^{-1} , dobu měření (**Acquisition time**) na 4 s a počet akumulací (**Accumulation**) na 4. Zvolíme difrakční mřížku (**Grating**) 1200, nastavíme výkon laseru (**Filter**) na 25 %, průměr štěrbinu (**Slit**) na 100 μm a průměr clony (**Hole**) na 100 μm . Provedeme sběr dat.
18. Diskutujeme získané spektrum. Na čem závisí změřená intenzita Rayleighova rozptylu? Proč nejsou vidět peaky v anti-Stokesově spektru?

Ukončování práce s Ramanovým spektrometrem:

1. Zapneme ohřev detektoru na okolní teplotu (stisknutím tlačítka „**Detector**“ na dolní liště v LabSpec 6 a volbou „**Warm to ambient temperature**“).
2. Nastavíme objektiv „10x“ do pracovní polohy.
3. Kolečkem uvnitř vzorkové komory nastavíme polohovací stolek do dolní polohy.
4. Vyjmeme vzorek z polohovacího stolku.
5. Zavřeme dvířka vzorkové komory, uklidíme vzorek.
6. Počkáme, dokud není detektor ohřátý na okolní teplotu (ohřátí detektoru je signalizováno oranžovým podbarvením tlačítka „**Detector**“ na dolní liště v LabSpec 6).
7. Vypojíme ze zásuvky chladič detektoru.
8. Vypneme software LabSpec 6 (křížkem v pravém horním rohu).
9. Vypneme sestavu spektrometru, tj. řídicí počítač, zdroj energie pro laser, hlavní řídicí modul pro spektrometr a modul pro ovládání polohovacího stolku.

Úloha 2: Vliv struktury a prvkového složení materiálu na Ramanovo spektrum

Témata:

- porovnávání spekter různých forem uhlíku
- porovnávání spekter amorfni a krystalické formy oxidu křemičitého
- porovnávání spekter látek, které mají stejný typ krystalové mřížky, avšak jsou tvořeny odlišnými chemickými prvky
- porovnávání spekter materiálů, které na pohled vypadají stejně, ale liší se strukturou i chemickým složením

Pomůcky: pinzeta, podložní sklíčko, plastelína, diamant, grafit, podložní sklíčko s nalepenou uhlíkovou páskou, tableta živočišného uhlí, krystal křemene, kalibrační křemíková destička, krystal Swarovski

Postup:

A. Porovnávání spekter různých forem uhlíku

1. Připravíme spektrometr pro měření (postupem podle bodů 1 až 5 v návodu k úloze 1).
2. Na podložní sklíčko pomocí plastelíny přichytíme diamant, takto připravený vzorek umístíme na polohovací stůl spektrometru.
3. Zaostríme na vzorek (analogicky postupu popsanému v bodech 7 až 12 v návodu k úloze 1, tentokrát nastavíme polohu spektrografu ([Spectro](#)) na 1200 cm^{-1}).
4. Nastavíme parametry sběru dat:

Range [cm^{-1}]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
20 - 3500	5	2	1200	100	100	100

5. Spustíme sběr dat s nastavenými parametry, po dokončení měření vyjmeme a uklidíme vzorek.
6. Na podložní sklíčko položíme vzorek grafitu a umístíme jej na polohovací stůl.
7. Zaostríme na vzorek (analogicky postupu popsanému v bodech 7 až 12 v návodu k úloze 1, tentokrát nastavíme polohu spektrografu ([Spectro](#)) na 1500 cm^{-1}).
8. Nastavíme parametry sběru dat:

Range [cm^{-1}]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
20 - 3500	60	2	1200	100	100	300

9. Spustíme sběr dat s nastavenými parametry, po dokončení měření vyjmeme a uklidíme vzorek.
10. Na polohovací stůl umístíme podložní sklíčko s nalepenou uhlíkovou páskou.
11. Zaostríme na vzorek (analogicky postupu popsanému v bodech 7 až 12 v návodu k úloze 1, tentokrát nastavíme polohu spektrografu ([Spectro](#)) na 1500 cm^{-1}).
12. Nastavíme parametry sběru dat:

Range [cm^{-1}]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
800 - 2300	60	2	1200	10	100	500

13. Spustíme sběr dat s nastavenými parametry, po dokončení měření vyjmeme a uklidíme vzorek.
14. Na podložní sklíčko položíme tabletu živočišného uhlí a umístíme jej na polohovací stůl.
15. Zaostríme na vzorek (analogicky postupu popsanému v bodech 7 až 12 v návodu k úloze 1, tentokrát nastavíme polohu spektrografu ([Spectro](#)) na 1500 cm^{-1}).
16. Nastavíme parametry sběru dat:

Range [cm^{-1}]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
20 - 3500	30	2	1200	10	100	500

17. Spustíme sběr dat s nastavenými parametry, po dokončení měření vyjmeme a uklidíme vzorek.
18. Porovnáme všechna naměřená spektra a diskutujeme rozdíly mezi nimi.

B. Porovnávání spekter amorfni a krystalické formy oxidu křemičitého

1. Na polohovací stůl umístíme samotné podložní sklíčko a změříme jeho spektrum při těchto parametrech sběru dat:

Range [cm^{-1}]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
20 - 3500	10	2	1200	100	100	300

2. Na podložní sklíčko pomocí plastelíny přichytíme krystal křemene, takto připravený vzorek umístíme na polohovací stůl.

3. Změříme spektrum křemene při těchto parametrech sběru dat:

Range [cm ⁻¹]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
20 - 3500	20	2	1200	100	100	500

4. Porovnáme naměřená spektra a diskutujeme rozdíly mezi nimi.

C. Porovnávání spekter látek, které mají stejný typ krystalové mřížky, avšak jsou tvořeny odlišnými chemickými prvky

1. Změříme spektrum kalibrační křemíkové destičky při těchto parametrech sběru dat:

Range [cm ⁻¹]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
20 - 3500	2	2	1200	100	100	100

2. Porovnáme toto spektrum se spektrem diamantu, změřeným v části A této úlohy. Diskutujeme rozdíly mezi těmito spektry.

D. Porovnávání spekter materiálů, které na pohled vypadají stejně, ale liší se strukturou i chemickým složením

1. Na podložní skříčko pomocí plastelíny přichytíme krystal Swarovski, takto připravený vzorek umístíme na polohovací stůlek.
2. Změříme spektrum krystalu Swarovski při těchto parametrech sběru dat:

Range [cm ⁻¹]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
20 - 3500	5	3	1200	100	100	100

3. Porovnáme toto spektrum se spektrem diamantu, změřeným v části A této úlohy. Diskutujeme rozdíly mezi těmito spektry.
4. Ukončíme práci s Ramanovým spektrometrem podle postupu uvedeného v úloze 1.
5. Uklidíme všechny pomůcky, které jsme používali.

Úloha 3: Práce s databází Ramanových spekter, Ramanovské mapování:

Témata:

- identifikace krystalů
- analýza průmyslových materiálů
- analýza přírodního materiálu
- mapování distribuce látek v tabletě léčiva

Pomůcky: pinzeta, podložní sklíčko, podložka s pěti krystaly, keramický střep, kovová mince, plast z víčka lahve, plast z hrdla lahve, dřívko, tableta léku Ataralgin

Postup:

A. Identifikace krystalů

1. Připravíme spektrometr pro měření (postupem podle bodů 1 až 5 v návodu k úloze 1).
2. Na podložní sklíčko položíme podložku s pěti krystaly a umístíme jej na polohovací stolec.
3. Změříme spektrum krystalu č. 1 při těchto parametrech sběru dat:

Range [cm ⁻¹]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
20 - 2300	20	2	1200	100	100	500

4. Otevřeme databázi Ramanových spekter (tlačítkem „**KnowItAll data link**“ na horní liště v LabSpec 6).
5. V databázi necháme vyhledat návrhy, o jaký materiál by se mohlo jednat (vyhledávání se spustí automaticky po otevření databáze). Porovnáním spekter navržených materiálů s naším naměřeným spektrem odhadneme, o jaký krystal se pravděpodobně jedná. Odhad zkonzultujeme s vyučujícím.
6. Změříme spektra ostatních krystalů (můžeme ponechat stejné parametry sběru dat, jaké jsme použili pro krystal č. 1) a pomocí databáze se opět pokusíme určit, o jaké krystaly se jedná. Podle pokynů vyučujícího vyzkoušíme různé způsoby korekce naměřeného spektra i různé přístupy k porovnávání spekter. Diskutujeme o tom, na co je potřeba při interpretaci spekter dávat pozor.

B. Analýza průmyslových materiálů

1. Změříme spektrum samotného podložního sklíčka při těchto parametrech sběru dat:

Range [cm ⁻¹]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
20 - 3700	10	2	1200	100	100	300

2. Změříme spektrum keramického střepu. Při volbě parametrů sběru dat vyjdeme ze současného nastavení a pokusíme se parametry upravit tak, abychom dosáhli lepší kvality spektra.
3. Porovnáme tato dvě změřená spektra a pomocí databáze se pokusíme zjistit složení těchto materiálů.
4. Změříme spektrum kovové mince. Při volbě parametrů sběru dat vyjdeme ze současného nastavení a pokusíme se parametry upravit tak, abychom dosáhli lepší kvality spektra.
5. Diskutujeme změřené spektrum. Čím je způsoben jeho zvláštní tvar a co můžeme říct o měření Ramanových spekter kovových materiálů?
6. Změříme spektrum plastu z víčka lahve při těchto parametrech sběru dat:

Range [cm ⁻¹]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
200 - 3200	40	3	1200	100	100	500

7. Změříme spektrum plastu z hrdla lahve. Při volbě parametrů sběru dat vyjdeme ze současného nastavení; můžeme se pokusit upravit parametry tak, abychom dosáhli lepší kvality spektra.
8. Porovnáme tato dvě změřená spektra a pomocí databáze se pokusíme zjistit složení těchto materiálů. Čím mohou být způsobeny rozdíly mezi těmito spektry?

C. Analýza přírodního materiálu

1. Změříme spektrum dřívka při těchto parametrech sběru dat:

Range [cm ⁻¹]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
200 - 3200	20	2	1200	50	100	500

2. Pomocí databáze se pokusíme zjistit složení tohoto materiálu.
3. Porovnáme toto spektrum se spektry plastů z lahve. Co má dřevo z hlediska složení společného s plastem?

D. Mapování distribuce látek v tabletě léčiva

1. Na podložní sklíčko položíme tabletu léku Ataralgin a umístíme jej na polohovací stolek.
2. Zapneme kameru pro snímání optického obrazu vzorku. Joystickem nastavíme horizontální polohu stolku tak, aby shora dopadající světelný parsek dopadal přibližně na střed tablety.
3. Nastavíme tyto parametry sběru dat:

Range [cm ⁻¹]	Acq. time [s]	Accumulation	Grating	Filter [%]	Slit [μm]	Hole [μm]
100 - 1800	2	2	1200	100	100	500

4. Zaostříme na vzorek.
5. V oddíle Map v záložce *Acquisition* nastavíme rozsah oblasti mapování a rozestupy bodů pro sběr dat podle následujícího obrázku:

	From	To	Size	Step	
H	100 μm	500 μm	3	...	<input type="checkbox"/>
Z	-5.00	5.00	11	1.0	<input type="checkbox"/>
Y	-30.00	30.00	7	10.0	<input checked="" type="checkbox"/>
X	-25.00	25.00	6	10.0	<input checked="" type="checkbox"/>

6. Spustíme mapování tlačítkem „**Start map acquisition**“. V průběhu mapování označíme v okně se spektry peaky charakteristické pro jednotlivé účinné látky:

Paracetamol (Acetaminofen): 1600 – 1665 cm⁻¹
(označíme modrým rámečkem)

Guaifenesin (Guaiacol glyceryl ether): 1050 – 1070 cm⁻¹
(označíme červeným rámečkem)

Kofein (Caffeine): 1690 – 1710 cm⁻¹
(označíme zeleným rámečkem)

a sledujeme mapy distribuce těchto látek na povrchu tablety.

7. Počkáme, dokud není mapování dokončeno (případně můžeme mapování předčasně ukončit tlačítkem „**Stop ALL**“ na horní liště).
8. Otevřeme soubor **PainKiller.l6m**, v němž jsou uloženy podrobnější spektrální mapy tablety Ataralginu. Zobrazíme každou z uložených tří map zvlášť i všechny tyto mapy dohromady v jednom obrázku (tj. překryv map – tzv. overlay) a prohlédneme si prostorové rozložení jednotlivých účinných látek na povrchu tablety.

9. V „overlay“ mapě vybereme nějaký bod z modré oblasti. Zobrazíme jemu příslušné spektrum a v databázi Ramanových spekter ověříme složení tablety v tomto místě.
10. Obdobným způsobem ověříme složení tablety v červených a zelených oblastech mapy.
11. Ukončíme práci s Ramanovým spektrometrem podle postupu uvedeného v úloze 1.
12. Uklidíme všechny pomůcky, které jsme používali.

Příloha B

Dotazník pro studenty a absolventy oboru FTMB

**Dotazník pro studenty bakalářského studijního oboru „Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika“
na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové**

Vážená studentko, vážený studente,

na naší fakultě se připravují změny bakalářského oboru „Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika“ s cílem upravit učební plány a celkovou koncepci tohoto oboru tak, aby byla zvýšena jeho atraktivita pro potenciální zájemce o studium, zkvalitněna výuka a zlepšeny možnosti uplatnění absolventů. Proto Vás chceme požádat o vyplnění tohoto dotazníku, v němž budeme zjišťovat Vaše názory na současný bakalářský studijní obor „Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika“, v němž studujete. Vaše odpovědi budou představovat důležitou zpětnou vazbu k tomuto oboru, která nám napoví, na co se máme zaměřit při jeho inovaci.

U každé otázky je uvedeno, zda máte vybrat jednu nebo více odpovědí, případně zda máte uvést slovní odpověď. Žádáme Vás o upřímné odpovědi, dotazník je anonymní a nebudeme z něj vyvozovat žádné závěry pro Vaši osobu.

Základní údaje o Vaší osobě:

Věk:

Pohlaví (M/Ž):

Kraj, ze kterého pocházím:

Ročník studia (vyberte správnou možnost): 1. 2. 3. již jsem absolvent

Forma studia (vyberte správnou možnost): prezenční kombinovaná

Středoškolské vzdělání jsem získal/a na (vyberte správnou možnost):

gymnázium

střední průmyslové škole (uved'te obor):

jiné škole (uved'te typ školy a obor):

Otázky:

1. Proč jste se rozhodl/a nastoupit na obor „Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika“? (Můžete zvolit více možností.)
 - a) Líbily se mi učební plány tohoto oboru.
 - b) Domníval/a jsem se, že po absolvování tohoto oboru budu mít dobré možnosti uplatnění.
 - c) Můj zaměstnavatel po mně požadoval vysokoškolské vzdělání nebo by vysokoškolské vzdělání zlepšilo moje postavení v mém zaměstnání.
 - d) Nebyl/a jsem přijat/a na jinou školu, tak jsem nastoupil/a sem, abych získal/a vysokoškolské vzdělání.
 - e) Neúspěšně jsem studoval/a jinou školu, tak jsem nastoupil/a sem, abych získal/a vysokoškolské vzdělání.
 - f) Chtěl/a jsem studovat v Hradci Králové.
 - g) Jiný důvod (uved'te):

Nyní následuje několik otázek ke konkrétním vyučovacím předmětům. Pokud jste na nějaký z uvedených předmětů ještě nechodil/a, otázky týkající se tohoto předmětu přeškrtněte.

Předmět Přístrojová technika 1:

10. Jak hodnotíte užitečnost předmětu **Přístrojová technika 1** z hlediska možnosti uplatnění v praxi? (Na číselné škále vyberte jedno z čísel 1 - 10, čím vyšší číslo, tím lepší uplatnitelnost.)

Zcela neužitečný 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Velmi užitečný

11. Jaký máte zájem, aby v předmětu **Přístrojová technika 1** byla zařazena praktická výuka doplňující probíranou teorii? (Zvolte jedinou možnost.)

- a) Nemám zájem o žádnou praktickou výuku.
- b) Mám zájem o občasné praktické ukázky probíraných přístrojů.
- c) Mám zájem o pravidelná laboratorní cvičení.
- d) Nevím/je mi to jedno.

12. Jakou změnu/jaké změny byste uvítal/a v předmětu **Přístrojová technika 1**? Např. jaká témata tam zařadit a jaká naopak vypustit? Odpověď napište slovy.

Předmět Monitorovací systémy ochrany prostředí a zdraví:

13. Jak hodnotíte užitečnost předmětu **Monitorovací systémy ochrany prostředí a zdraví** z hlediska možnosti uplatnění v praxi? (Na číselné škále vyberte jedno z čísel 1 - 10, čím vyšší číslo, tím lepší uplatnitelnost.)

Zcela neužitečný 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Velmi užitečný

14. Jakou změnu/jaké změny byste uvítal/a v předmětu **Monitorovací systémy ochrany prostředí a zdraví**? Např. jaká témata tam zařadit a jaká naopak vypustit? Odpověď napište slovy.

Předmět Fyzikální biomonitring:

15. Jak hodnotíte užitečnost předmětu **Fyzikální biomonitring** z hlediska možnosti uplatnění v praxi? (Na číselné škále vyberte jedno z čísel 1 - 10, čím vyšší číslo, tím lepší uplatnitelnost.)

Zcela neužitečný 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Velmi užitečný

16. Jakou změnu/jaké změny byste uvítal/a v předmětu **Fyzikální biomonitoring**? Např. jaká témata tam zařadit a jaká naopak vypustit? Odpověď napište slovy.

17. Jaký máte zájem, aby v předmětu **Fyzikální biomonitoring** byla zařazena praktická výuka doplňující probíranou teorii? (Zvolte jedinou možnost.)

- a) Nemám zájem o žádnou praktickou výuku.
- b) Mám zájem o občasné praktické ukázky probíraných metod.
- c) Mám zájem o pravidelná laboratorní/terénní cvičení.
- d) Nevím/je mi to jedno.

18. Pokud chcete sdělit jakoukoli připomínku k oboru „Fyzikálně-technická měření a výpočetní technika“, napište ji zde:

Děkujeme Vám za vyplnění tohoto dotazníku.