



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**MĚŘENÍ VYBRANÝCH FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ
ODPADNÍCH VOD Z BIOPLYNOVÝCH STANIC**

MEASUREMENT OF SELECTED PHYSICAL PROPERTIES OF THE WASTE WATER FROM BIOGAS PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Ondruška

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. Ing. Marek Vondra, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Vojtěch Ondruška**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Mgr. Ing. Marek Vondra, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření vybraných fyzikálních vlastností odpadních vod z bioplynových stanic

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nakládání s odpadními vodami (tzv. digestátem) z bioplynových stanic je okleštěno množstvím legislativních požadavků, které omezují možnosti provozovatelů na několik málo řešení, která jsou finančně nákladná. Ke snížení nákladů by mohlo přispět odvodnění (separace vody, zmenšení objemu) těchto odpadních vod. Bakalářská práce zaměřená na zjištění vybraných fyzikálních vlastností digestátu bude využita při vývoji odvodňovací technologie, který na Ústavu procesního inženýrství v současné době probíhá. Výsledky práce tak budou mít praktické uplatnění.

Nabízené téma bakalářské práce je praktického, experimentálního charakteru. Práce je vhodná zejména pro studenty, kteří si chtějí osahat práci v laboratoři. Experimenty budou zaměřeny na měření vybraných fyzikálních vlastností (např. hustota, viskozita, měrná tepelná kapacita) odpadních vod z bioplynových stanic.

Cíle bakalářské práce:

1. Vypracování teoretického úvodu k problematice odpadních vod a jejich fyzikálních vlastností. Popis vybraných fyzikálních vlastností a představení základních způsobů jejich měření.
2. Plánování experimentu a popis použitých experimentálních metod.
3. Provedení a vyhodnocení experimentu. Srovnání naměřených vlastností odpadní vody s dostupnou literaturou.

Seznam doporučené literatury:

MEDEK, Jaroslav. Hydraulické pochody: [Určeno pro posl. fak. stroj. Vys. učení techn. v Brně]. 2. vyd. Brno: PC-DIR, 1994. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0563-5.

MEDEK, Jaroslav, Josef UHEREK a Miloš MOLÁČEK. Experimentální práce. Vyd. 2. nezm. Brno: Vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-21409-69-x.

VONDRA, Marek. Zařízení pro zahušťování odpadní vody z bioplynových stanic. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 138 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je měření fyzikálních a chemických vlastností odpadních vod z bioplynových stanic. Práce stručně popisuje odpadní vody a jejich vznik. Hlavní část je věnována přípravě experimentu a detailnímu popisu měření vybraných vlastností dostupnými laboratorními metodami. Naměřená data jsou v závěru zhodnocena a porovnána s literaturou. Výsledky této práce mohou být použity pro další vývoj zařízení pro zahušťování odpadní vody z bioplynových stanic nebo jinou vědeckou činnost v oblasti odpadního hospodářství v zemědělském sektoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bioplynová stanice, odpadní voda, digestát, fugát, destilát, podíl sušiny, hustota, měrná tepelná kapacita, viskozita, pH, konduktivita

ABSTRACT

The aim of this Bachelor's thesis is the experimental measurement of physical and chemical properties of the wastewater from biogas plants. Thesis concisely describes wastewater and its origin. The main part is dedicated to the design of experiments and to the detailed description of the measurement of selected properties with the available laboratory methods. Measured data are evaluated and compared to literature. The results of this thesis can be employed to further develop the equipment for thickening wastewater from biogas plants or to other scientific activity in the field of waste management in agriculture.

KEYWORDS

Biogas plant, wastewater, digestate, liquid digestate, distillate, total solids, density, specific heat capacity, viscosity, pH, conductivity

ONDRUŠKA, V. *Měření vybraných fyzikálních vlastností odpadních vod z bioplynových stanic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 86 s. Vedoucí bakalářské práce Mgr. Ing. Marek Vondra, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Měření vybraných fyzikálních vlastností odpadních vod z bioplynových stanic“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Mgr. Ing. Markovi Vondrovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a podnětné návrhy k práci. Dále bych rád poděkoval rodině za neutuchající podporu při studiu a paní Ing. Magdě Vičíkové za cenné rady v oblasti bioplynových stanic.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	9
1 Teoretický úvod	10
1.1 Bioplynová stanice	10
1.2 Odpadní voda z BPS	10
2 Plánování a příprava experimentu	13
2.1 BPS Bořetice	13
2.2 Odběr vzorku z BPS	14
2.3 Složení vstupního substrátu	16
2.4 Odběr vzorku pro zkušební laboratoř	18
2.5 Odběr a příprava vzorků pro vlastní měření	19
2.6 Destilace fugátu	22
2.6.1 Popis destilace	22
2.6.2 Destilace vzorků	22
2.6.3 Průběh destilace a destilační křivka	27
3 Vybrané fyzikální vlastnosti	31
3.1 Podíl sušiny	31
3.1.1 Popis fyzikální vlastnosti	31
3.1.2 Metody experimentálního měření	32
3.1.3 Provedení a vyhodnocení experimentu	33
3.2 Hustota (měrná hmotnost)	37
3.2.1 Popis fyzikální vlastnosti	37
3.2.2 Metody experimentálního měření	37
3.2.3 Provedení a vyhodnocení experimentu	39
3.3 Měrná tepelná kapacita	45
3.3.1 Popis fyzikální vlastnosti	45
3.3.2 Metody experimentálního měření	45
3.3.3 Provedení a vyhodnocení experimentu	46
3.4 Dynamická viskozita	52
3.4.1 Popis fyzikální vlastnosti	52
3.4.2 Metody experimentálního měření	55
3.4.3 Provedení a vyhodnocení experimentu	56
3.5 Měrná elektrická vodivost	64
3.6 pH	67
4 Závěr	69

Seznam použitých zdrojů	71
Seznam symbolů, veličin a zkratk	73
Seznam příloh	76
A Příloha A: Protokol o zkoušce	77
B Příloha B: Průběh destilace	80
C Příloha C: Destilační křivky	81
D Příloha D: Naměřené hodnoty, podíl sušiny (TS)	83
E Příloha E: Naměřené hodnoty, hustota (ρ)	84
F Příloha F: Naměřené hodnoty, měrná tepelná kapacita (c)	85
G Příloha G: Okolní podmínky měření	86

ÚVOD

Bioplynové stanice (BPS) patří mezi obnovitelné zdroje energie, které v ČR zažily prudký nárůst popularity v období mezi lety 2007–2012 díky dotacím na jejich výstavbu a garanci ceny odebírané energie [1]. Od té doby počet nově postavených BPS stagnoval, vývoj nových technologií do BPS je však stále aktuální téma zejména díky přísnějším regulacím, které zemědělci musí splňovat pro pokračování v provozu [2].

Podstatnou zátěží jak pro životní prostředí, tak finanční, je vyvážení fermentačních zbytků (digestátu) z BPS na pole za účelem hnojení. Je proto velice žádoucí objem těchto zbytků co nejvíce regulovat při zachování množství obsažených živin [2]. Tento problém řeší zařízení pro zahušťování odpadních vod z BPS vyvíjené na Ústavu procesního inženýrství FSI VUT v Brně. Zahušťování je založeno na principu vakuového odpařování kapalné složky digestátu a jeho kondenzaci mimo původní objem ve formě destilátu [2].

Při návrhu takového procesu je nezbytné znát základní fyzikální a některé chemické vlastnosti digestátu. Jedná se především o podíl sušiny, hustotu, měrnou tepelnou kapacitu, dynamickou viskozitu, konduktivitu a pH. Všechny tyto vlastnosti (a některé další) mají přímý vliv na funkčnost, efektivitu a aplikovatelnost vyvíjeného zařízení a jsou proto předmětem zkoumání této bakalářské práce (BP). Vzhledem k tomu, že je digestát komplikovaná směs velkého množství látek, nejsou jeho fyzikální vlastnosti tabelovány a musí se stanovit měřením.

Jelikož je známa konkrétní aplikace naměřených dat, je vhodné měření vzorek odpadní vody co nejvíce uzpůsobit reálnému provozu. Reálné zahušťovací zařízení by mělo být na BPS umístěno za separátorem pevných částic digestátu, na jehož výstupu vzniká odpadní voda zvaná fugát [2]. Právě tato směs vody s organickými a anorganickými látkami bude předmětem zkoumání této práce. Pro ještě větší autenticitu měření jsou pak jednotlivé vzorky připraveny podobným mechanismem, jakým dochází k zahušťování fugátu v odparce. Specifické zacházení se vzorky fugátu nevylučuje použití naměřených hodnot i pro jiné účely týkající se odpadních vod z BPS.

Práce se svým obsahem a zpracováním řadí na pomezí oborů strojního a chemického inženýrství s aplikačním přesahem do zemědělství a environmentálních věd. Charakter práce je zejména experimentální, v teoretické části pak stručně popisuje základní principy vzniku odpadních vod na konkrétním příkladu BPS. Následuje podrobný popis přípravy experimentu, zmíněny jsou taktéž faktory, které vlastnosti fugátu ovlivňují. Cílem práce je pak samotné měření fyzikálních vlastností a vyhodnocení naměřených dat včetně porovnání s literaturou. Měření je podloženo teoretickými definičními vztahy a popisem základních experimentálních metod.

1 TEORETICKÝ ÚVOD

Pro správné pochopení následujících kapitol, které jsou jádrem této bakalářské práce (BP), je nutné nejprve stručně definovat několik základních pojmů spojených s problematikou odpadních vod z bioplynových stanic (BPS). Tato kapitola vyzdvihuje pouze ty nejzákladnější pojmy, které budou dále rozebrány v kapitole 2 při popisu přípravy experimentu a odběru vzorků. Cílem není informovat o celkové problematice BPS, naopak větší míra pozornosti je věnována popisu základních principů vzniku odpadních vod a faktorů ovlivňujících jejich vlastnosti na konkrétním příkladu BPS Bořetice v kapitole 2. Podrobnější popis jednotlivých technologických celků BPS a procesů v nich probíhajících je uveden například v literatuře [3] a [4].

1.1 Bioplynová stanice

Bioplynová stanice je zařízení, které zpracováním biomasy vyrábí elektrickou a tepelnou energii při využití procesu anaerobní digesce. Anaerobní digestce je fermentační proces, který probíhá bez přístupu vzduchu v tzv. fermentoru, který je možné vidět na Obr. 1.1. Fermentor (Obr. 1.1 pozice 2) je nádoba obsahující biomasu (organický materiál), ve kterém probíhá výše zmíněný fermentační proces za pomoci metanových bakterií, které tuto organickou hmotu rozkládají [3]. Při rozkladu vzniká bioplyn, který je jímán v plynojemu (Obr. 1.1 pozice 1). Tento plyn obsahuje přibližně dvě třetiny metanu (CH_4), třetinu oxidu uhličitého (CO_2) a další plyny ve stopovém množství jako je sulfan (H_2S) nebo amoniak (NH_3) [2]. Bioplyn je po vyčištění spalován v kogenerační jednotce, která vyrábí elektrickou a tepelnou energii. Tepelné energie vzniká přebytek a využívá se pro ohřívání fermentorů, sušení, vytápění a pro další využití [3].

1.2 Odpadní voda z BPS

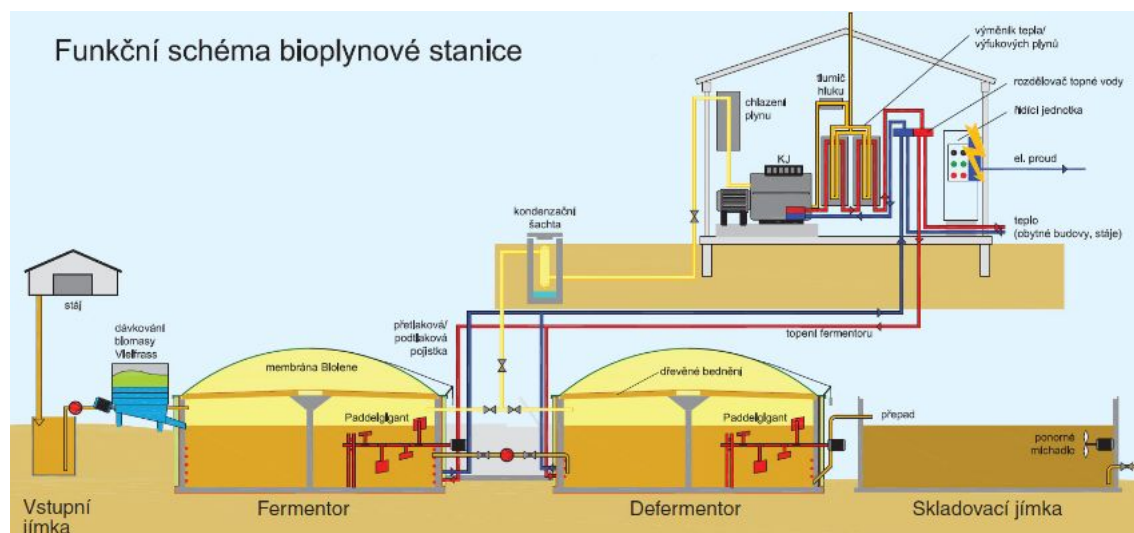
Aby mohla bioplynová stanice správně fungovat, musí být zajištěn plynulý tok materiálu a energie celým zařízením. Funkční schéma bioplynové stanice využívající mokré fermentace [3] je na Obr. 1.2. Toto schéma odpovídá konstrukci bioplynové stanice v Bořeticích postavené firmou agriKomp Bohemia s.r.o., ze které byl odebrán vzorek odpadní vody pro experimentální část této práce.

Celý proces je přehledně popsán na Obr. 1.2 a začíná dávkováním biomasy do fermentoru ze vstupní jímky. Tuto biomasu nazýváme substrát nebo ekvivalentně vstupní surovina. Substrát je ve fermentoru promícháván pro lepší průběh fermentačního procesu [3] a zabránění tvorby usazenin na dně. Substrát je průběžně



Obr. 1.1: Fermentor BPS, horní část fermentoru jímá bioplyn (1), který je tvořen anaerobní digescí ve spodní nádrži (2)

přečerpáván do sekundárního fermentoru neboli dofermentoru, kde probíhá tvorba bioplynu již v menší míře. Po ukončení fermentačního procesu nebo jeho výrazném zpomalení zůstává v dofermentoru určitá část substrátu, která se dále nerozkládá [3]. Tuto hmotu nazýváme digestát. Digestát je následně přečerpán z dofermentoru do skladovací jímky odkud je ve vymezeném období rozvážen na pole jako hnojivo [3]. Čím dál častěji se mezi dofermentor a skladovací jímku BPS přidává zařízení zvané separátor. Toto zařízení odseparuje pevné částice digestátu lisováním a dá vzniknout cennému organickému materiálu zvanému separát. Kapalná složka digestátu prosta separátu se nazývá fugát. Tato kapalina bude dále předmětem zkoumání této práce. Podrobnější popis fugátu a jeho vzniku včetně názorných obrázků je v kapitole 2.



Obr. 1.2: Schéma BPS [5]

2 PLÁNOVÁNÍ A PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

Důležitou součástí každého experimentu je příprava a plánování, díky nimž je samotné provedení experimentu pouze vykonání předem promyšlených kroků. Následující kapitoly popisují jednotlivé fáze přípravy experimentu od popisu místa odběru vzorku a vlivů s ním spojených, přes samotné odběry vzorku pro účely měření, po přípravu vzorků do stavu použitelného pro účely experimentu. Zejména se jedná o popis destilace, jakožto metody regulace podílu sušiny v jednotlivých vzorcích fugátu. Popis experimentálních metod pro měření konkrétních veličin je pro soudržnost textu uveden v kapitole 3.

2.1 BPS Bořetice

Odběr vzorku fugátu byl proveden na BPS Bořetice, která se nachází v okrese Břeclav v Jihomoravském kraji. Jedná se o zemědělskou BPS s instalovaným elektrickým výkonem $P_{el} = 750 \text{ kW}_{el}$ a instalovaným tepelným výkonem $P_{th} = 696 \text{ kW}_{th}$ [6]. Elektrická i tepelná energie je vyráběna ve strojovně s třemi kogeneračními jednotkami KJ Schnell, každá o výkonu 250 kW, spalováním bioplynu, který se tvoří v jednom fermentoru a jednom dofermentoru [7]. Fermentor, dofermentor a skladovací jímka jsou uspořádány do trojúhelníku, jak je možné vidět na Obr. 2.1. Ve středu mezi reaktory se nachází tzv. mezišachta, což je malá strojovna pro přečerpávání digestátu.

Koncový sklad se zkoumaným fugátem je nezastřešený (viz Obr. 2.2), tudíž zbytkový bioplyn uniká do ovzduší. Takto způsobené ztráty se pohybují v rozmezí 16–23 m³ bioplynu z jedné tuny materiálu [7], což odpovídá zhruba 10 % tvorby bioplynu ve fermentoru z jedné tuny substrátu. Toto množství závisí především na kvalitě již proběhlého fermentačního procesu. Pokud metanogeneze proběhne úplně, potenciál digestátu tvořit bioplyn je na výstupu z dofermentoru již téměř vyčerpán a hodnoty výtěžnosti bioplynu z fugátu mohou klesnout až na 5 m³ z jedné tuny materiálu [7]. V takovém případě je rentabilita zastřešení skladovací jímky nízká. Při standardních hodnotách se ovšem jedná o další znatelné zefektivnění BPS.

Další prostor pro zvýšení efektivity BPS spočívá v teple, které uniká z ohřátého fugátu do okolí bez dalšího využití. Výpočty úniku tepla jsou jednou z variant uplatnění výsledků této experimentální práce. Konkrétní využití má měrná tepelná kapacita a hustota fugátu. Potenciálně využitelné teplo závisí taktéž na objemu dofermentoru, ze kterého je digestát přečerpáván do skladovací jímky a vychází z kalorimetrické rovnice 2.1.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.1)$$



Obr. 2.1: Fermentor (1), dofermentor (2) a skladovací jímka (3) bioplynové stanice Bořetice

V případě BPS Bořetice je objem dofermentoru 2500 m^3 , jímka je naplněna fugátem o hustotě $1067,11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a měrné tepelné kapacitě $3872,11 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Tepelný potenciál skladovaného fugátu při ochlazení ze $45 \text{ }^\circ\text{C}$ na $20 \text{ }^\circ\text{C}$ pak činí až 258 GJ neboli 72 MWh . Takové množství tepla odpovídá zhruba 13ti denní produkci tepla jedné kogenerační jednotky.

2.2 Odběr vzorku z BPS

Pro relevantní měření fyzikálních vlastností odpadní vody z BPS je nutné nejprve zajistit odběr kvalitního vzorku. Vzorek z BPS je možné odebrat v několika fázích procesu. Na vstupu do fermentoru se jedná o substrát (směs vstupních surovin v předem daném poměru). Druhé místo odběru se nachází za fermentorem, vzorek je odebrán při přečerpávání částečně vyčerpaného digestátu do dofermentoru. Při přečerpávání již vyčerpaného digestátu z dofermentoru do skladovací jímky se nachází třetí možné místo odběru, a to buď po nebo před separací tuhých částí [7]. Jelikož vyvíjená jednotka pro zahušťování digestátu má být umístěna právě za separátorem, je předmětem zkoumání odpadní voda vzniklá po separaci [2]. Základní



Obr. 2.2: Nezastřešená skladovací jímka se zkoumaným fugátem BPS Bořetice

funkce separátoru je patrná z Obr. 2.3. Separát vzniklý lisováním (Obr. 2.3a) odpadáva ze separátoru na vybetonovanou plochu (Obr. 2.3b), odkud je průběžně odvážen do silážního žlabu a následně na pole. Na druhém výstupu ze separátoru vzniká kapalná frakce digestátu – fugát, který je přečerpán (Obr. 2.4) a uskladněn ve skladovací jímce (Obr. 2.2).

U každé BPS je fermentor plněn vstupním substrátem odlišných poměrů složek nebo odlišným složením, navíc ani u jednotlivých BPS není složení substrátu v čase konstantní a je přizpůsobeno aktuální dodávce biomasy. Faktorů, které dále diverzifikují vlastnosti digestátu je více, jako například instalace separátoru za dofermentor či velikost a počet fermentorů. Závěr je tedy takový, že naměřené fyzikální vlastnosti a složení fugátu, jsou plně platné pro odpadní vodu z BPS Bořetice, odkud byl vzorek odebrán (kapitola 2.1) a pro dané složení vstupního substrátu, které aktuálně předcházelo odběru vzorku (kapitola 2.3). Množství odebraného fugátu tedy musí být takové, aby vystačilo nejen na měření fyzikálních vlastností fugátu, ale především na další testování zahušťovací jednotky a přidružených experimentů. Jen v takovém případě budou data z měření, použitá pro výpočty procesů v odpařovací technologii, skutečně odpovídat realitě. V případě testování odparky na jiném vzorku mohou být naměřená data použita pro orientační výpočty. Objem fugátu



Obr. 2.3: Separátor (a) a vzniklý separát (b)

potřebný pro jeden test zahušťovací jednotky se pohybuje okolo $0,6 \text{ m}^3$ [2]. Tento objem se však za nepatrné degradace dá použít opakovaně po důsledném zamíchání se vzniklým destilátem. Množství k odběru z BPS bylo následně stanoveno na cca $0,7 \text{ m}^3$. Tento objem byl jednorázově přecherpan přímo ze separátoru do IBC kontejneru dne 1.2.2018 a převezen do skladovacích prostorů NETME Centre na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.

2.3 Složení vstupního substrátu

Aby mohly být naměřené vlastnosti fugátu vztaženy ke konkrétnímu vstupnímu substrátu, je nutné dopočítat celkovou dobu zdržení (T_{tot}) substrátu v reaktorech z rovnice 2.2, tedy počet dnů od vstupu biomasy do fermentoru, po přecherpaní digestátu do skladovací jímky. Tato doba závisí na pracovním objemu fermentoru (V_F), pracovním objemu dofermentoru (V_D) a množství vstupních surovin do BPS za den, neboli celkové denní vstupní dávce (m_{tot}^{den}) [7].

$$T_{tot} = \frac{V_F + V_D}{m_{tot}^{den}} \quad (2.2)$$



Obr. 2.4: Odběr vzorku fugátu za separátorem

Data poskytnutá firmou agriKomp Bohemia s.r.o. obsahují údaje o vstupních surovinách od 1.1.2018 do 1.2.2018, kdy byl vzorek odebrán. Z těchto hodnot byla vypočítána průměrná celková denní vstupní dávka $m_{tot}^{den} = 44,5$ t/den. Pracovní objem fermentoru je pak $V_F = 1730$ m³ a dofermentoru $V_D = 2490$ m³. Po dosazení činí celková doba zdržení $T_{tot} = 89$ dní. Digestát je průběžně promícháván a přečerpáván mezi reaktory, tudíž námi odebraný vzorek obsahuje právě 1/89 vstupního substrátu přidaného do fermentoru 89 dní před datem odběru, tato dávka má ještě přímý vliv na složení odebraného vzorku fugátu. Z provozního deníku BPS Bořetice lze složení dávek substrátu za toto období dohledat a výslednou průměrnou hodnotu považovat za odpovídající odebranému vzorku fugátu.

Mezi vstupní suroviny se řadí především kukuřičná siláž, dále pak mix vepřové kejdy, vody a fugátu, drůbeží podestýlka, cukrovarnické řízky a kukuřičný šrot [7]. Kukuřičná siláž je uskladněna v silážních žlabech bez přístupu vzduchu, jak je tomu na Obr. 2.5. Zamezení přístupu vzduchu je klíčové pro dlouhodobé skladování siláže. Nejčastěji se provádí zakrytím silážní plachtou, napěchováním a zatížením [8]. Z Obr. 2.5 je taktéž patrná černá vrstva odkryté siláže na povrchu, která vznikla právě nežádoucím přístupem vzduchu, tím způsobenou inhibicí mléčného kvašení cukrů, zvýšením pH, v důsledku čehož došlo k podpoření hnilobných procesů

v siláži[8].

Hmotnostní zlomek (HZ), neboli procentuální zastoupení jednotlivých surovin v digestátu, spočítáme jako průměrnou hmotnost denní dávky dané suroviny ($m_{sur,i}^{den}$) za celkovou dobu zdržení (T_{tot}) vztaženou k celkové denní vstupní dávce (m_{tot}^{den}) dle rovnice 2.3.



Obr. 2.5: Silážní žlab se vstupní surovinou do BPS

$$HZ = \frac{\sum_{i=1}^{T_{tot}} m_{sur,i}^{den}}{T_{tot}} \cdot \frac{1}{m_{tot}^{den}} \quad (2.3)$$

Hmotnostní zlomky jednotlivých vstupních surovin jsou uvedeny v Tab. 2.1. Toto složení substrátu ovlivňuje všechny měřené vlastnosti odpadní vody včetně obsahu těžkých kovů a živin dle přílohy A.

2.4 Odběr vzorku pro zkušební laboratoř

Jelikož se tato bakalářská práce zaměřuje pouze na vybrané fyzikální vlastnosti fugátu a není cílem ani v silách této práce pokrýt experimentálně veškeré vlastnosti, byl odeslán vzorek fugátu také do zkušební laboratoře. Vybrána byla ověřená akreditovaná laboratoř LABTECH s.r.o. v Brně.

Tab. 2.1: Složení vstupního substrátu odpovídající měřenému fugátu

Vstupní surovina	Hmotnostní zlomek
kukuřičná siláž	56,96 hm. %
vepřová kejda/voda/fugát	22,50 hm. %
drůbeží podestýlka	11,25 hm. %
cukrovarnické řízky	4,78 hm. %
kukuřičný šrot	4,50 hm. %

Vybrané parametry měření jsou přehledně uvedeny v příloze A. Výběr těchto parametrů byl konzultován jak s vedoucím BP, v souvislosti s využitím těchto vlastností pro další vývoj odparky, tak s vedoucí laboratoře agriKomp Bohemia s.r.o., pro zajištění výběru standardně měřených veličin v praxi a zprostředkování zkoušky. V souvislosti s BP byl využit především parametr podíl sušiny a to jako výchozí bod pro přípravu vzorků (viz kapitola 2.5). Hodnota pH bude sloužit k porovnání naměřených hodnot s hodnotou naměřenou ve zkušební laboratoři. Další vlastnosti budou sloužit zejména čtenářům bakalářské práce jako zdroj dat pro další výzkum nebo pro vysvětlení souvislostí s měřeními vlastnostmi fugátu.

Odběr vzorku pro zkušební laboratoř byl proveden dne 12.2.2018 z IBC kontejneru. IBC kontejner obsahoval fugát odebraný 1.2.2018 na BPS Bořetice blíže popsany v kapitole 2.2. Fugát byl odebrán stejným způsobem jako v kapitole 2.5.

2.5 Odběr a příprava vzorků pro vlastní měření

Vzorky pro vlastní měření fyzikálních vlastností fugátu byly dne 9.3.2018 odebrány z IBC kontejneru uskladněného v prostorách NETME Centra s historií popsanou v předchozí kapitole 2.2. Pokud nebude stanoveno jinak, budou ve zbytku práce pojmem vzorky označovány vzorky fugátu označené dle Tab. 2.2 a odebrané viz předchozí věta. Vzhledem k téměř měsíční sedimentaci tuhých částic byl vzorek nejprve řádně promíchán a poté odebírán ze středu nádrže. Odebrané množství bylo předem určeno orientačním výpočtem popsáním níže, který zohledňuje všechny objemy fugátu potřebné na jednotlivé kroky experimentu, destilaci, počet vzorků a rezervu pro případ opakování některé části experimentu nebo rozlití fugátu. Pro zajištění dostatku fugátu během měření byla rezerva zvolena 50 % z vypočteného objemu navíc.

Vzhledem k časové náročnosti přípravy vzorků i následného experimentu, byl

zvolen optimální počet vzorků pro měření fyzikálních vlastností fugátu $N_{vzor} = 4$. Příprava vzorků s různým, odstupňovaným podílem sušiny byla provedena destilací v destilační aparatuře, což simuluje již zmíněný proces zahušťování fugátu odpařováním vody ve vyvíjeném zařízení. Tato fáze časový plán experimentu značně prodloužila. Další příprava tedy spočívala v odpaření vždy proporcionálního množství vody z objemu vyhrazeného pro každý vzorek a to tak, že u prvního vzorku nebyla odpařena žádná voda, tudíž obsah sušiny je původní $TS_{MIN} = 8,5 \%$. Tato hodnota byla předběžně známá z výsledků zkušební laboratoře viz příloha A. U posledního (čtvrtého) vzorku byl očekávaný obsah sušiny stanoven na $TS_{MAX} = 12 \%$, který odpovídá maximálnímu podílu sušiny na výstupu z odparky [2]. Zbylé 2 vzorky jsou rovnoměrně rozděleny (podle podílu sušiny) mezi tyto dvě hodnoty dle vzorce 2.4, kde $TS_{exp,i}$ je očekávaný podíl sušiny i -tého vzorku a nabývá hodnot $i = 2, 3$.

$$TS_{exp,i} = \frac{TS_{MAX} - TS_{MIN}}{N_{vzor} - 1} + TS_{i-1} \quad (2.4)$$

Další fází přípravy bylo výpočtem stanovit takové množství jednotlivých vzorků před destilací, aby po destilaci byl objem všech vzorků stejný, ale s rozdílným podílem sušiny (popsaném v předchozím odstavci). Během celé fáze odběru a přípravy vzorků (kapitola 2) je při výpočtech hustota fugátu aproximována hustotou vody při 4°C ($1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Všechny výpočty jsou tedy jen určitou aproximací reálného množství fugátu, který budeme pro experiment potřebovat, při neznalosti reálné hustoty, která bude měřena až následně. Dalším důvodem je hmotnostní charakter očekávaného podílu sušiny (rovnice 2.4) oproti známým objemům měřících aparatur. Nejprve byly určeny právě tyto orientační objemy vzorků pro jednotlivá měření. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce přílohy G pod označením V_{MIN} .

Orientační objem fugátu potřebný na jeden vzorek pro měření podílu sušiny byl stanoven tak, aby byla splněna podmínka z normy ČSN EN 15934. Norma uvádí, že vzorek v odpařovací misce musí mít před sušením takovou hmotnost, aby měl zbytek po sušení hmotnost nejméně $0,5 \text{ g}$ [9]. Pro očekávané podíly sušiny $TS_{exp,i}$ bude spolehlivě dostačovat 50 ml fugátu na vzorek. Orientační objem fugátu potřebný na jeden vzorek pro měření hustoty je určen objemem pyknometru, který je 50 ml . Největší spotřebu fugátu představuje měření měrné tepelné kapacity se 700 ml na vzorek a měření dynamické viskozity s 450 ml na vzorek.

Po sečtení všech objemů dojdeme k číslu $V_{tot} = 6600 \text{ ml}$, které představuje celkový minimální vstupní objem fugátu do jednotlivých experimentů bez rezervy. Z tohoto množství se vychází při výpočtu hmotnosti i -tého vzorku ($i = 1, 2, 3, 4$) před destilací $m_{vzor,i}^{před}$ dle rovnice 2.5. Toto množství se rovná vstupu fugátu do destilační aparatury. Zbylé veličiny jsou popsány výše a koeficient $1,5$ vyjadřuje 50

% rezervu.

$$m_{vzor,i}^{před} = \frac{V_{tot} \cdot 1,5}{N_{vzor}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{TS_{exp,i} - TS_{MIN}}{TS_{exp,i}}} \quad (2.5)$$

Dalším důležitým údajem je množství destilátu, které se musí odpařit, aby výsledný fugát měl příslušný podíl sušiny (rovnice 2.6). Je to také hmotnost destilátu, při které můžeme destilaci přerušit a značíme ji $m_{dest,i}^{po}$, kde i opět nabývá hodnot 1, 2, 3, 4 a značí číslo vzorku.

$$m_{dest,i}^{po} = m_{vzor,i}^{před} \cdot \frac{TS_{exp,i} - TS_{MIN}}{TS_{exp,i}} \quad (2.6)$$

Výsledky rovnic 2.4, 2.5, 2.6 jsou přehledně uvedeny v Tab. 2.2. Sumou hmotností vzorků před destilací dostaneme po zaokrouhlení na celé kilogramy celkovou hmotnost fugátu, kterou musíme odebrat z IBC kontejneru pro celý experiment. Pokud bychom tuto hodnotu předem nespočítali, mohlo by ke konci experimentu dojít k vyčerpání veškerého fugátu z příslušné várky a celý experiment by se musel opakovat. Naopak při neuváženém předimenzování odebraného vzorku by byla značně ztížena jeho manipulace a promíchávání, navíc pak větší spotřeba surfaktantu při destilaci. Každému vzorku byl přidělen kód, aby nedošlo k náhodné záměně. Kód popisuje o jakou látku se jedná – fugát (FUG), číslo vzorku a datum odběru. Tímto kódem byly označeny kanystry se vzorky, u výsledků dalších experimentů jsou však vzorky popsány pouze číslem 1–4.

Tab. 2.2: Očekávaný podíl sušiny, hmotnost destilátu odpovídající očekávanému podílu sušiny, hmotnost vzorku před destilací, celková hmotnost vzorků

Č. vzorku	Kód vzorku	TS _{exp} [%]	m _{dest} ^{po} [g]	m _{vzor} ^{před} [g]
1	FUG_1_09/03/2018	8,50	0,0	2475,0
2	FUG_2_09/03/2018	9,67	339,1	2814,7
3	FUG_3_09/03/2018	10,83	609,4	3154,4
4	FUG_4_09/03/2018	12,00	1015,2	3494,1
Celková hmotnost				12000

2.6 Destilace fugátu

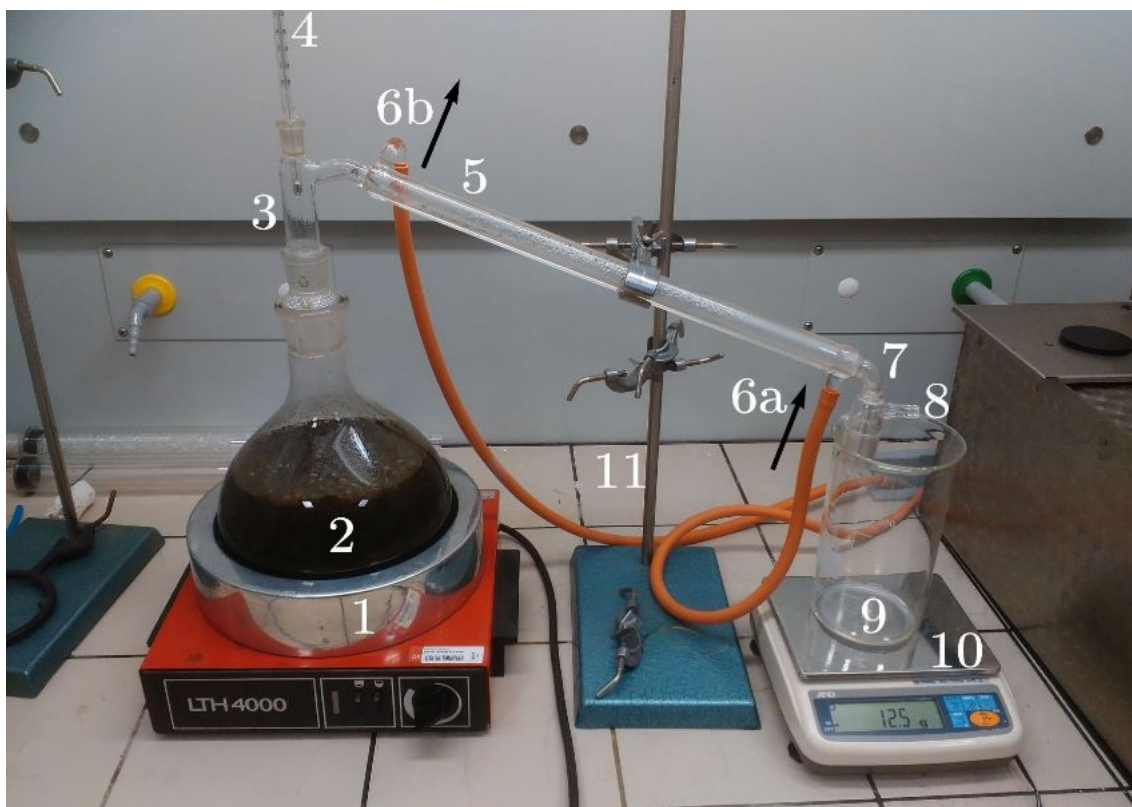
Následující kapitola definuje a vymezuje pojem destilace a popisuje regulaci podílu sušiny ve vzorcích fugátu. Poslední část této kapitoly je věnována průběhu destilace fugátu a sestavení destilačních křivek. Celý tento proces je označován jako destilace kvůli typu použité aparatury, charakteru odseparovaného zbytku z fugátu (destilátu) a některým společným charakteristickým dějům, ke kterým během destilace dochází. Ve skutečnosti tento proces z definice destilace mírně vybočuje, jelikož směs (fugát) neobsahuje minimálně dvě kapalné složky s rozdílnou teplotou varu [10]. Hlavní složkou fugátu je pouze voda. Pokud bychom měli striktně dodržovat definici, je proces označován v následující kapitole jako destilace spíše procesem odpařování a vypařování.

2.6.1 Popis destilace

Aby složení vzorků co možná nejvíce odpovídalo reálnému složení fugátu během procesu odpařování v zahušťovacím zařízení, kde podíl sušiny plynule roste [2], byly vzorky připraveny jednoduchou destilací. Destilace je proces sloužící k oddělení směsi dvou nebo více kapalin, při kterém se využívá rozdílného bodu varu jednotlivých složek směsi [10]. Po dosažení bodu varu dochází nad směsí kapaliny k tvorbě par bohatších na těkavější složku. Tyto páry jsou následně odvedeny do kondenzátoru s chladícím zařízením, kde kondenzují a vzniká kapalina bohatší na těkavější složku (destilát) [10]. Destilační aparatura na Obr. 2.6 je sestavena pro jednoduchou destilaci, tedy odpaření části směsi varem a následné kondenzaci. Tato metoda představuje velice hrubé dělení látek [10], kdy zároveň dochází k odpaření a kondenzaci látek méně těkavých, které jsou ve výsledném destilátu nežádoucí. Pro účely zahuštění fugátu je tato metoda dostačující. Nutno podotknout, že zahušťování fugátu v destilační aparatuře splňuje definici destilace jen z části. Fugát je totiž více než směs kapalin směsí vody a organických i anorganických látek, rozpuštěných či nerozpuštěných. Detailní laboratorní rozbor je v příloze A. Během destilace tedy dochází při teplotě varu této směsi nejen k odpařování vody, ale také plynů rozpuštěných ve fugátu, zejména pak amoniaku a dalších sloučenin dusíku a síry [2]. Účel přípravy vzorků však tento proces stále plní.

2.6.2 Destilace vzorků

Jak již bylo naznačeno v předchozí kapitole 2.5, různou dobou destilace byly získány vzorky s rozdílným podílem sušiny. Vzhledem k vysoké pěnivosti fugátu [2] musel být použit surfaktant pro snížení povrchového napětí, aby bylo možné destilaci vůbec provést. Na Obr. 2.8a je možné vidět, jak vysoko pěna dosahovala. Při



Obr. 2.6: Destilační aparatura složená z: topného hnízda s regulací ohřevu (1), varné baňky s kulatým dnem o objemu 4000 ml (2), destilačního nástavce (3), teploměru (4), kondenzátoru (5), přítoku chladicí vody (6a) a odtoku chladicí vody (6b), alonže (7), odvodu k vývěvě (8), kádinka s destilátem (9), váhy (10) a laboratorního stojanu (11) [10]

neopatrné kontrole dodávaného tepla do soustavy hrozilo přetečení fugátu do oblasti kondenzátoru. V takovém případě by došlo ke znehodnocení destilace a proces by se musel opakovat.

Surfaktant je látka, která sníží povrchové napětí kapaliny narušením napjaté blány na hladině [11]. Povrchové napětí obecně klesá s narůstající teplotou vlivem zvýšení výchylky tepelného kmitání molekul kapaliny, čímž dojde k narušení jejich soudržnosti na rozhraní kapalina – voda [12]. Při varu během destilace tedy pára prostupující povrchovou vrstvou kapaliny překonává menší odpor než za pokojové teploty a není v takové míře pohlcována blánou z kapaliny, což dává vzniknout bublinám. Při destilaci fugátu v laboratoři však pozorujeme rostoucí závislost pěnivosti na teplotě. Tento jev je způsoben varem, kdy se plyny rozpuštěné ve fugátu začnou vypařovat nejen z povrchu, ale také z celého objemu [13]. Dojde tak i přes snížené povrchové napětí k tvorbě většího počtu bublin právě díky několikanásobnému zvýšení objemu vypařených par. Tento nárůst pěnivosti se kompenzuje právě

přidáním surfaktantu. Jako šetrný k životnímu prostředí a zároveň efektivní propitěnicí přípravek byl zvolen řepkový olej (Obr. 2.7a), stejně jako v případě testování odparky [2].

První dávka řepkového oleje byla přidána do všech vzorků (1–4) ve stejném množství, a to v koncentraci 0,6 ml/l fugátu. Olej byl vždy důkladně promíchán akumulátorovou vrtačkou s míchadlem, aby došlo k oddělení složek fugát–olej a narušení vrstvy na hladině. I ve fázi přípravy vzorků destilací jsou výpočty orientační, vzhledem k aproximaci hustoty fugátu hustotou vody. Vzorek číslo 2, u kterého se předpokládá krátká doba destilace zůstal bez další úpravy, stejně jako vzorek číslo 1, tedy $c_{oil,1,2}^{před} = 0,6$ ml/l fugátu. Do vzorku č. 3 bylo přidáno dalších 5 ml řepkového oleje. Celková koncentrace oleje tak dosáhla $c_{oil,3}^{před} = 2,4$ ml/l fugátu. Při destilaci vzorku č. 3 byla pozorována vzrůstající tendence pěnivosti s rostoucím podílem sušiny. Do vzorku č. 4 tedy bylo následně přidáno 7,5 ml oleje, kvůli delší době destilace. Celková koncentrace oleje u vzorku č. 4 tak dosáhla $c_{oil,4}^{před} = 2,8$ ml/l fugátu. Koncentrace u vzorků 2–4 se navíc ještě zvýšila po odpaření destilátu s teplotou varu nižší než je teplota varu řepkového oleje 204 °C [14].

Výsledné koncentrace řepkového oleje v jednotlivých vzorcích po destilaci $c_{oil,i}^{po}$, které mají přímý vliv na měřené fyzikální vlastnosti fugátu, jsou spočítány dle rovnice 2.7, kde $i = 1, 2, 3, 4$ značí číslo vzorku (č. v.), $m_{vreal,i}^{před}$ reálnou (zváženou) hmotnost vzorku před destilací a $m_{vreal,i}^{po}$ reálnou (zváženou) hmotnost vzorku po destilaci. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 2.3. Další sloupce v Tab. 2.3 představují reálnou (zváženou) hmotnost destilátu po ukončení destilace $m_{dreal,i}^{po}$, tomu odpovídají podíly sušiny vypočítané z reálných hmotností po destilaci $TS_{real,i}$. Zde je možné sledovat rozdíl oproti hodnotám vypočteným z očekávaných hmotností vzorků ($TS_{exp,i}$) v Tab. 2.2 kapitola 2.5. Hmotnosti byly zváženy s nejistotou měření $\pm 0,05$ g.

$$c_{oil,i}^{po} = \frac{c_{oil,i}^{před} \cdot m_{vreal,i}^{před}}{m_{vreal,i}^{po}} \quad (2.7)$$

Tab. 2.3: Shrnutí výsledků destilace

Č. v.	c_{oil}^{po} [ml/l]	$m_{vreal}^{před}$ [g]	m_{vreal}^{po} [g]	m_{dreal}^{po} [g]	Δ [g]	TS_{real} [%]
1	0,6	2475,0	2475,0	0,0	0,0	8,50
2	0,7	2809,3	2409,3	356,2	43,8	9,76
3	3,0	2829,3	2229,3	586,5	13,5	10,74
4	4,0	3480,8	2440,8	993,5	46,5	11,96

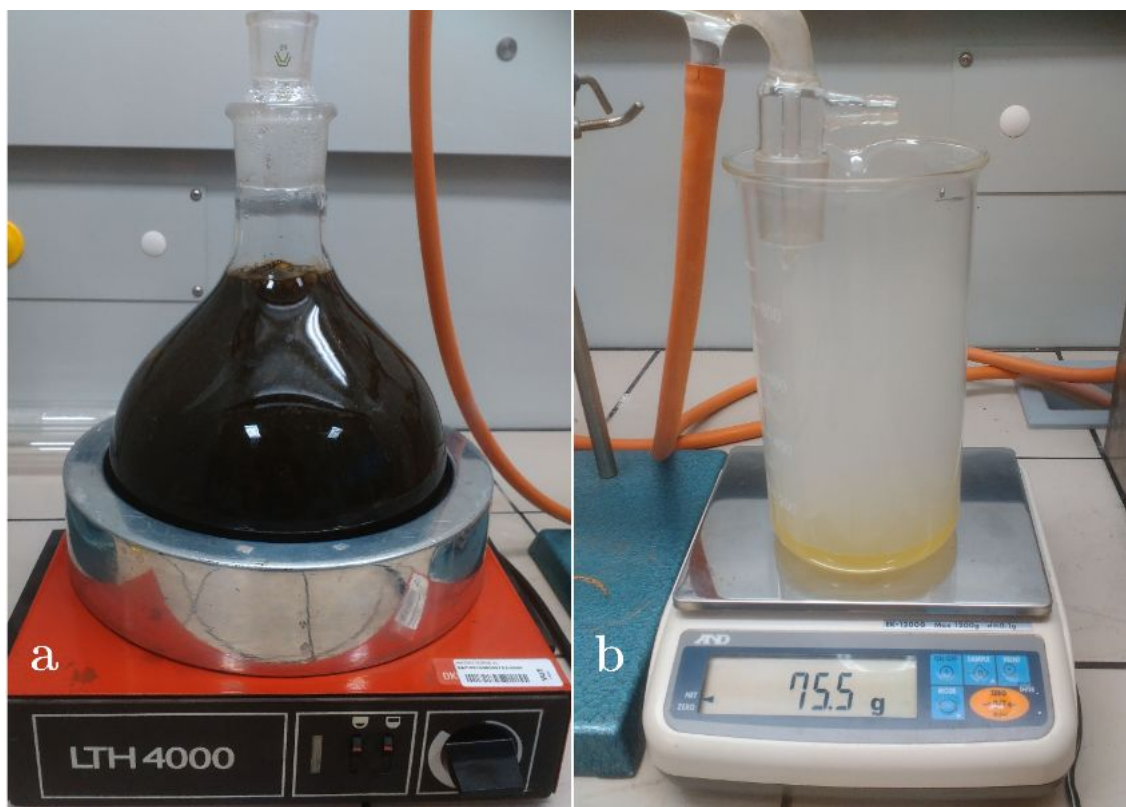


Obr. 2.7: Řepkový olej jako surfaktant (a) a skleněné kuličky pro zjemnění varu (b)

Pro zabránění utajeného varu, neboli přehřátí kapaliny, byly do varné baňky každého vzorku přidány skleněné kuličky na Obr. 2.7b (cca 5 ks). Ty zvýší nukleační plochu pro přeměnu vody kapalně na vodní páru, a tím podpoří var uvnitř objemu kapaliny. Dojde ke zjemnění varu vlivem rovnoměrného vypařování a urychlení destilace rychlejším přechodem z metastabilního do stabilního stavu [13].

Předposlední sloupec Δ vyjadřuje rozdíl mezi reálnou hmotností vzorku před destilací ($m_{vreal,i}^{před}$) a součtem reálné hmotnosti vzorku po destilaci ($m_{vreal,i}^{po}$) s reálnou hmotností destilátu ($m_{dreal,i}^{po}$). Jestliže platí zákon zachování hmotnosti v uzavřené soustavě destilační aparatury, kde hmotnost procházející kontrolní plochou je nulová [13], musí být tento rozdíl způsoben únikem par z destilační aparatury a usazením destilovaných látek v kondenzátoru. Únik byl způsoben v menší míře netěsností spojů, ve větší míře nedokonalou kondenzací par destilátu a následným únikem z otevřené kádinky. Druhý jev byl značně výraznější a mohl být pozorován i pouhým okem, jak je patrné z Obr. 2.8b. Únik par z kádinky probíhal u každého vzorku pouze v počáteční fázi destilace. Po ustálení teploty varu tento jev vymizel.

Usazení destilovaných látek v kondenzátoru probíhalo dvěma způsoby. U všech destilovaných vzorků došlo k přirozenému ulpění kondenzátu na vnitřních stěnách aparatury vlivem povrchového napětí. Tento destilát nebyl zvážen, a tudíž se pro-



Obr. 2.8: Vysoká pěnivost fugátu (a), nedokonalá kondenzace par destilátu (b)

jevil na rozdíl Δ . Při destilaci vzorku č. 3 docházelo pouze k mechanismům ztrát doposud zmíněným. Jinak tomu bylo u vzorků č. 2 a 4. Znatelý rozdíl je patrný i z hodnot Δ v Tab. 2.3. Je způsoben tím, že u vzorků č. 2 a 4 došlo po cca 20 minutách od první destilované kapky ke srážení neznámé, žluté, silně zapáchající látky. K tomuto jevu docházelo v oblasti kondenzace nasycených par, těsně za odtokem chladicí vody, což odpovídá teorii, kdy s klesající teplotou kondenzátu klesá i rozpustnost látek ve vodě [15]. Průběh reakce je následující: vypaření směsi par z fugátu za teploty varu, kondenzace těchto par v oblasti chlazení, vznik přesyceného roztoku těkavých látek ve vodě (nestabilní stav) a následná precipitace látek o koncentraci vyšší než jejich rozpustnost za dané teploty a tlaku [15]. Množství precipitovaných látek bude takové, aby výsledný roztok (destilát) byl právě nasycený a ve stabilním stavu [15]. Celý přechod z páry na sraženinu je vidět na Obr. 2.9a. Výsledná sraženina ucpávala alonž destilační aparatury, čímž značně komplikovala destilaci. Na Obr. 2.9c je zachycena sraženina těsně před samovolným propláchnutím alonže destilátem. Část precipitátu, která neprošla alonží do kádinky, ale zůstala uvnitř aparatury, představuje největší část rozdílu Δ u vzorků č. 2 a 4. Přestože byla destilace u všech třech vzorků provedena za stejných podmínek a závislost tvorby sraženiny na koncentraci oleje z naměřených dat nevyplývá, při destilaci vzorku č. 3



Obr. 2.9: Precipitace neznámé látky (a), srovnání bezbarvého destilátu vzorku č. 3 se žlutým destilátem vzorku č. 4 (b) a ucpaná alonž destilační aparatury (c)

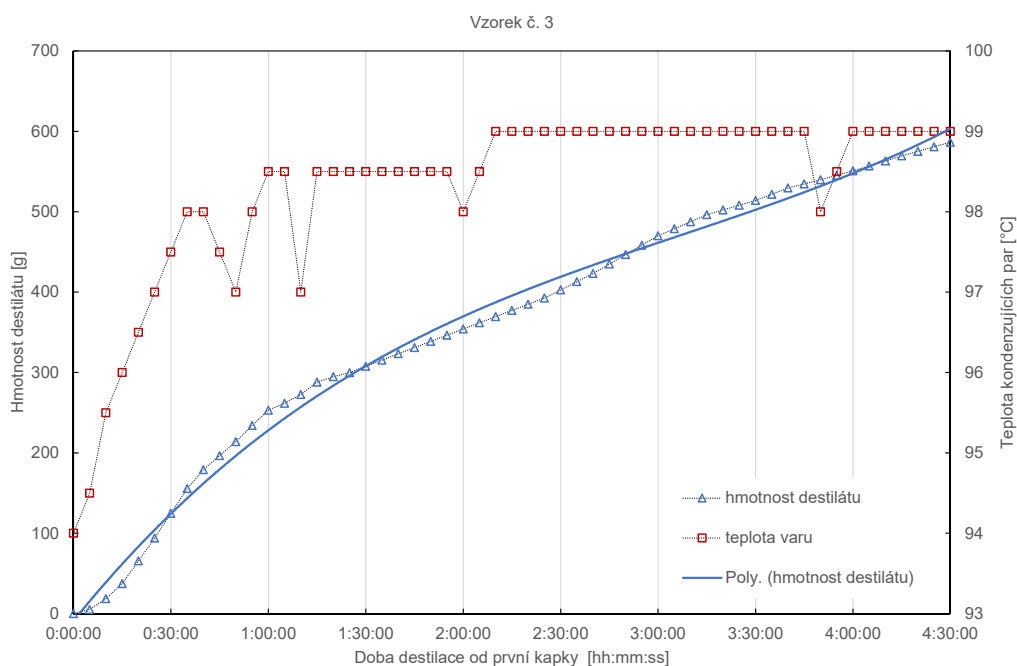
tento jev nenastal. Srovnání destilátu vzorků č. 3 (bezbarvý) a 4 (žlutý) je vidět na Obr. 2.9b. Složení precipitátu nebylo dále zkoumáno z důvodu překročení rozsahu této bakalářské práce.

2.6.3 Průběh destilace a destilační křivka

Jelikož hlavním důvodem destilace bylo získání vzorků s různým podílem sušiny, nikoliv naměření destilační křivky, nebyl striktně dodržen postup dle normy ČSN EN ISO 3405, a tudíž grafy v příloze B a C ani jejich popis v kapitole 2.6.3 nemohou být použity jako oficiální charakteristika destilačních vlastností fugátu, nýbrž slouží pro popis průběhu destilace jednotlivých vzorků.

Destilace vzorku č. 3 byla provedena dne 9.3.2018 při okolní teplotě 24,2 °C, tlaku 974,3 hPa a relativní vlhkosti vzduchu 22 %. Tyto hodnoty jsou přehledně uvedeny v tabulce v příloze G pro všechny měření a operace s fugátem. Od zapnutí ohřevu topného hnízda při teplotě okolí (24,2 °C) po odkápnutí první kapky destilátu do kádinky při teplotě 94 °C uplynulo 26 minut. Tento bod je znázorněn v grafu na Obr. 2.10 na počátku časové osy a je považován za začátek destilace [16]. U vzorků č. 2 a 4 tento bod leží mimo oblast grafu, jelikož teplota při odkápnutí

první kapky byla výrazně nižší, a to 68 °C po uplynutí 32 minut u vzorku č. 2 a pouze 46 °C po uplynutí 28 minut u vzorku č. 4. U těchto dvou vzorků vznikl první destilát odpařováním z povrchu fugátu a následnou kondenzací, nikoliv varem. Okolní podmínky destilace vzorku č. 2 byly 23,5 °C, 964,1 hPa a 30,2 %. U destilace vzorku č. 4 teplota v laboratoři mírně klesla na 22,9 °C, okolní tlak se téměř nezměnil (963,3 hPa) a relativní vzdušná vlhkost vzrostla na 33,3 %. Počáteční teplota fugátu před destilací je vždy rovna teplotě okolí. Okolní atmosferický tlak má vliv především na teplotu varu fugátu (čím menší, tím nižší teplota varu) [13]. Relativní vlhkost vzduchu ovlivňuje vypařování a kondenzaci vody. Vyšší vlhkost vzduchu představuje méně prostoru pro molekuly vody vypařené z fugátu, čímž tento děj zpomaluje. Opačný efekt nastává u kondenzace, kdy je třeba méně vypařených molekul vody z fugátu pro dosažení parciálního tlaku sytých par při dané teplotě a následné kondenzaci [13]. Vliv těchto tří okolních podmínek na naměřená data nebyl pozorován díky mnohem výraznějším faktorům, jako je například výkon topného hnízda nebo samotné složení fugátu. Oba vzorky (č. 2 a 4) byly destilovány ve stejný den, 16.3.2018.



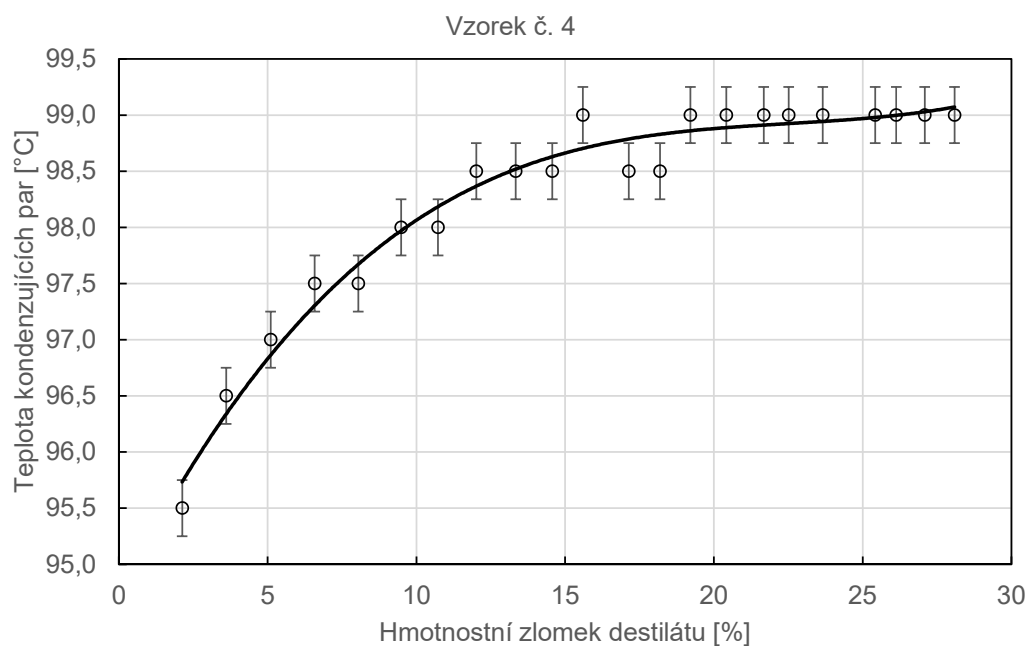
Obr. 2.10: Průběh destilace vzorku č. 3: hmotnosti destilátu v průběhu destilace (modré trojúhelníky), proložení hmotností destilátu polynomem 3. stupně (modrá křivka) a teplota kondenzujících par v průběhu destilace (červené čtverce)

Grafy popisující průběh destilace jednotlivých vzorků jsou uvedeny v příloze B ve vzestupném pořadí (vzorek č. 2 až č. 4) a vyjadřují stejnou závislost jako graf

na Obr. 2.10 pro vzorek č. 3. Hodnoty označené trojúhelníkem (modré) představují průběh hmotnosti destilátu (m_{dreal}) na době destilace od odkápnutí první kapky. Naměřená data jsou proložena polynomem třetího stupně u vzorku č. 3 a lineární funkcí u vzorků č. 2 a 4 (modrá křivka). Lineární průběh hmotnosti destilátu, tedy konstantní přírůstek hmotnosti v čase je žádaný. Naopak průběh hmotnosti destilátu s proměnnou směrnici, jako tomu bylo u vzorku č. 3 na Obr. 2.10, svědčí o nevyrovnaném procesu. Nejistota měření hmotnosti na digitální váze je rovna $\pm 0,05$ g. Modrá křivka na Obr. 2.10 by se dala rozdělit na 2 lineární funkce, kdy během první hodiny probíhala destilace poměrně rychle, zatímco zbytek procesu byl výrazně zpomalen. Tato změna souvisí s druhou částí grafu, která vyjadřuje průběh teploty kondenzujících par (respektive teploty varu) na době destilace. Grafy znázorňující průběh teplot u vzorků č. 2 a 4 jsou umístěny v příloze B. Nejistota měření teploty není do grafů zahrnuta a na rtuťovém teploměru činí $\pm 0,25$ °C.

Skokové výchyly teplot varu na Obr. 2.10 jsou způsobeny kombinací nedokonalé regulace ohřevu a velké pěnivosti fugátu. Po překročení hodnoty 180 g destilátu začalo docházet k opakovaným silným projevům pěnivosti na hranici přetečení do destilační aparatury. Tyto situace byly řešeny rychlým odstavením varné baňky od přívodu tepla, což způsobilo skokovité poklesy teploty viditelné v grafu na Obr. 2.10. U dalších vzorků (č. 2 a 4) se již podařilo nastavit takový příkon tepla, aby k výrazné pěnivosti nedocházelo. To se projevilo i na době destilace, kdy u vzorku č. 4 bylo množství destilátu o 407 g větší za dobu destilace o 20 minut kratší (viz příloha B. Konečná hmotnost destilátu všech vzorků a hodnoty s ní související jsou uvedeny v Tab. 2.3.

Významnou charakteristikou destilace je tzv. destilační křivka. Jedná se o křivku závislosti teploty kondenzujících par na hmotnostním (nebo objemovém) zlomku destilátu v procentech [16]. Tato křivka se používá zejména pro kvalitativní popis ropných produktů [16]. Zde je uvedena nezávisle na normativnosti měření, z důvodu přehledného zobrazení vývoje teploty varu. Destilační křivky jednotlivých vzorků jsou umístěny v příloze C ve vzestupném pořadí (vzorek č. 2 až č. 4) a vyjadřují stejnou závislost jako graf na Obr. 2.11 pro vzorek č. 4. U všech vzorků docházelo k růstu teploty varu fugátu s narůstajícím oddestilovaným množstvím až po její maximální hodnotu, která se u vzorků č. 3 a 4 zastavila na 99 °C a u vzorku č. 2 na 98,5 °C. U vzorku č. 4 je průběh naměřených hodnot nejlépe vystižen polynomickým proložením třetího stupně, u kterého se koeficient determinace R^2 nejvíce blíží číslu 1 [17]. Tato závislost je patrná z Obr. 2.11. Tvar destilační křivky vzorku č. 3 je velmi podobný vzorku č. 4 a vznikl proložením dat polynomem stejného stupně. Naproti tomu destilační křivka vzorku č. 2 je nejlépe vystižena lineární funkcí (příloha C). Proložení naměřených hodnot příslušnou funkcí zvýrazňuje průběh destilace a umožňuje porovnat vývoj destilace s očekávaným



Obr. 2.11: Destilační křivka vzorku č. 4

průběhem. Klesající směrnice destilačních křivek vzorku č. 3 a 4 odpovídá očekávanému průběhu, kdy s klesajícím množstvím vody (a dalších těkavých látek) ve varné baňce probíhá další vypařování klesajícím tempem. U vzorku č. 2 naopak lineární průběh odpovídá krátkému času destilace, kdy se ještě vliv zmenšujícího se množství vody (a dalších těkavých látek) v baňce nestihl projevit. Chybové úsečky představují interval nejistoty měření teploty rtuťovým teploměrem.

3 VYBRANÉ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

Následující kapitola popisuje fyzikální, ale i další, přímo související vlastnosti fugátu (odpadní vody z BPS po separaci tuhých částic). Jednotlivé fyzikální vlastnosti byly vybrány především s ohledem na vývoj zařízení pro zahušťování fugátu fungujícího na principu vakuového odpařování ve víceetapově mžikové odparce (MSF) [2]. Naměřená data pak mohou sloužit jak pro účely vývoje odparky, tak pro rozšíření databáze fyzikálních vlastností této specifické odpadní vody.

Mezi vybrané vlastnosti se řadí: podíl sušiny, hustota, měrná tepelná kapacita, dynamická viskozita, měrná elektrická vodivost a pH. Veličiny jsou řazeny v tomto pořadí. Všechny tyto vlastnosti byly experimentálně měřeny v laboratoři. Každá veličina je nejprve v úvodu kapitoly teoreticky definována, v druhé části jsou uvedeny metody, kterými se příslušné vlastnosti měří a třetí část je věnována experimentu a vyhodnocení výsledků. U každé vlastnosti je následně vyhodnocena závislost na podílu sušiny.

Fugát odpovídá svou strukturou suspenzi, tedy heterogenní směsi částic pevných látek dispergovaných v kapalině. Většina suspenzí, tedy i fugát se řadí mezi tzv. newtonské kapaliny (více v kapitole 3.4), o kterých by se dalo tvrdit, že kapalinami ve své podstatě nejsou. Jelikož však za určitých podmínek tečou, můžeme je zkoumat jako skutečnou kapalinu [12]. Odpadní vody z BPS jsou obecně velice specifické látky, jejichž fyzikální vlastnosti se mohou výrazně lišit v závislosti na velkém množství faktorů, z nichž některé byly popsány v předchozí kapitole 2.

3.1 Podíl sušiny

Následující kapitola definuje pojem podíl sušiny a uvádí normy, podle kterých je možné podíl sušiny stanovit. Třetí část kapitoly podrobně popisuje průběh experimentu. V závěru jsou naměřená data zhodnocena a porovnána s očekávanými hodnotami dle výpočtů v kapitole 2.6.2 a 2.5.

3.1.1 Popis fyzikální vlastnosti

Podíl sušiny v analyzovaném vzorku, neboli *total solids (TS)* [18] či *dry matter fraction (DM)* [9], je hmotnostní zlomek sušiny vyjádřený rovnicí 3.1 v procentech (hm. %) [18], kde m_{DM} je hmotnost sušiny a m_{VZ} je hmotnost vzorku před sušením [18]. Jelikož absolutně suchá látka neexistuje, je za sušinu považována látka, která se při dalším sušení za daných podmínek nemění [10]. Standardně se tento stav projevuje konstantní hmotností rezidua [9]. Za sušení se považuje tepelně ovlivněný difuzní proces, při kterém je odstraňována vlhkost (kapalina a pára) z materiálu

pevného skupenství mechanismem odpařování, vypařování nebo sublimací [10]. Jako sušina není definována jakákoliv látka, která má při stanovené teplotě sušení tlak odpovídající napětí nasycených par, tudíž se vypaří [18, 19]. Většinou se jedná o vodu [10].

$$TS = \frac{m_{DM}}{m_{VZ}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Sušinu můžeme dále rozdělit na anorganické a organické látky. Anorganickou část sušiny oddělíme vznícením vzorku v muflové peci [18]. Hmotnost popelu po skončení reakce (m_A) vztažená na hmotnost sušiny (m_{DM}) představuje podíl anorganických látek v sušině (A) dle rovnice 3.2. Rozdíl hmotnosti sušiny před vznícením (m_{DM}) a po shoření (m_A) pak odpovídá hmotnosti organických látek v sušině (m_O). Podíl organických látek v sušině (O) se spočítá analogicky dle rovnice 3.3 [18].

$$A = \frac{m_A}{m_{DM}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

$$O = \frac{m_{DM} - m_A}{m_{DM}} \cdot 100 = \frac{m_O}{m_{DM}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Na výstupu z dofermentoru (po proběhnutí anaerobní digesce) se podíl organických látek v sušině (O) pohybuje v rozmezí 30 až 40 %, podíl anorganických látek (A) pak zbylých 60 až 70 % [18]. Hodnoty z literatury jsou v rozporu s naměřenými hodnotami ve zkušební laboratoři (příloha A), kde podíl spalitelných, neboli organických látek vyšel $O = 63,1$ % sušiny a podíl látek anorganických tedy $A = 36,9$ % sušiny. Důvodem by mohla být separace tuhých částic digestátu, která u digestátu analyzovaného v zahraniční literatuře [18] neproběhla. Tyto veličiny byly změřeny pouze u vzorku odeslaného do externí zkušební laboratoře. Celkový podíl sušiny, ke kterému se hodnoty A a O vztahují je $TS = 8,5$ % (příloha A). U dalších vzorků byl stanoven pouze celkový podíl sušiny (TS).

3.1.2 Metody experimentálního měření

Měření podílu sušiny kalů, upraveného bioodpadu, půdy a odpadů, je stanoveno normou ČSN EN 15934 – výpočet podílu sušiny po stanovení zbytku po sušení nebo obsahu vody [9]. Alternativou pro měření sušiny je norma ČSN EN 12880 nebo ČSN EN 14346, které aplikují postupy založené na stejném principu [20, 21]. Na základě povahy a původu vzorku odpadní vody z BPS, který do kategorie látek vyhrazených normou ČSN EN 15934 spadá, byla zvolena metoda A – stanovení zbytku po sušení. Tato metoda pokládá za ekvivalentní pojmy zbytek po sušení a podíl sušiny vyjádřené hmotnostními zlomky v procentech. Kritérium pro výběr metody je množství těkavých látek, které bylo (oproti obsahu vody) považováno

za zanedbatelné [9]. Podmínka minimálního podílu sušiny 1 % byla ověřena ve zkušební laboratoři (viz příloha A). Jelikož se jedná o vícefázové vzorky, musí být vzorky fugátu nejprve homogenizovány [9]. Homogenizace byla provedena důkladným mechanickým promícháním fugátu jak při odběru z IBC kontejneru, tak před každým měřením.

Podstata metody A spočívá v sušení vzorků v sušárně při teplotě 105 ± 5 °C do konstantní hmotnosti [9]. Vzorky během sušení přejdou do pevného stavu a látky těkající při teplotě 105 °C budou dále stanoveny jako voda [9]. Jelikož byly 3 ze 4 vzorků připraveny destilací, dá se očekávat, že velké množství těkavých látek bylo odpařeno a zkondenzováno již během destilace, jak je podrobně uvedeno v kapitole 2.6.2.

3.1.3 Provedení a vyhodnocení experimentu

Postup měření podílu sušiny v laboratoři kopíruje postup popsáný v normě ČSN EN 15934. Měření podílu sušiny bylo provedeno dne 23.3.2018 při okolní teplotě 23,6 °C, tlaku 968,4 hPa a relativní vlhkosti vzduchu 19,8 %. Při počtu 4 vzorků fugátu byl stanoven optimální počet 5 měření na vzorek. Nejprve bylo předchystáno 20 prázdných keramických misek. Misky byly označeny čísly kvůli jejich nezaměnitelnosti. Následně se na 30 minut umístily do sušárny udržující teplotu 105 ± 5 °C, z důvodu odpaření vlhkosti ulpívající na stěnách misek. Veškeré sušení probíhalo v horkovzdušné sušárně Venticell 55 Standard s termostatem na Obr. 3.1a. Po sušení byly misky přesunuty do exsikátoru, kde se ochladily na laboratorní teplotu (23,6 °C). Skleněný exsikátor je vzduchotěsně uzavřen víkem se zábrusem promazaným tukem jako na Obr. 3.1c. Exsikátor obsahuje silikagel, který na sebe, jakožto hygroskopická látka, váže vzdušnou vlhkost [22]. Umístěním misek do exsikátoru tak zabráníme kondenzaci vzdušné vlhkosti na jejich stěnách, což by ovlivnilo výsledky měření. Tento proces je přímo ovlivněn relativní vlhkostí okolního vzduchu. Při vyšší relativní vlhkosti bude kondenzace vodní páry výraznější, hodnota 19,8 % se však dá považovat za nízkou. Celkový okolní tlak vzduchu má vliv na odpařování jen nepatrný. Po vychladnutí byly misky zváženy na analytické laboratorní váze Denver Instruments SI-603 s přesností 1 mg, fáze (a) na Obr. 3.2. Naměřené hodnoty hmotnosti misek m_M jsou uvedeny v tabulce v příloze D pod příslušným číslem misky a vzorku.

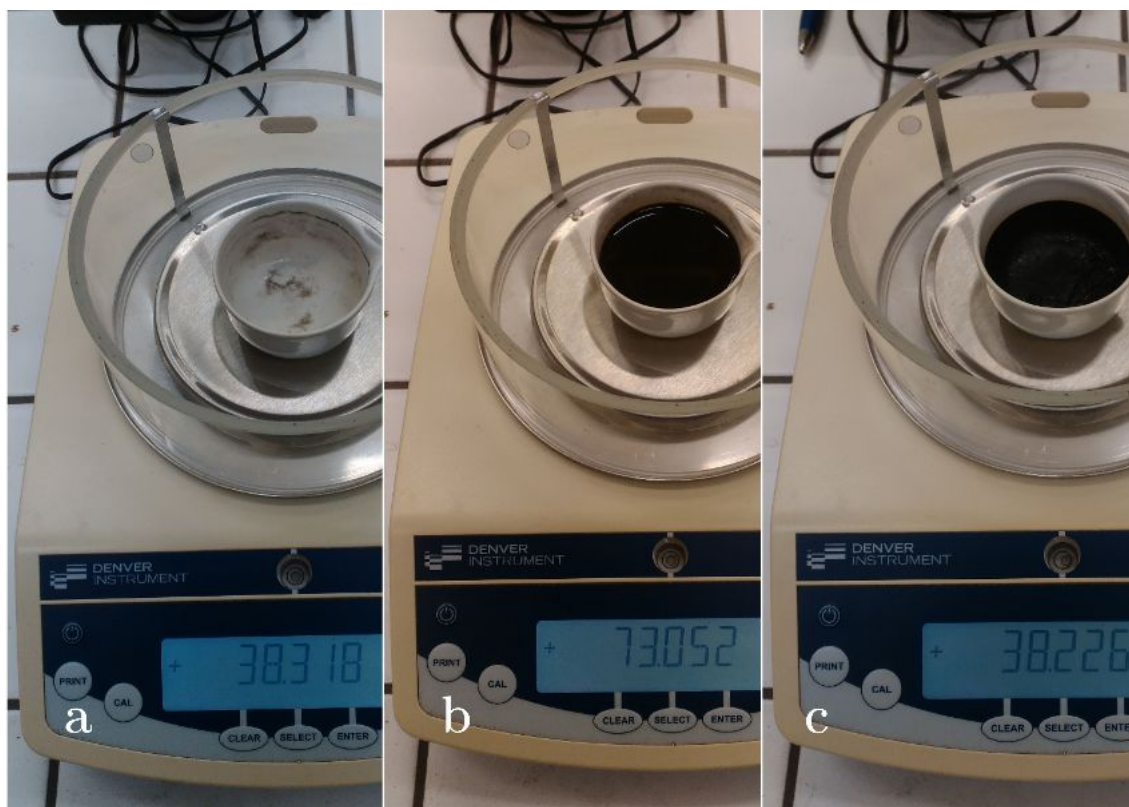
Fugát byl následně dávkován tak, aby byla splněna podmínka o minimální hmotnosti zbytku po sušení 0,5 g [9] a zároveň nebyla doba sušení zbytečně dlouhá. Při propočtu se vycházelo z hodnot očekávaného podílu sušiny ve vzorcích dle Tab. 2.2 v kapitole 2.6.2. Zda je navážené množství vzorku dostatečné bylo potvrzeno interaktivní tabulkou v Excelu při každém zápisu hodnoty. Na analytické váze byly



Obr. 3.1: Sušárna Venticell 55 Standard (a), sušení vzorků s fugátem v keramických miskách (b), skleněný exsikátor (c)

zváženy hmotnosti misky s fugátem m_{MF} , část (b) na Obr. 3.2. Hmotnost fugátu m_F se po odečtení hmotnosti misky m_M pohybovala okolo 30 g. Přesné hodnoty jsou uvedeny v tabulce v příloze D.

Misky se vzorky se následně sušily v sušárně při teplotě 105 ± 5 °C (viz Obr. 3.1(b)). Následně probíhala kontrolní vážení v intervalu 1 hodiny. První kontrolní zvážení zbytku po sušení proběhlo po 10 hodinách a 45 minutách sušení. Zvážen byl vždy jeden zástupce každého vzorku (1–4) po ochlazení v exsikátoru. Druhá kontrola proběhla v čase 11:45 od začátku sušení u těch samých vzorků. Podmínka pro ukončení sušení dle normy ČSN EN 15934 je: procentuální úbytek hmotnosti $\Delta_{per.}$ od posledního vážení je po hodině sušení menší než 0,5 % nebo hmotnostní úbytek $\Delta_{hm.}$ menší než 2 mg, podle toho, která hodnota je vyšší [9]. Ověření úbytku hmotnosti mezi kontrolou 1 a 2, jak procentuálně ($\Delta_{per.}$), tak absolutně ($\Delta_{hm.}$), jsou uvedeny v Tab. 3.1. Již po druhé kontrole byla podmínka pro ukončení sušení splněna. U 3 ze 4 vzorků došlo dokonce k nárůstu hmotnosti od posledního měření (záporné znaménko). Tato chyba mohla být způsobena nedostatečnou dobou chlazení v exsikátoru, a tím způsobené kondenzaci vzdušných par na odpařovacích miskách. Vzorky proto byly v sušárně ponechány po dalších 45 minut, aby se kondenzované



Obr. 3.2: Vážení prázdné misky (a), misky s fugátem (b) a misky se zbytkem po sušení (c) na analytické laboratorní váze Denver Instruments SI-603

páry znovu odpařili. Sušení bylo definitivně ukončeno po 12 hodinách a 30 minutách.

Ochlazení všech vzorků v exsikátoru po ukončení sušení bylo provedeno striktně na laboratorní teplotu. Na závěr byly zváženy hmotnosti misky se sušinou m_{MS} (Obr. 3.2c) a podle rovnice 3.4 [9] spočítány podíly sušiny jednotlivých vzorků. Všechny naměřené i dopočítané hodnoty jsou v tabulce v příloze D. Průměrné hodnoty podílu sušiny ($\overline{TS}$) z pěti měření vzorků 1–4 jsou uvedeny v Tab. 3.1 včetně směrodatných odchylek s .

$$TS = \frac{m_{MS} - m_M}{m_{MF} - m_M} \cdot 100 = \frac{m_S}{m_F} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Výsledky experimentu jsou poněkud neočekávané. První srovnání se nabízí u vzorku č. 1, u kterého známe hodnotu podílu sušiny z laboratorní zkoušky (viz příloha A. Hodnota naměřená ve zkušební laboratoři činí 8,5 % s nejistotou měření 10 % oproti hodnotě naměřené postupem popsaným výše: $9,42 \pm 0,026$ %. Při horní mezi nejistoty u měření ve zkušební laboratoři: 9,35 % a dolní mezi v případě měření v laboratoři vlastní: 9,39 % už jsou naměřené hodnoty téměř totožné. Rozdíl může být způsoben například přidáním oleje pro potlačení pěnivosti fugátu (kapitola 2.6.2) nebo časovým rozdílem mezi odebráním fugátu z IBC kontejneru

Tab. 3.1: Průměrný podíl sušiny ve fugátu ($\overline{TS}$)

Číslo vzorku	$\overline{TS}$ [hm. %]	s [hm. %]	$\Delta_{\text{per.}}$ [%]	$\Delta_{\text{hm.}}$ [mg]
1	9,42	0,026	-0,433	-13
2	10,49	0,038	0,060	2
3	12,00	0,067	-0,168	-7
4	11,66	0,052	-0,086	-3
Celková doba sušení				12:30 hod.

pro zkušební laboratoř a pro laboratoř vlastní (kapitola 2.4 a 2.5).

Druhé je srovnání výsledků experimentu ($\overline{TS}$) s očekávanými hodnotami vypočítanými z reálných hodnot po destilaci (TS_{real}). Toto srovnání nabízí Tab. 3.2. První druh chyby mohl vzniknout už jen díky nesprávné výchozí hodnotě z laboratorního rozboru, ze které se vycházelo při výpočtu hodnot TS_{real} (kapitola 2.5). Vzestupnost podílu sušiny by tímto faktorem však narušena být neměla. Druhý druh chyby spočíval v ovlivnění destilace připečením fugátu na stěnu varné baňky. Zvážení vzorku po destilaci bylo provedeno v baňce s připečeným fugátem, poté byl však fugát přelit do kanystru s příslušným číslem vzorku a část připečeného fugátu (převážně sušiny) zůstala v baňce. Z toho vyplývá, že u vzorku č. 4, který byl destilován nejvíce, tudíž by měl mít nejvyšší podíl sušiny, došlo k připečení většího množství sušiny na stěny baňky, a tudíž je výsledný podíl sušiny nižší než u vzorku č. 3. Třetí druh chyby spočívá v ovlivnění měření přidáním oleje do fugátu, a to v různých koncentracích (zdůvodnění je podrobně popsáno v kapitole 2.6.2). I přesto, že se výsledky měření liší od očekávaných hodnot s maximální chybou 1,26 % a minimální chybou 0,3 %, byl naplněn účel přípravy vzorků s odstupňovanými podíly sušiny. V rozmezí $\overline{TS} = 9,42$ hm.% až $\overline{TS} = 12,00$ hm.% tak můžeme sledovat závislost ostatních veličin na podílu sušiny.

Tab. 3.2: Srovnání naměřeného ($\overline{TS}$) a očekávaného (TS_{real}) podílu sušiny

Číslo vzorku	$\overline{TS}$ [hm. %]	TS_{real} [hm. %]
1	9,42	8,50
2	10,49	9,76
3	12,00	10,74
4	11,66	11,96

3.2 Hustota (měrná hmotnost)

Následující kapitola definuje fyzikální vlastnost hustotu (měrnou hmotnost) a uvádí metody, kterými je možné tuto vlastnost měřit. Třetí část kapitoly podrobně popisuje průběh experimentu. V závěru jsou naměřená data zhodnocena a porovnána s dostupnou literaturou.

3.2.1 Popis fyzikální vlastnosti

Hustota ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je skalární, stavová, fyzikální veličina definovaná jako poměr hmotnosti látky m (kg) a jejího objemu V (m^3), za předpokladu homogenního rozložení hmoty v prostoru [13, 12, 10]. Základní vztah pro výpočet hustoty je vyjádřen rovnicí 3.5. Tuto rovnici budeme využívat při měření hustoty fugátu. Dosazením hmotnosti známého objemu dostaneme průměrnou hustotu směsi.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.5)$$

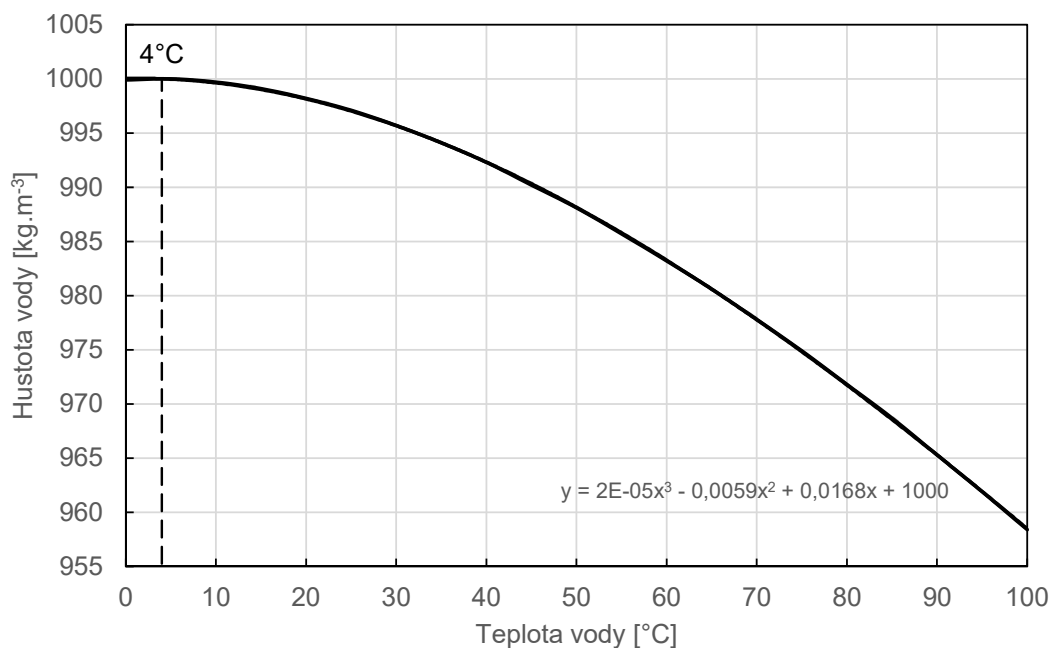
Hustota látky obecně závisí na tlaku (p) a na teplotě (t) [12]. Funkční závislost je znázorněna rovnicí 3.6. S rostoucí teplotou se vlivem zvětšení výchylky tepelného kmitání molekul zvětšuje objem, tudíž většinou hustota klesá [12]. Anomální chování vykazuje například voda při teplotě 0–4 °C, kdy je maximální hustota vody právě při 4 °C. Směrem k 0 °C a k vyšším teplotám nad 4 °C hustota klesá [12]. Závislost hustoty vody s maximem při 4 °C je na Obr.3.3). Jelikož hlavní složkou odpadních vod z BPS je právě voda, je dobré brát tuto anomálii v potaz. S rostoucím tlakem se naopak objem zmenšuje a tedy roste hustota [12].

$$[\rho = f(p; t)] \quad (3.6)$$

3.2.2 Metody experimentálního měření

K měření hustoty kapaliny je možné použít hned několik metod. Mezi nejběžnější laboratorní metody patří: určení hustoty kapaliny pyknometrem, určení hustoty kapaliny ponorným tělískem nebo určení hustoty kapaliny Mohrovými vážkami [10]. Pro měření hustoty fugátu byla vybrána metoda první, tedy určení hustoty cejchovaným pyknometrem.

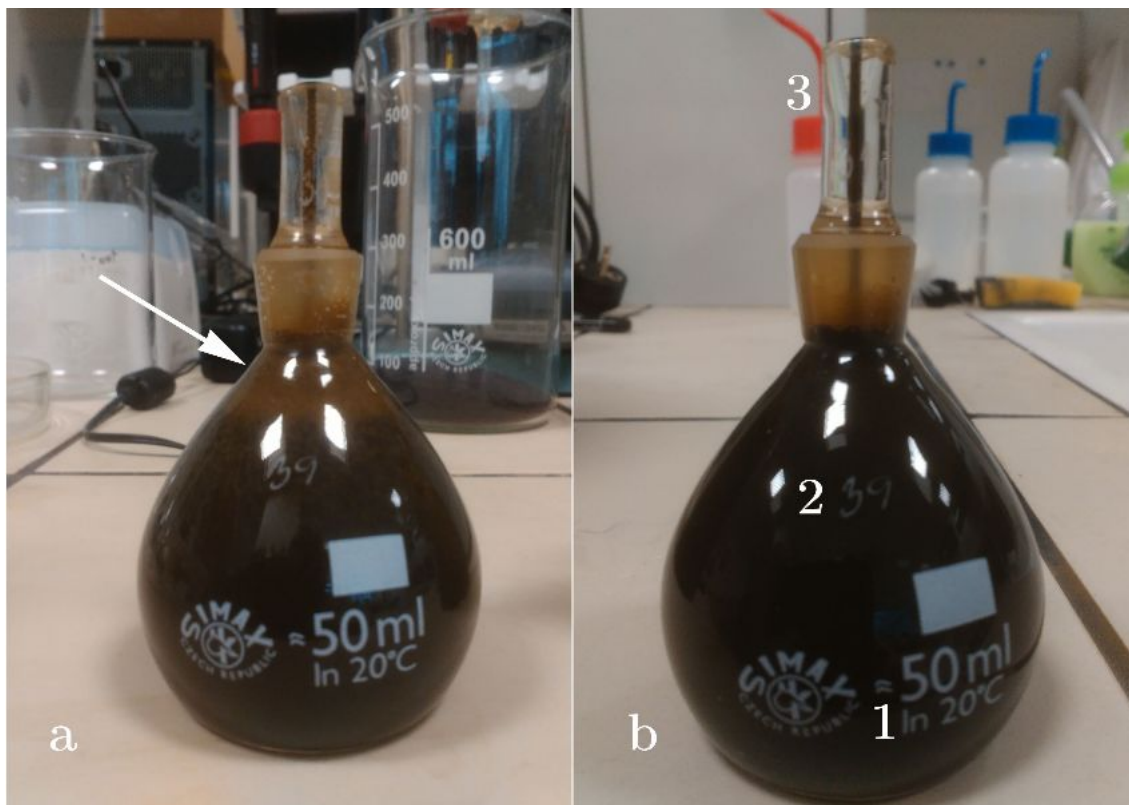
Pyknometr je skleněná nádoba (Obr. 3.4b pozice 2) opatřená zabroušenou zátkou s kapilárou (Obr. 3.4b pozice 3) cejchovaná na známý objem při dané teplotě. Tyto údaje jsou vždy uvedeny na pyknometru (Obr. 3.4b pozice 1). Přesný objem je zajištěn právě kapilárou, která při naplnění pyknometru zajistí přetečení přebytečné



Obr. 3.3: Závislost hustoty vody na teplotě [$\rho = f(t)$] [13]

kapaliny z pyknometru [10]. Princip metody spočívá v naplnění pyknometru zkoumanou kapalinou při předepsané teplotě, zvážení prázdného (suchého) a plného pyknometru na analytické váze (Obr. 3.6 a, b) a porovnání rozdílu hmotností se známým objemem pyknometru [10]. Konkrétní popis měření a veličin je v kapitole 3.1.3. Výsledná hustota kapaliny se počítá podle rovnice 3.7. Vzhledem k obecně malým objemům pyknometrů je nutné vážit vzorky na analytických vahách s přesností 1 mg. Důležité je také dodržet předepsanou teplotu měření, pokud by teplota byla výrazně jiná, je nutné pyknometr na novou teplotu cejchovat kapalinou se známou hustotou (např. destilovanou vodou o hustotě dle tabulek při dané teplotě) [10].

Určení hustoty kapaliny ponorným tělískem využívá Archimédova zákona, kdy postupně vážíme ponorné tělísko na vzduchu, v destilované vodě (kapalině se známým objemem) a v neznámé kapalině. Následně z těchto hodnot přepočítáme hustotu destilované vody na hustotu neznámé kapaliny [10]. Metoda určení hustoty Mohrovými vážkami předchozí metodu vylepšuje o pákový mechanismus se závažím a posuvným jezdcem. Jezdec se může pohybovat a tím vyvažovat vztlakovou sílu působící na ponorné tělísko. Nejprve nastavíme rameno vážek do vodorovné polohy, při ponoření ponorného tělíska do destilované vody. Poté tělísko ponoříme do neznámé kapaliny a opět vyvážíme rameno vážek posuvem jezdce. Počet dílků, o který jsme jezdce posunuli, odpovídá určité změně hustoty kapaliny vůči destilované vodě dané kalibrací



Obr. 3.4: Pyknometr: problém s pěnivostí fugátu (a), cejch s objemem pyknometru a předepsanou teplotou měřené kapaliny (b1), skleněná nádoba (b2), zabroušená zátka s kapilárou (b3)

dílků [10].

V praxi se hustota kapaliny určuje především ze skutečné rychlosti zvuku v systému kapalina – potrubí [23] při známých parametrech systému jako jsou: modul objemové pružnosti kapaliny, Youngův modul potrubí, vnitřní průměr potrubí a jeho tloušťka [10]. Rychlost zvuku se změří senzorem v příčném (radiálním) směru potrubí [23]. Pokud potřebujeme měřit hustotu v průmyslovém měřítku opakovaně, využívají se senzory zapojené přímo na potrubí s elektronikou, která hustotu průběžně propočítává [AntonPaar].

3.2.3 Provedení a vyhodnocení experimentu

Měření hustoty fugátu pyknometrem bylo provedeno 23.3.2018 při teplotě okolí 23,3 °C, tlaku 970,5 hPa a relativní vlhkosti 17,7 %. Nejdůležitějším parametrem při měření hustoty je teplota okolí. Všechny vzorky byly před měřením umístěny ve stejné místnosti, ve které byla teplota okolí měřena, a tudíž teplota vzorků byla taktéž 23,3 °C. Pyknometr je kalibrován na 20 °C. Po dosazení těchto teplot do rovnice křivky vyjadřující závislost hustoty destilované vody na teplotě v grafu na

Obr. 3.3 dostaneme chybu, která vznikne, pokud zanedbáme rozdíl teploty měření vůči teplotě cejkované. Hustota destilované vody při 20 °C je podle polynomu třetího stupně na Obr. 3.3 rovna $\rho = 998,136 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, při teplotě 23,3 °C pak $\rho = 997,441 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Rozdíl činí $0,695 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. I vzhledem k níže vypočítané směrodatné odchylce, která se pohybuje kolem $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ je tato chyba zanedbána.



Obr. 3.5: Cejkované pyknometry označené číslem, pyknometr č. 39 byl u každého vzorku použit dvakrát

Před začátkem měření byl fugát opět důkladně promíchán. K měření byly použity 4 pyknometry označené číslem pro jejich nezaměnitelnost (Obr. 3.5). Bylo provedeno 5 měření na jeden vzorek. U každého vzorku byl k měření použit každý pyknometr jedenkrát, pyknometr č. 39 pak dvakrát. Tento výběr pyknometrů byl dodržen u každého vzorku pro snížení nejistoty měření vlivem odchylky objemů jednotlivých pyknometrů.

Další postup experimentu spočíval ve zvážení všech 4 pyknometrů na analytické váze, jak je vidět na Obr. 3.6a. Pyknometry byly důkladně umyty destilovanou vodou, vysušeny v sušárně a ochlazeny na pokojovou teplotu. Hmotnosti pyknometrů (m_P) jsou uvedeny v příloze E. Následovalo plnění pyknometrů fugátem z kádinky s výlevkou. Plnění bylo problematické kvůli vysoké pěnivosti fugátu. Na Obr. 3.4a je vidět pěna u hrdla pyknometru. Pokud bychom pyknometr zvážili



Obr. 3.6: Prázdný pyknometr na analytické váze (a), pyknometr s fugátem na analytické váze (b)

i s pěnou, byla by naměřená hustota zatížena velkou chybou. Z toho důvodu se fugát před každým měřením nechal v kádince odležet a pěna byla narušena skleněnou míchací tyčinkou. Po naplnění pyknometru byl několikrát opakován následující postup, který napomohl vytlačení pěny z pyknometru: zátka s kapilárou se vložila do plného pyknometru, přetečený fugát se utřel a nádoba pyknometru znovu doplnila. Výsledkem byl pyknometr bez pěny jako na Obr. 3.4b. Následně mohlo proběhnout vážení fugátu na analytické váze (Obr. 3.6b). V tabulce v příloze E jsou uvedeny všechny hmotnosti pyknometru s fugátem (m_{PF}) a hmotnosti fugátu po vypočtení rozdílu (m_F). Objem pyknometrů je totožný ($V_P = 50$ ml).

Po naměření všech hodnot proběhl výpočet hustoty fugátu podle rovnice 3.7, tyto hodnoty jsou taktéž v příloze E. V Tab. 3.3 jsou shrnuty výsledky experimentu. Hustota vzorků 1–4 je spočítána jako průměrná hodnota z pěti měření ($\bar{\rho}$) s nejistotou danou směrodatnou odchylkou (s). Chybové úsečky, zobrazené v grafu na obr. 3.7, interpretují směrodatnou odchylku naměřených dat s . Z grafu je zřejmé, že rozptyl je značný, v řádu 1 % naměřených hodnot. Chybová pole jednotlivých vzorků se navzájem překrývají. Při krajních hodnotách chybového intervalu může dojít i k převrácení trendu, který je tvořen průměrnými hodnotami.

Tab. 3.3: Průměrná hustota fugátu ($\bar{\rho}$)

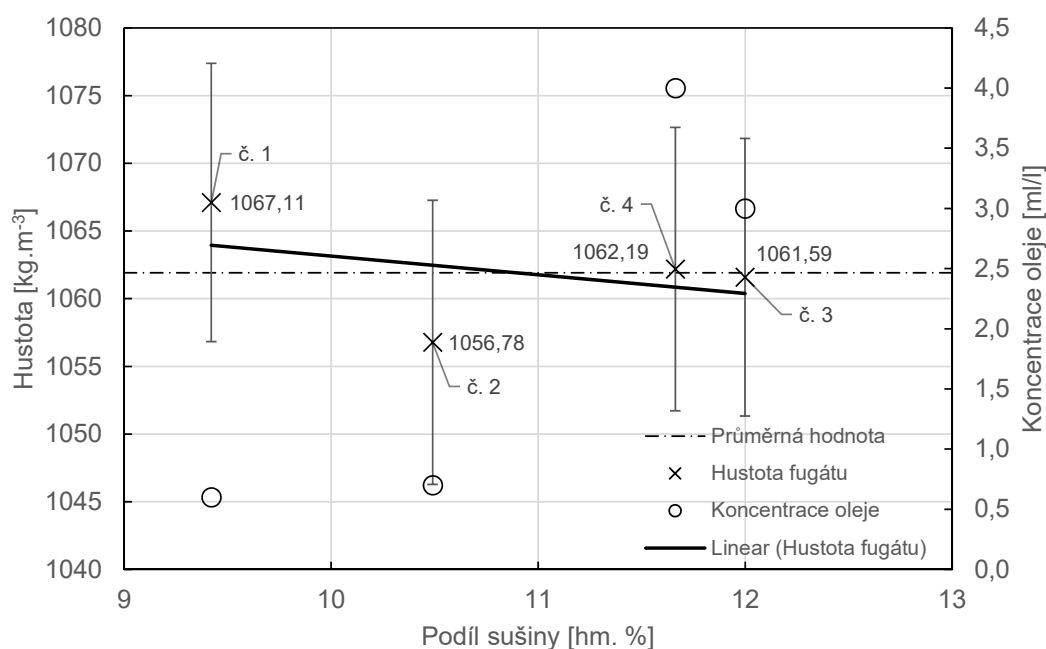
Číslo vzorku	$\bar{\rho}$ [kg · m ⁻³]	s [kg · m ⁻³]	$\overline{TS}$ [hm. %]	c_{oil}^{po} [ml/l]
1	1067,11	10,28	9,42	0,6
2	1056,78	10,50	10,49	0,7
3	1061,59	10,25	12,00	3,0
4	1062,19	10,47	11,66	4,0
Celková $\bar{\rho}$	1061,92	3,66	$r =$	-0,017

Na hodnotách hustoty ρ v příloze E je vidět značný rozdíl v závislosti na čísle pyknometru. Pyknometry by v ideálním případě měly mít stejné objemy. Velký rozptyl dat ovšem poukazuje na nedokonalou měřicí aparaturu. V tabulce je taktéž srovnání s průměrným podílem sušiny ($\overline{TS}$). Jelikož hustoty jednotlivých vzorků jsou si blízké, jak dokazuje i nižší celková směrodatná odchylka průměrných hustot vzorků ($s = 3,66 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), lze pro orientační výpočty použít celkovou průměrnou hustotu fugátu $\bar{\rho} = 1061,92 \pm 3,66 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Tato hodnota je v grafu na Obr. 3.7 označena vodorovnou čerchovanou čarou.

$$\rho = \frac{m_{PF} - m_P}{V_P} = \frac{m_F}{V_P} \quad (3.7)$$

Jak je možné vidět z grafu na Obr. 3.7, hustota se vzrůstajícím podílem sušiny klesá. Tento trend je v rozporu s výsledky v pracích [24, 2], kde je trend rostoucí. Naopak tento trend potvrzuje práce [25]. V druhém případě jsou zkoumány čistírenské kaly o podílu sušiny v rozmezí 2,0–4,6 hm. % [25]. Rozdíl oproti digestátu nebo fugátu z BPS je především v chemickém složení. Zkoumané kaly, u kterých byla klesající závislost hustoty s rostoucím podílem sušiny měly hustotu nižší než demineralizovaná voda. Dá se proto předpokládat, že výše popsany trend byl způsoben hustotou sušiny menší než je hustota vody. To se o fugátu říci nedá, jelikož se jeho hustota pohybuje kolem hodnoty $1061,92 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Sušina tudíž musí mít větší hustotu než voda.

Možným ovlivňujícím faktorem by mohlo být přidání oleje v různé koncentraci do jednotlivých vzorků. Množství oleje se destilací neredukuje, olej má navíc hustotu nižší než fugát [14]. Koncentrace oleje ve fugátu (c_{oil}^{po}) jsou uvedeny v Tab. 3.3 a v grafu na Obr. 3.7. Detailně je o dávkování a použití oleje pojednáno v kapitole 2.6.2, kde je uveden i výpočet c_{oil}^{po} . Postupné navyšování množství tohoto surfaktantu: u vzorku č. 1 a 2 bez navýšení, vzorku č. 3 s navýšením 5 ml a vzorku č. 4 s navýšením 7,5 ml, by mohlo mít jistý vliv na klesající trend hustoty. Zda je vliv byt jen statisticky významný, bylo ověřeno výpočtem výběrového korelačního



Obr. 3.7: Závislost hustoty fugátu ($\bar{\rho}$) na podílu sušiny a koncentrace oleje přiřazené k příslušným vzorkům o daném podílu sušiny, data jsou označena číslem vzorku (č.) a příslušnou hodnotou hustoty

koeficientu r [26]. Hodnota koeficientu r udává, zda je ve statistickém souboru dat $((x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n))$ lineární závislost mezi hodnotami x_i a y_i . Pokud $r = 1$ je lineární závislost přímá, pokud $r = -1$ je lineární závislost nepřímá a pokud $r = 0$ není mezi hodnotami žádná lineární závislost (nekorelovanost) [26]. Hodnota korelačního koeficientu $r = -0,017$ byla vypočítána statistickou funkcí z hodnot průměrných hustot vzorků $\bar{\rho}$ a příslušných koncentrací oleje c_{oil}^{po} . Z hodnoty r vyplývá, že mezi hustotou fugátu a koncentrací oleje není statisticky významná závislost.

Hypotézu o měřitelném vlivu koncentrace oleje ve fugátu nepodporuje ani fakt, že rozdíl mezi hustotou oleje a vody je pouze cca $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [14], což při koncentraci oleje $c_{oil}^{po} = 4 \text{ ml/l}$ činí rozdíl v hustotě oproti vzorku bez přidaného oleje pouze $0,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Další možné vysvětlení této klesající závislosti spočívá v usazování a připékání hustší složky sušiny na dně varné baňky během destilace. Čím déle destilace probíhala, tím více sušiny mohlo být usazeno na dně (celý proces je popsán v kapitole 2.6.1). Připečený zbytek byl následně od vzorku oddělen, čímž mohlo dojít k poklesu hustoty. Tento efekt by se ovšem proporcionálně projevil i na podílu sušiny ve vzorku, jelikož se jedná o hmotnostní zlomek.

Literaturu, která by srovnávala závislost hustoty digestátu nebo jiné odpadní vody (výrazně hustší než demineralizovaná voda) na podílu sušiny a vykazovala podobné výsledky se dohledat nepodařilo. To podporuje hlavní význam této práce, kterým je rozšíření znalostí o fyzikálních vlastnostech odpadních vod z BPS, které jsou obecně velmi nízké a trpí nedostatkem dat.

3.3 Měrná tepelná kapacita

Následující kapitola definuje fyzikální vlastnost měrnou tepelnou kapacitu a uvádí metody, kterými je možné tuto vlastnost měřit. Třetí část kapitoly podrobně popisuje průběh experimentu. V závěru jsou naměřená data zhodnocena a porovnána s dostupnou literaturou.

3.3.1 Popis fyzikální vlastnosti

Měrná tepelná kapacita c ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je fyzikální veličina hojně používaná v technické praxi při výpočtech přenosu tepla a energie [13]. V případě plynů a par rozlišujeme měrnou tepelnou kapacitu za konstantního tlaku c_p a za konstantního objemu c_v [13]. U nestlačitelných látek, jakou je i fugát, můžeme tento rozdíl zanedbat [10]. Měrnou tepelnou kapacitu pak můžeme definovat jako množství tepla dQ , které je potřebné pro zahřátí dané látky o hmotnosti $m = 1 \text{ kg}$ o teplotu $dT = 1 \text{ K}$. Tuto závislost vyjadřuje rovnice 3.8 [10].

$$c_p = c_v = \frac{dQ}{dT} \cdot \frac{1}{m} \quad (3.8)$$

Při přenosu tepla mezi soustavou a okolím platí tzv. kalorimetrická rovnice (rovnice 3.9), která popisuje vztah mezi předávaným teplem Q_{12} při změně počáteční teploty T_1 na teplotu koncovou T_2 látky s měrnou tepelnou kapacitou c a hmotností m [13]. Z této rovnice budeme později vycházet při sestavení tepelné bilance v kalorimetru.

$$Q_{12} = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.9)$$

3.3.2 Metody experimentálního měření

Jelikož je fugát velice specifická směs látek, nejsou hodnoty c_p tabelované a musí se změřit experimentálně. K tomu se nejčastěji využívá zařízení zvané kalorimetr. Kalorimetr je od okolí dokonale tepelně izolovaná nádoba [10]. Měření tepelné kapacity provádíme dodáním určitého tepla dQ do kalorimetru (teoreticky dokonale izolované termodynamické soustavy) a následným měřením změny teploty dT při známé hmotnosti m látek obsažených v kalorimetru [10]. Tuto metodu není možné použít, pokud by uvnitř kalorimetru docházelo k fázové přeměně nebo chemickým reakcím, tedy jevům, které spotřebovávají nebo uvolňují teplo [10].

Kalorimetr je chráněn vůči všem třem základním mechanismům přenosu tepla, kterými jsou: vedení (kondukce), proudění (konvekce) a záření (radiace) [13]. Proti tepelným ztrátám zářením jsou stěny kalorimetru chráněny postříbřením. K proudění

mezi kalorimetrem a okolím dochází minimálně díky dobře tepelně izolujícímu víku (Obr. 3.8 pozice 3b). Ztráty prouděním se projevují především vypařováním při otevírání kalorimetru nebo otvorem pro teploměr. Kondukci pak brání vakuum mezi dvojími stěnami nádoby kalorimetru (Obr. 3.8 pozice 3a) [10].

Kalorimetr, ve kterém dojde ke smíchání kapalin o rozdílné teplotě nazýváme směšovací. Pro takovou soustavu můžeme sestavit tepelnou bilanci obsahující teplo dodané kapalinou o hmotnosti m_1 a odebrané kapalinou o hmotnosti m_2 a kalorimetrem [10]. Teplo odebrané kalorimetrem při jeho ohřevu o 1 K se označuje jako tepelná kapacita kalorimetru [10]. O měření této veličiny je blíže pojednáno v následující kapitole 3.3.3. Stejně tak je zde rozebrána tepelná bilance v kalorimetru při měření c_p fugátu. Alternativou kalorimetru směšovacího může být kalorimetr, ve kterém ovládáme tepelný příkon proudem protékajícím cívkou s odporem. Výhodou jsou obecně nižší tepelné ztráty kalorimetru prouděním, jelikož není třeba kalorimetr během měření otevírat. Většina dostupných metod je založena právě na tepelné bilanci uvnitř lépe či hůře tepelně izolovaných nádob a komparaci měrné tepelné kapacity látky neznámé s látkou známou [27].

3.3.3 Provedení a vyhodnocení experimentu

Dříve než bylo možné přistoupit k samotnému měření měrné tepelné kapacity fugátu, byla změřena tepelná kapacita kalorimetru C_K . Okolní podmínky obou měření jsou uvedeny v příloze G. Vliv na měření má pouze teplota okolí, jejíž hodnota se blíží počáteční teplotě kapaliny v kalorimetru. Tepelná kapacita kalorimetru byla měřena vodou o známe měrné tepelné kapacitě, která je $c_{H_2O} = 4181,80 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ při 20 °C [13]. Měrná tepelná kapacita je obecně závislá na teplotě. Při měření se teplota vody pohybovala mezi 20 °C a 50 °C. Měrná tepelná kapacita vody se v tomto intervalu teplot pohybuje v rozmezí $4181,80 - 4177,6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, což představuje 0,1 % rozdíl, který byl při výpočtech zanedbán [13].

Postup měření C_K spočívá ve smíchání studené vody o hmotnosti m_{c,H_2O} a počáteční teplotě t_i s teplou vodou o hmotnosti m_{h,H_2O} a teplotě t_h v kalorimetru o hmotnosti m_K a teplotě totožné s počáteční teplotou vody t_i . Analytická váha pro měření hmotnosti vody je na Obr. 3.8 pozice 1. Kádinka s teplou nebo studenou vodou je na stejném obrázku pozice 2. Po smíchání kapalin o různé teplotě dojde k přenosu tepla z kapaliny teplejší na kapalinu studenější a kalorimetr. Teploty soustavy se vyrovnají a ustálí na koncové teplotě t_f . Teplá voda byla ohřívána ve varné konvici na takovou teplotu, aby došlo k přiměřenému teplotnímu gradientu mezi složkami směsi. Rovnováha mezi mírou tepelných ztrát a zaznamenanou změnou koncové teploty teploměrem s přesností $\pm 0,05 \text{ °C}$ [10] byla stanovena při teplotě blízké 50 °C. Hmotnost kalorimetru m_K je skryta v jeho celkové tepelné kapacitě C_K a není tak

pro následující výpočty důležitá. Kalorimetr použitý pro měření je na Obr. 3.8.

Důležitým parametrem měření je naopak doba do vyrovnání teplot. Jelikož kalorimetr není ideální, nelze čekat do úplného vyrovnání teplot, jelikož se po určité době začnou více projevovat tepelné ztráty do okolí, než srovnání teplot směsi. Tento jev byl ověřen při zkušebním měření, při kterém byla teplota měřena po 20, 30 a 40 minutách od smísení. Namísto srovnávání rozdílů teplot v různých částech kalorimetru (na stěnách, na hladině, uvnitř objemu) docházelo k trvalému poklesu teploty, což značí únik tepla ze systému. Doba do vyrovnání teplot (doba do měření koncové teploty t_f), tak byla stanovena na 2 minuty, jak pro měření C_K tak c_p . Tento čas je dostačující i z důvodu rychlejšího předání tepla mezi dvěma kapalinami než např. mezi kapalinou a pevným tělesem.

Následně byla sestavena tepelná bilance kalorimetru, která vyjadřuje rovnováhu po ustálení teplot. Teplo dodané teplou vodou (dQ_{h,H_2O}) se musí rovnat teplu odebranému studenou vodou (dQ_{c,H_2O}) a kalorimetrem (dQ_K) při zanedbání tepelných ztrát do okolí. Tato závislost je vyjádřena rovnicí 3.10. Kombinací této rovnice s kalorimetrickou rovnicí 3.9 dojdeme k rovnici 3.11. Další úpravou dostáváme vztah pro výpočet tepelné kapacity kalorimetru (rovnice 3.12).

$$dQ_{h,H_2O} + dQ_{c,H_2O} + dQ_K = 0 \quad (3.10)$$

$$m_{h,H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot (t_f - t_h) + m_{c,H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot (t_f - t_i) + C_K \cdot (t_f - t_i) = 0 \quad (3.11)$$

$$C_K = (m_{h,H_2O} \cdot c_{H_2O}) \cdot \left(\frac{t_h - t_f}{t_f - t_i} \right) - (m_{c,H_2O} \cdot c_{H_2O}) \quad (3.12)$$

Měření bylo provedeno šestkrát za totožných podmínek. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 3.4 označeny číslem měření (č. m.). Hodnoty byly dosazeny do rovnice 3.12 pro výpočet C_K a následně zprůměrovány. Průměrná tepelná kapacita kalorimetru $\overline{C_K} = 136,35 \pm 12,23 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$. Tato hodnota je následně použita při výpočtu měrné tepelné kapacity fugátu.

Při znalosti C_K můžeme přejít k samotnému měření měrné tepelné kapacity fugátu (c_p). Okolní podmínky měření jsou taktéž uvedeny v příloze G. Vliv na měření má opět pouze teplota okolí, která se blíží teplotě fugátu před smísením. Postup měření je téměř totožný s měřením tepelné kapacity kalorimetru, s tím rozdílem, že namísto studené vody je do kalorimetru vložen fugát o hmotnosti m_F , počáteční teplotě t_i a neznámé měrné tepelné kapacitě c_p . Po smísení s teplou vodou o hmotnosti m_{h,H_2O} , měrné tepelné kapacitě $c_{H_2O} = 4181,80 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a teplotě t_h v kalorimetru s tepelnou kapacitou C_K se teplota postupně ustálí na teplotě t_f , kterou změříme po 2 minutách od smísení. Celé měření probíhá na



Obr. 3.8: Vybavení potřebné pro měření tepelné kapacity kalorimetru: analytická váha (1), kádinka s horkou vodou (2) a kalorimetr obsahující vodu o teplotě okolí (3), který se skládá z nádoby s dvojitou vakuovou stěnou s plastovým krytváním (3a) a dobře tepelně izolujícím víkem s otvorem pro teploměr (3b)

měřící sestavě popsané na Obr. 3.9. Důležitou fází měření bylo vyrovnání teplot fugátu a kalorimetru (pozice 3) a rychlá manipulace při přelévání teplé vody (pozice 7) do kalorimetru. Navíc k měřící sestavě potřebujeme stopky pro měření 2 minut, jakožto zvoleného intervalu do vyrovnání teplot.

Tepelná bilance odpovídá rovnici 3.13, kde teplo dodané teplou vodou (dQ_{h,H_2O}) musí být odebráno fugátem (dQ_F) a kalorimetrem (dQ_K) při zanedbání tepelných ztrát do okolí. Po dosazení z kalorimetrické rovnice 3.9 dostaneme rovnici 3.14 a po upravení vztah pro výpočet měrné tepelné kapacity fugátu (rovnice 3.15).

$$dQ_{h,H_2O} + dQ_F + dQ_K = 0 \quad (3.13)$$

$$m_{h,H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot (t_f - t_h) + m_F \cdot c_p \cdot (t_f - t_i) + C_K \cdot (t_f - t_i) = 0 \quad (3.14)$$

$$c_p = \left(\frac{m_{h,H_2O} \cdot c_{H_2O}}{m_F} \right) \cdot \left(\frac{t_h - t_f}{t_f - t_i} \right) - \frac{C_K}{m_F} \quad (3.15)$$

Tab. 3.4: Tepelná kapacita kalorimetru (C_K)

Č. m.	m_K [g]	m_{c,H_2O} [g]	m_{h,H_2O} [g]	t_i [°C]	t_h [°C]	t_f [°C]	C_K [J · K ⁻¹]
1	760,8	419,4	277,9	22,2	53,6	34,2	124,92
2	760,8	428,2	306,9	22,1	50,3	33,3	157,36
3	760,8	482,0	358,0	19,8	48,5	31,6	128,50
4	760,8	548,6	241,8	20,7	49,0	29,0	142,39
5	760,8	453,4	280,7	21,7	50,8	32,4	122,52
6	760,8	421,4	287,8	22,5	49,1	32,8	142,39
Průměrná tepelná kapacita kalorimetru ($\overline{C_K}$)							136,35

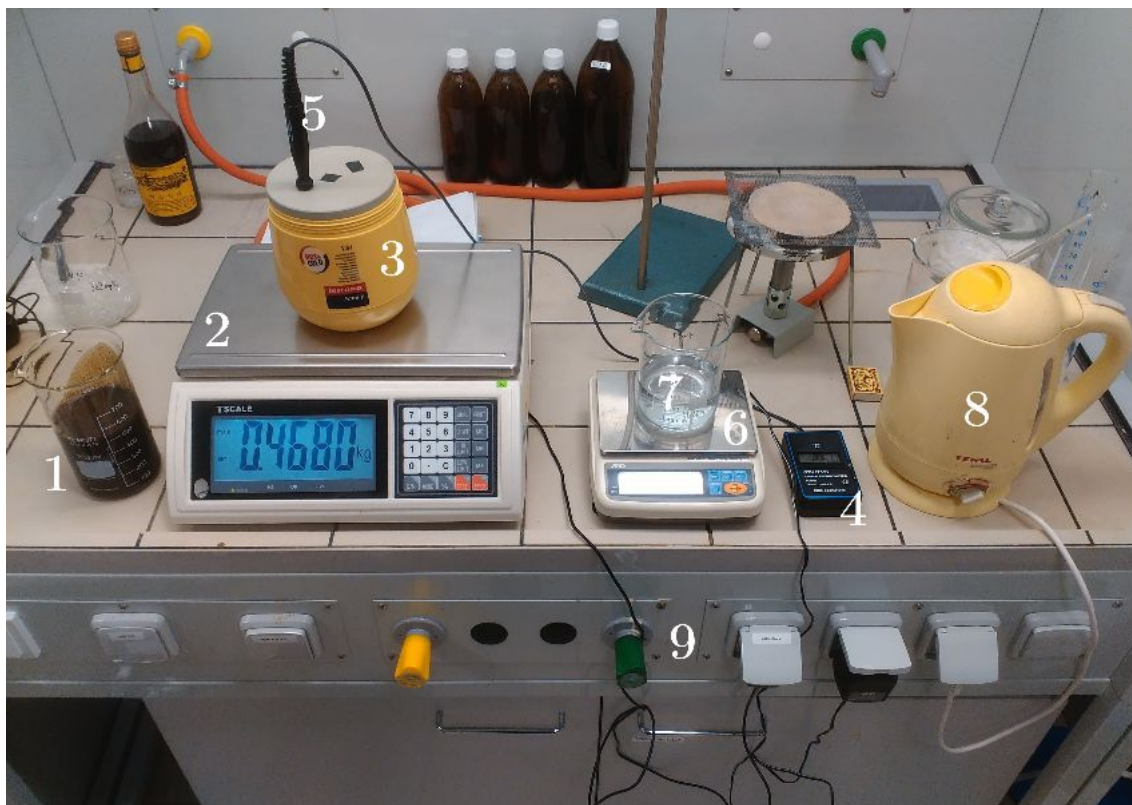
Měření proběhlo (vzhledem k velké časové náročnosti) třikrát pro každý vzorek fugátu (1–4) za totožných podmínek. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce v příloze F označeny číslem vzorku (č. v.). Hodnoty byly dosazeny do rovnice 3.15 pro výpočet c_p . Průměrné hodnoty měrné tepelné kapacity ($\overline{c_p}$) jednotlivých vzorků jsou uvedeny v Tab. 3.5 včetně směrodatných odchylek s . Pro orientační výpočty je možné použít celkovou průměrnou měrnou tepelnou kapacitu fugátu $\overline{c_p} = 3853,32 \pm 19,53 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ vypočítanou jako průměrná hodnota vzorků 1–4.

Tab. 3.5: Průměrná měrná tepelná kapacita fugátu ($\overline{c_p}$)

Č. vzorku	$\overline{c_p}$ [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	s [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	$\overline{TS}$ [hm. %]
1	3872,11	11,83	9,42
2	3839,05	15,57	10,49
3	3829,16	15,46	12,00
4	3872,94	14,83	11,66
Celková $\overline{c_p}$	3853,32	19,53	

V Tab. 3.5 jsou taktéž uvedeny hodnoty průměrného podílu sušiny ($\overline{TS}$) v jednotlivých vzorcích a závislost c_p na $\overline{TS}$ je vykreslena v grafu na Obr. 3.10. Data jsou proložena lineární funkcí. S rostoucím podílem sušiny celkově měrná tepelná kapacita fugátu klesá. Chybové úsečky naznačují velkou variabilitu dat. Ta je způsobena zejména velkou citlivostí hodnoty c_p na naměřené teploty. Chyba měření koncové teploty t_f o 0,1 °C se projeví na měrné tepelné kapacitě (c_p) rozdílem 80–90 J · kg⁻¹ · K⁻¹.

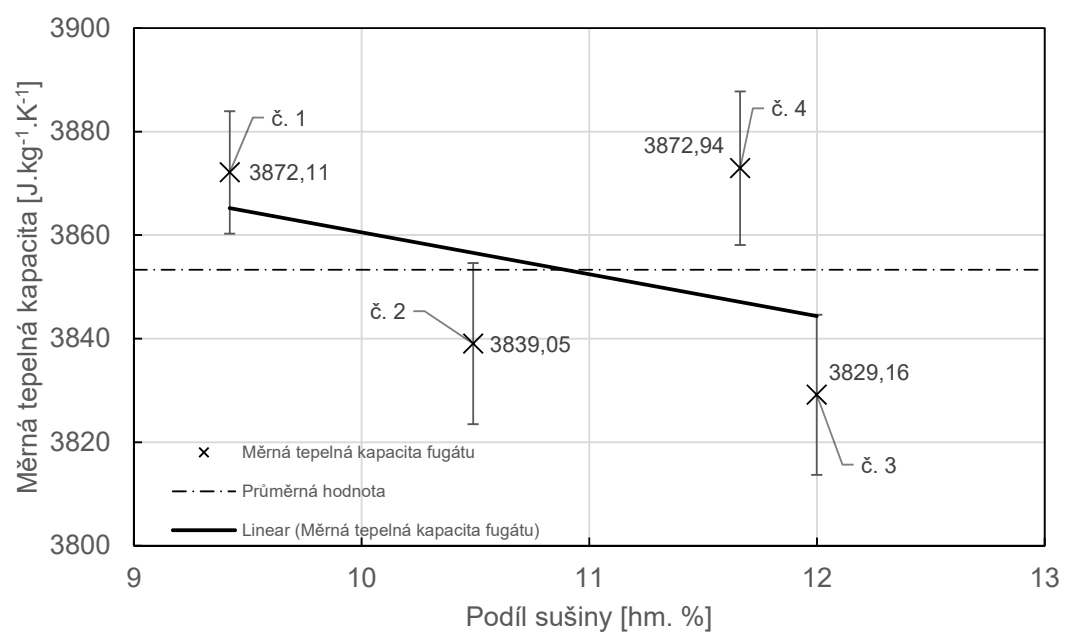
Trend, který pozorujeme na Obr. 3.10 je trend očekávaný, jelikož měrná tepelná kapacita vody (c_{H_2O}) patří mezi vůbec nejvyšší ze všech látek [12]. Dá se tedy



Obr. 3.9: Sestava pro měření měrné tepelné kapacity fugátu složená z: kádinky s fugátem (1), váhy s dostatečnou nosností (2), kalorimetru (3), digitálního teploměru s přesností $\pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4) s měřicí sondou (5), váhy pro měření hmotnosti vody (6), kádinky s horkou vodou (7), varné konvice (8) a zdroje elektrické energie (9)

očekávat, že s klesajícím podílem vody bude klesat i měrná tepelná kapacita směsi vody a sušiny. Anomální chování vykazuje vzorek č. 4, který i přes vysoký podíl sušiny (11,66 hm. %) a nejvyšší koncentraci oleje ($c_{oil}^{po} = 4,0\text{ ml/l}$), jehož měrná tepelná kapacita je oproti vodě zhruba poloviční [12], má nejvyšší měrnou tepelnou kapacitu. Tato odchylka mohla být způsobena chybou měření teploty.

V literatuře se většinou měrná tepelná kapacita odpadních vod aproximuje měrnou tepelnou kapacitou vody [25]. Z Obr. 3.10 vyplývá, že s rostoucím podílem sušiny roste i chyba této aproximace. Vzorek fugátu odebraný z BPS Bořetice obsahuje podíl sušiny (8,5 hm. % viz příloha A) bližší horní hranici standardních hodnot podílu sušiny v digestátu (rozmezí 1,5~12 hm. % [28]), a tudíž je vhodné použít naměřené hodnoty c_p nikoliv aproximaci c_{H_2O} . V literatuře zaměřující se speciálně na měření měrné tepelné kapacity fugátu [24] je taktéž zřejmý klesající trend s rostoucím podílem sušiny. Naměřené hodnoty se v porovnání se zdrojem [24] liší pouze v řádu 1 %.



Obr. 3.10: Závislost měrné tepelné kapacity fugátu ($\bar{c}_p$) na podílu sušiny, data jsou označena číslem vzorku (č.) a příslušnou hodnotou měrné tepelné kapacity

3.4 Dynamická viskozita

Následující kapitola definuje fyzikální vlastnost kapalin dynamickou viskozitu a uvádí metody, kterými je možné tuto vlastnost měřit. Třetí část kapitoly podrobně popisuje průběh experimentu. V závěru jsou naměřená data zhodnocena a porovnána s dostupnou literaturou.

3.4.1 Popis fyzikální vlastnosti

Dynamická viskozita η (Pa · s) je charakteristickou vlastností reálné kapaliny [10] vyjadřující míru její tekutosti. Dynamická viskozita je podle Newtonova zákona, vyjádřeného rovnicí 3.16 [12], rovna smykovému (třecímu) napětí τ (Pa) při jednotkovém rychlostním gradientu dv/dy dvou po sobě se pohybujících vrstev kapaliny [10]. Smykové napětí je vyvoláno působením obecné síly s tečnou složkou dF_t na plochu dS [12].

$$\tau = \frac{dF_t}{dS} = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (3.16)$$

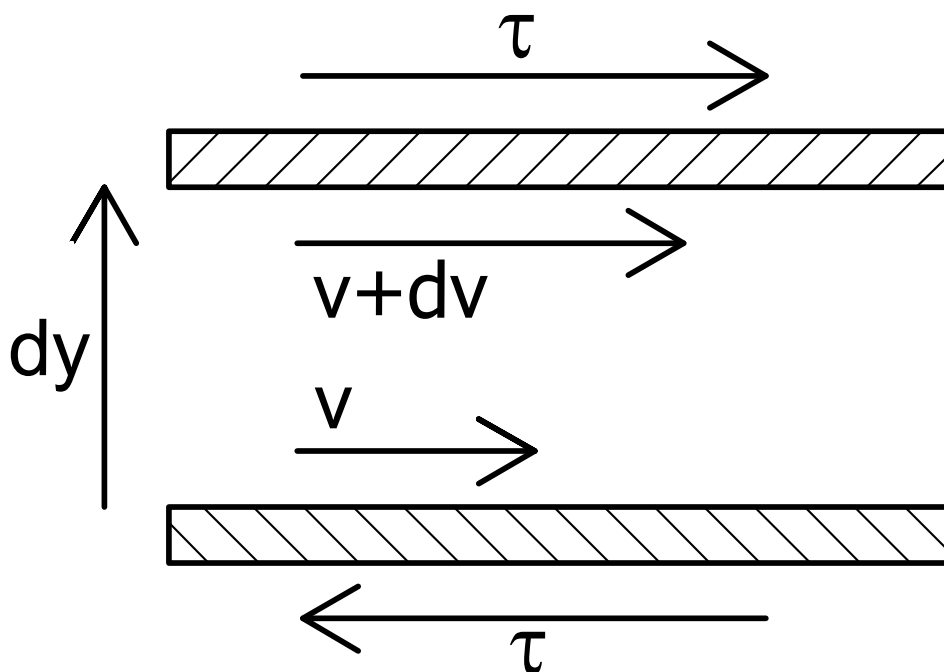
Obr. 3.11 objasňuje veličinu dv/dy (s^{-1}) z Newtonova zákona, někdy také označovanou $\dot{\gamma}$. Tento zlomek se nazývá smyková rychlost (*shear rate*), neboli rychlostní gradient a vyjadřuje změnu rychlosti kapaliny dv zatěžované smykovým napětím τ ve směru kolmém na směr proudění v elementární vzdálenosti dy [12, 10]. Rovnice 3.17 popisuje tento vztah matematicky.

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad (3.17)$$

Dynamická viskozita je závislá především na teplotě, a to tak, že s rostoucí teplotou klesá. Vliv tlaku lze zanedbat [12]. V technické praxi se často používá tzv. kinematická viskozita ν ($m^2 \cdot s^{-1}$), kterou lze dopočítat podle rovnice 3.18, kde ρ je hustota kapaliny a η dynamická viskozita [12].

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.18)$$

Newtonův zákon v podobě definované rovnicí 3.16 platí pouze pro kapaliny u kterých dynamická viskozita nezávisí na velikosti smykového napětí a smykové rychlosti. Tyto kapaliny nazýváme newtonské. Jak již bylo naznačeno v úvodu této kapitoly 3, fugát svými vlastnostmi odpovídá druhému typu kapalin označované jako kapaliny nenewtonské. Dynamická viskozita nenewtonských kapalin je funkcí smykového napětí τ , případně i smykové rychlosti dv/dy . Platí tedy předpis: $\eta = f(\tau; dv/dy)$ [12].



Obr. 3.11: Smyková rychlost definovaná jako změna rychlosti kapaliny dv v elementární vzdálenosti dy měřené v příčném směru vyvolána působením smykového napětí τ na kapalinu [12]

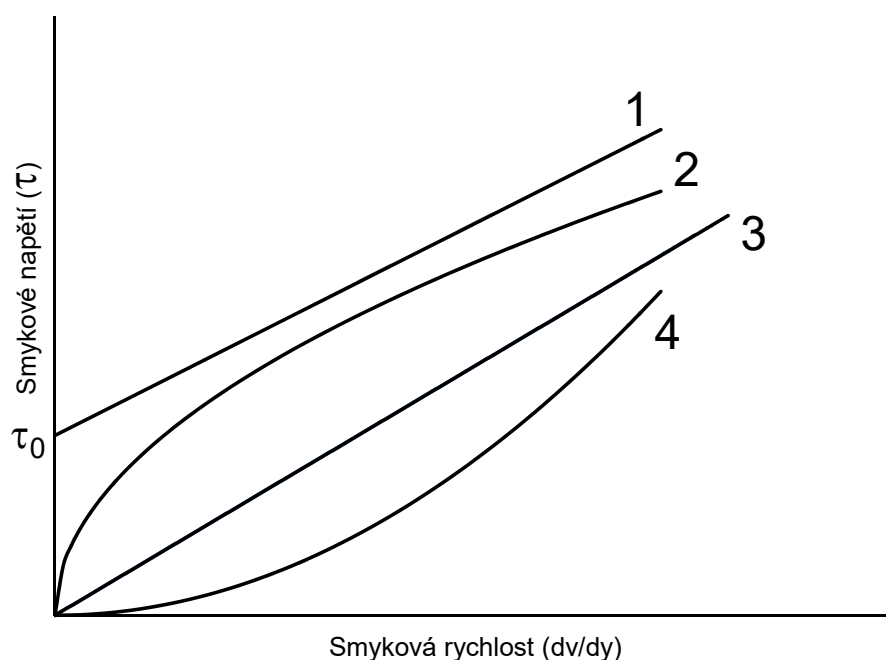
Nenewtonské kapaliny dále dělíme podle závislosti smykového napětí na smykové rychlosti $\tau = f(dv/dy)$. Tuto závislost ukazuje tzv. reogram na Obr.3.12 [12]. Křivky 1–4 mohou být popsány rovnicí 3.19, kde τ_0 je mez tekutosti (při nulové smykové rychlosti), k je koeficient koexistence a m exponent nenewtonského toku [12]. Při dosazení různých hodnot těchto koeficientů do rovnice 3.19 dostaneme různé typy nenewtonských kapalin, které jsou uvedeny v Tab. 3.6. Speciálním případem rovnice 3.19 je Newtonův zákon (rovnice 3.16) platný pro newtonské kapaliny [12]. Hodnoty koeficientů, pro které bude kapalina newtonská jsou v Tab. 3.6 uvedeny taktéž.

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \left(\frac{dv}{dn} \right)^m \quad (3.19)$$

Mezi kapaliny dilatantní (*shear thickening*) se řadí například med nebo škrob [29]. Anglický překlad výstižně vyjadřuje chování těchto kapalin, kdy dochází k nárůstu zdánlivé viskozity s nárůstem smykového napětí. Tento jev je způsoben tvorbou klastrů, které blokují pohyb molekul kapaliny. Pseudoplastické kapaliny

Tab. 3.6: Typy nenewtonských kapalin dle hodnot koeficientů rovnice 3.19 [12]

Typ nenewtonské kapaliny	τ_0	k	m
Binghamské	$\neq 0$	-	1
Pseudoplastické	0	-	<1
Dilatantní	0	-	>1
Newtonská kapalina	0	η	1



Obr. 3.12: Reogram vyjadřující závislost smykového napětí τ na smykové rychlosti dv/dy , kde τ_0 je mez tekutosti; binghamské kapaliny jsou popsány křivkou (1), pseudoplastické kapaliny (*shear thinning*) křivkou (2), newtonské kapaliny křivkou (3) a kapaliny dilatantní (*shear thickening*) křivkou (4) [12]

(*shear thinning*) naproti tomu lépe tečou při působení většího smykového napětí. Mezi tyto kapaliny se obecně řadí i odpadní vody, kaly a další suspenze [29]. Binghamské kapaliny potřebují určité minimální smykové napětí τ_0 k tomu, aby začaly téct a při dalším zatěžování vykazují vlastnosti newtonských kapalin [30].

3.4.2 Metody experimentálního měření

Při měření dynamické viskozity nenewtonské kapaliny jsou naměřené hodnoty viskozity pouze zdánlivé [30], jelikož Newtonův zákon pro tyto kapaliny neplatí v plné míře. Za konstantní teploty tak dochází k naměření různých hodnot dynamické viskozity při působení různého smykového napětí nebo při různé smykové rychlosti [12]. Tuto závislost zaznamenáváme do tzv. reogramu (viz kapitola 3.4.1).

Měření dynamické viskozity fugátu bylo provedeno na rotačním viskozimetru. Princip této metody spočívá v měření brzdného účinku vzorku (kapaliny) při působení smykového napětí mezi dvěma plochami. Nejčastěji se jedná o dva sousední válce, kde vnitřní válec (Obr. 3.14a pozice 2), který je zároveň měřicím tělesem, rotuje v měrné kapalině uzavřené ve válci vnějším (Obr. 3.14a pozice 1). Měření je následně moment síly M působící na vnitřní válec při stálé úhlové rychlosti ω [30]. Z těchto veličin a geometrických vlastností viskozimetru, jako jsou poloměry válců r_1 , r_2 a výška smýkané kapaliny h , je za předpokladu laminárního proudění dopočítána dynamická viskozita dle rovnice 3.20 [30].

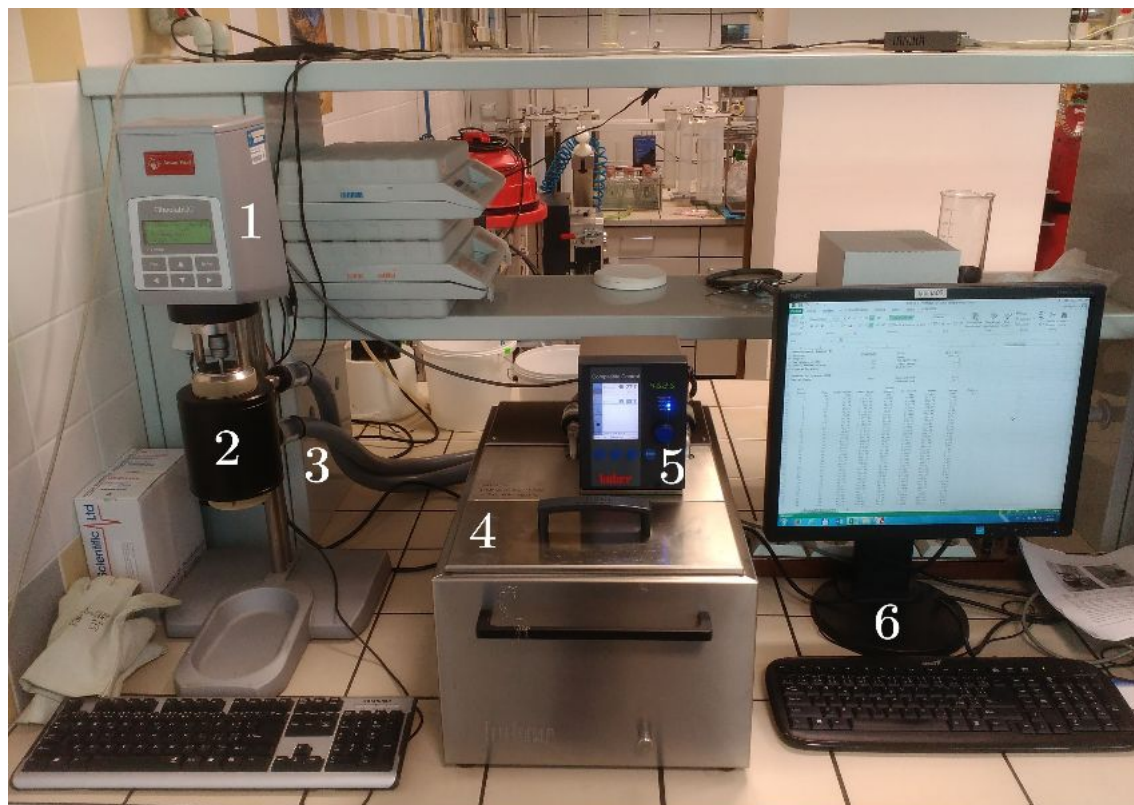
$$\eta = M \cdot \left(\frac{1}{r_1^2 - r_2^2} \right) \cdot \frac{1}{4\pi \cdot h \cdot \omega} \quad (3.20)$$

Pro eliminaci chyb způsobených reálným prouděním kapalin se do výpočtu měřicího přístroje zavádí řada korekcí [30]. Z elektricky změřeného momentu M pak snadno získáme hodnoty smykového napětí τ pro různé hodnoty rychlostního gradientu neboli smykové rychlosti dv/dy závisejícího na úhlové rychlosti rotačního válce ω a poloměrech r_1 a r_2 [30].

Mezi další metody měření dynamické viskozity patří měření kapilárním viskozimetrem. Tato metoda je založena na laminárním průtoku měrné kapaliny trubicí o určité délce a poloměru při tlakovém spádu mezi konci této trubice. Alternativní způsob měření viskozity je měření pádové rychlosti tělíska (nazývaného Stokesovo tělísko) v měřené kapalině [10]. V praxi se nejčastěji používají metody elektricky měřitelné, jako je například metoda měření rotačním viskozimetrem popsaná výše.

3.4.3 Provedení a vyhodnocení experimentu

Měření dynamické viskozity fugátu bylo provedeno na rotačním viskozimetru RheolabQC od firmy Anton Paar s parametry přístroje uvedenými v Tab. 3.7. Očekávaná viskozita fugátu spadá do intervalu měřitelných hodnot a také ostatní parametry přístroje vyhovují účelům měření. Celá měřicí sestava je popsána na Obr. 3.13. Vzhledem k tekutosti fugátu blíží se spíše vodě a oleji než pastovitým hmotám s vysokou viskozitou, byl zvolen měřicí systém CC39 obsahující měřící válec s nádobkou [31]. Funkce válcových ploch obklopující měrnou kapalinu je blíže popsána v kapitole 3.4.2. Na Obr. 3.14a je měřicí systém upnutý rychlospojkou (pozice 2) k viskozimetru (pozice 3). Měřicí systém je opláštěn nádobou obsahující temperační olej (Obr. 3.14a pozice 1). Teplota temperačního oleje je regulována termostatem (Obr. 3.14b pozice 5) v zásobníku (pozice 4). Naměřená data byla zpracována softwarem RheolabQC Data Export a následně exportována do Excelu (Obr. 3.13 pozice 6).



Obr. 3.13: Měřicí sestava dynamické viskozity fugátu složená z: rotačního viskozimetru RheolabQC (1), souosých měrných válců s fugátem (2), přítok a odtok temperační kapaliny do opláštění měrného válce (3), zásobníku s temperační kapalinou (4), termostatu pro regulaci teploty měření (5) a osobního počítače s nainstalovaným softwarem RheolabQC Data Export (6)

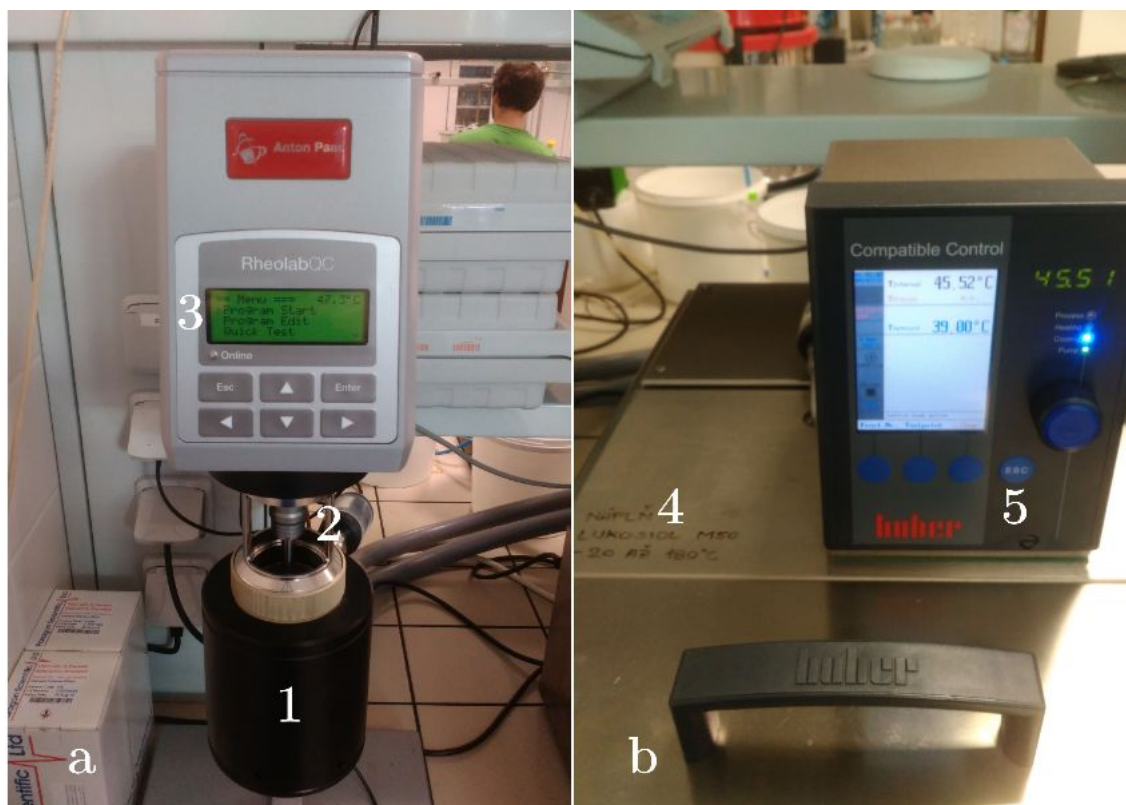
Tab. 3.7: Parametry měřicího přístroje RheolabQC [31]

Parametr	Rozsah	
	MIN	MAX
Otáčky [min^{-1}]	0,01	1500
Kroutící moment [mNm]	0,25	75
Smykové napětí [Pa]	0,5	$3 \cdot 10^4$
Smyková rychlost [s^{-1}]	0,01	4000
Viskozita [mPas]	1	10^9
Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	-20	180
Úhlové rozlišení [μrad]	2	

Měření dynamické viskozity fugátu bylo provedeno u každého vzorku 1–4 pro čtyři význačné teploty: 20, 40, 60 a 80 $^{\circ}\text{C}$. Tyto teploty byly zvoleny v závislosti na teplotách, při kterých se fugát nachází během zahušťovacího procesu. Teplota fugátu se během tohoto procesu může pohybovat v rozmezí od 20 $^{\circ}\text{C}$ (při odběru ze skladovací jímky), přes 38,4 $^{\circ}\text{C}$ (nejnižší naměřená teplota koncentráту na výstupu z odparky [2]), až po 72 $^{\circ}\text{C}$, jakožto nejvyšší teploty dosažené po ohřátí fugátu v ohřevné nádrži [2]. Toto teplotní rozmezí bylo při měření dynamické viskozity fugátu pokryto.

Fugát byl testován na náchylnost k hystereznímu chování. Toto chování se vyznačuje závislostí vlastností kapaliny na čase [12]. Ověření tohoto jevu na rotačním viskozimetru lze provést například měřením smykového napětí a dynamické viskozity při konstantní smykové rychlosti [29]. Toto měření nevykazovalo významnější výchyly v čase, jak je vidět v Tab.3.8 z rozdílu mezi maximálními a minimálními hodnotami veličin při konstantní smykové rychlosti $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$. Další možné ověření hysterezního chování fugátu proběhlo zvyšováním smykové rychlosti z 0 s^{-1} na 1200 s^{-1} a následným zpomalováním zpět do klidového stavu. Tato závislost je pro 40 $^{\circ}\text{C}$ a vzorek č. 1 na Obr. 3.15. Graf potvrzuje časovou nezávislost vlastností fugátu, jelikož se hysterezní smyčka netvoří. To znamená, že fugát nevykazuje vlastnosti tixotropní (hysterezní smyčka ve směru hodinových ručiček) ani reopektické kapaliny (hysterezní smyčka proti směru hodinových ručiček) [29].

Samotné měření dynamické viskozity fugátu tedy mohlo být provedeno při plynulém zvyšování smykové rychlosti. Tomu odpovídal přednastavený program viskozimetru CSR Ramp. Interval smykových rychlostí byl nastaven od 0 s^{-1} do 1200 s^{-1} . Doba zrychlování (doba jednoho měření) byla stanovena na 180 sekund. Během této doby bylo zaznamenáno 60 měřících bodů, což odpovídalo kroku smykové rychlosti 20 s^{-1} .



Obr. 3.14: Opláštění měřícího systému s temperačním olejem (a1), zapojení měřícího systému do viskozimetru rychlospojkou (a2), viskozimetr RheolabQC s rozhraním pro nastavení parametrů měření (a3), zásobník s temperačním olejem LUKOSIL M50 (b4) a termostat pro nastavení temperační teploty (b5)

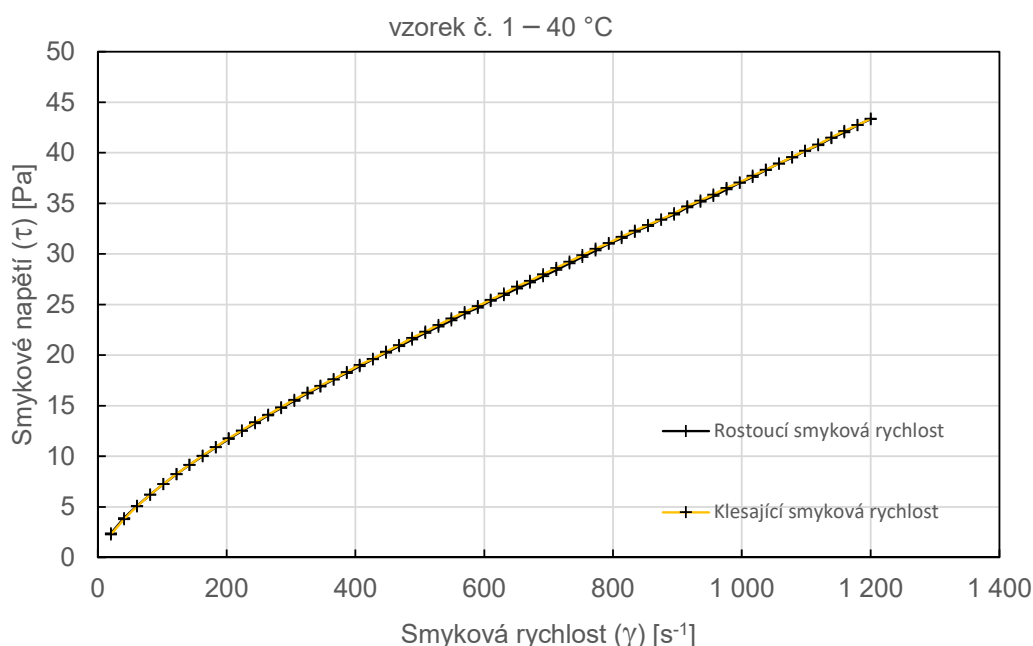
Data z měření jsou zpracována v grafech na Obr. 3.16. V každém grafu jsou vykresleny výsledky měření všech vzorků při jedné teplotě fugátu. Naměřená data jsou proložena mocninnou funkcí, která vystihuje rovnici 3.19 blíže popsanou v kapitole 3.4.2. Po dosažení smykové rychlosti $\dot{\gamma}$ do těchto rovnic získáme okamžité hodnoty smykového napětí τ a následně dosazením do Newtonova zákona (rovnice 3.16) hodnoty zdánlivé dynamické viskozity fugátu o podílu sušiny odpovídající číslu vzorku a teplotě uvedené v grafu. Tyto hodnoty dynamické viskozity jsou aproximovány mocninnou funkcí. Naměřené hodnoty jsou pak vykresleny v grafech na Obr. 3.17 v závislosti na smykové rychlosti.

Tvary křivek na Obr. 3.16 všech vzorků při každé teplotě fugátu odpovídají charakteristice pseudoplastické kapaliny. Tyto výsledky potvrzuje i další práce zabývající se měřením viskozity odpadních vod [25]. V jiné práci zabývající se měřením dynamické viskozity fugátu [24] je pseudoplastický charakter kapaliny pozorován pouze při vyšším podílu sušiny (10,94 hm.% [24]).

Při vyšších smykových rychlostech se průběh blíží charakteristice kapaliny new-

Tab. 3.8: Měření vlastností vzorku č. 1 při konstantní smykové rychlosti

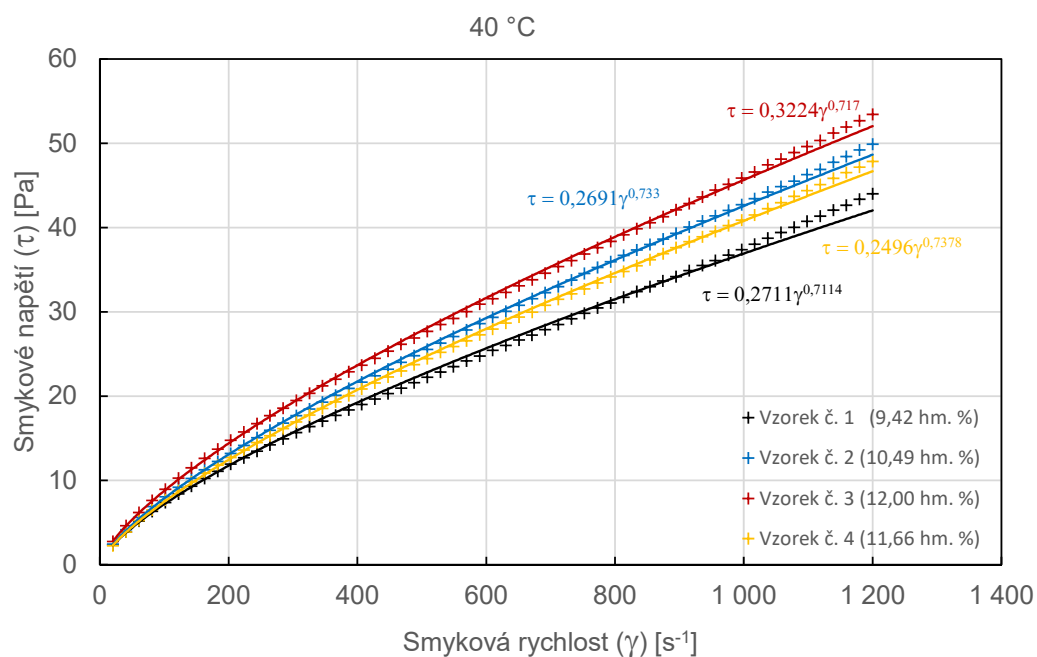
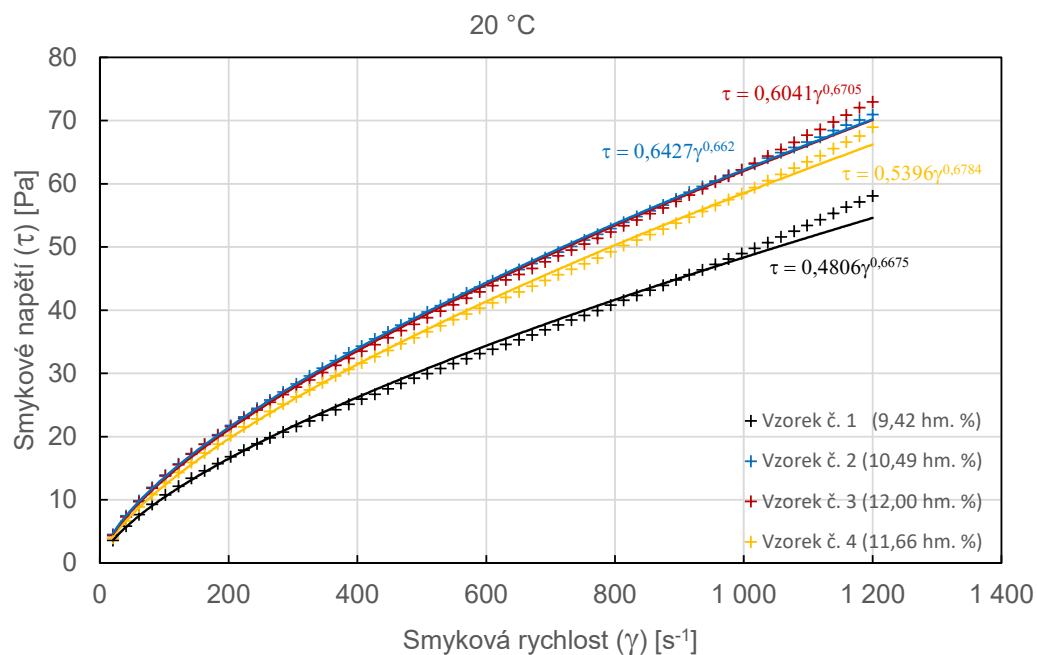
$\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ 20 °C	Smykové napětí [Pa]	Dynamická viskozita [Pas]
MIN	10,521	0,1052
MAX	10,764	0,1076
Rozdíl	0,244	0,0024

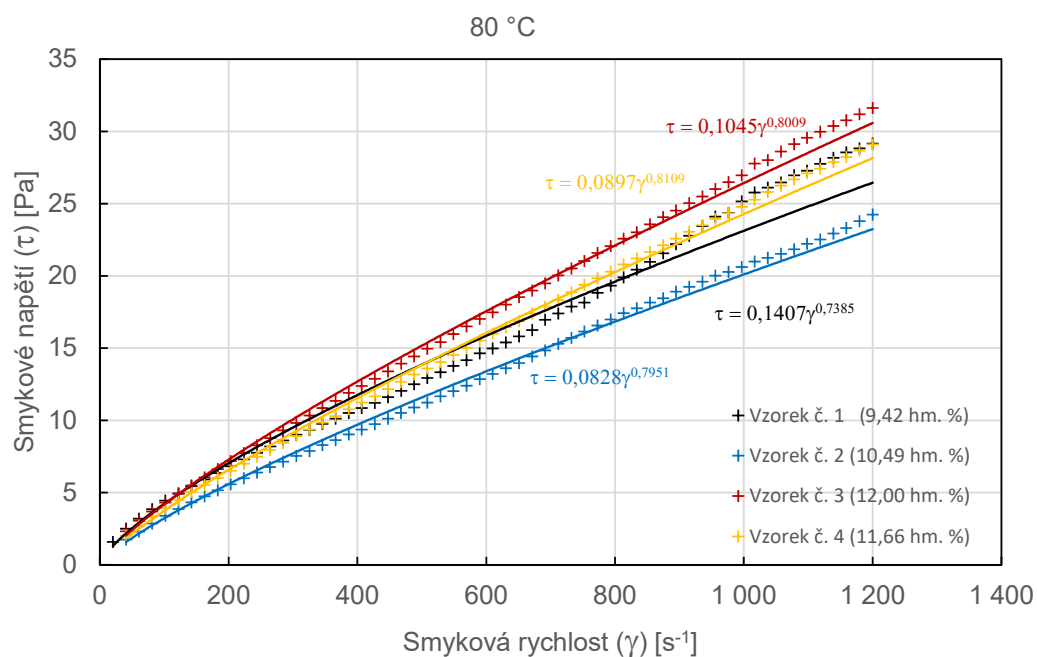
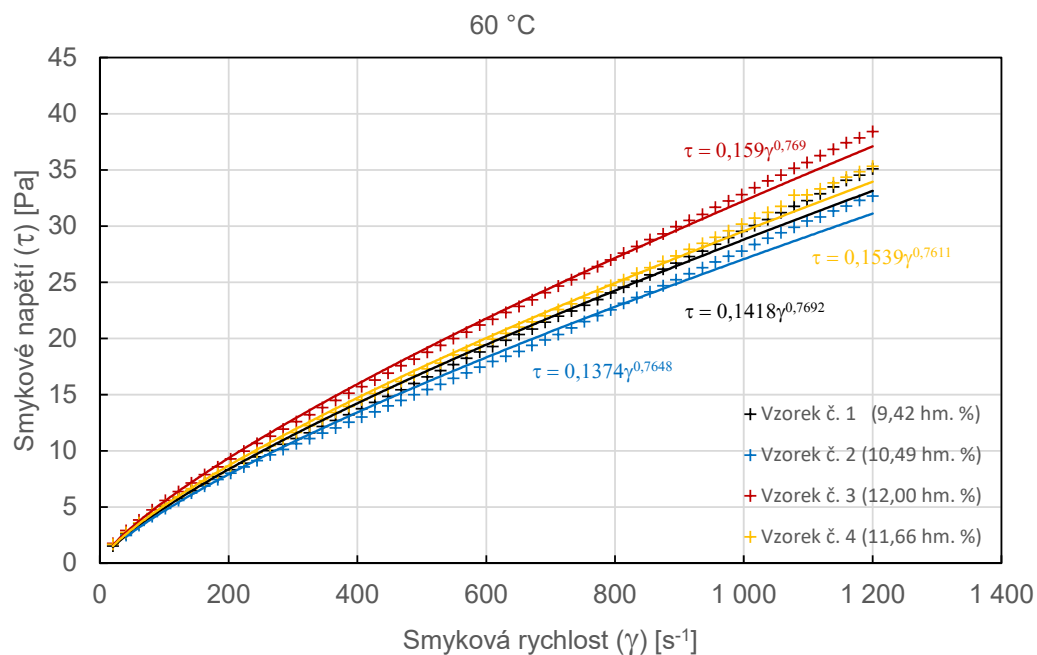


Obr. 3.15: Hysterezní smyčka sestavená zvyšováním smykové rychlosti do 1200 s^{-1} a následným snižováním zpět do klidového stavu

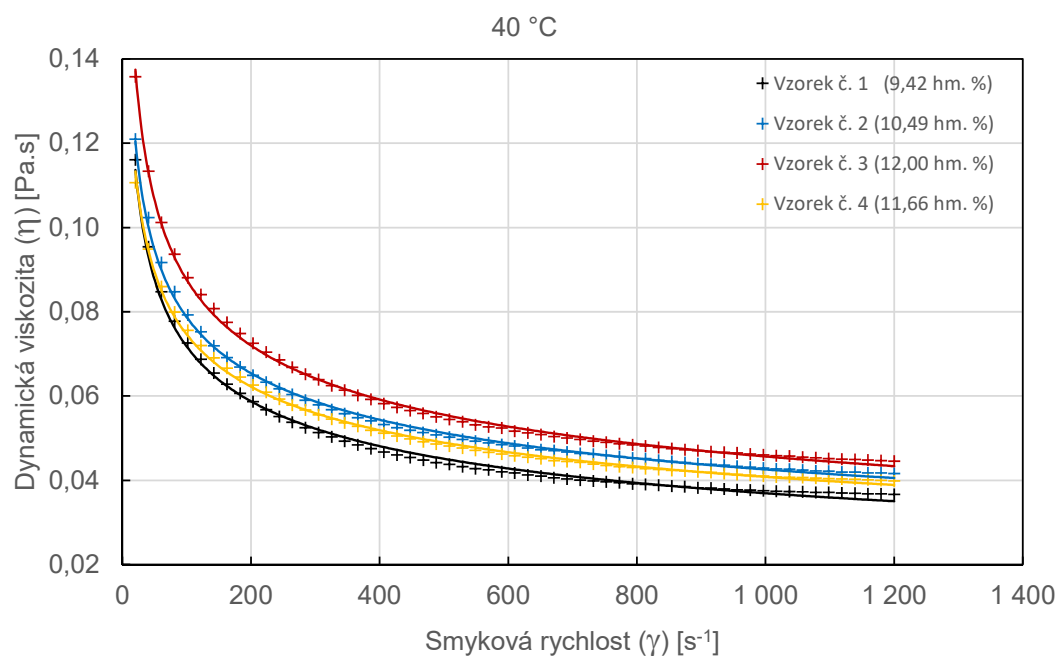
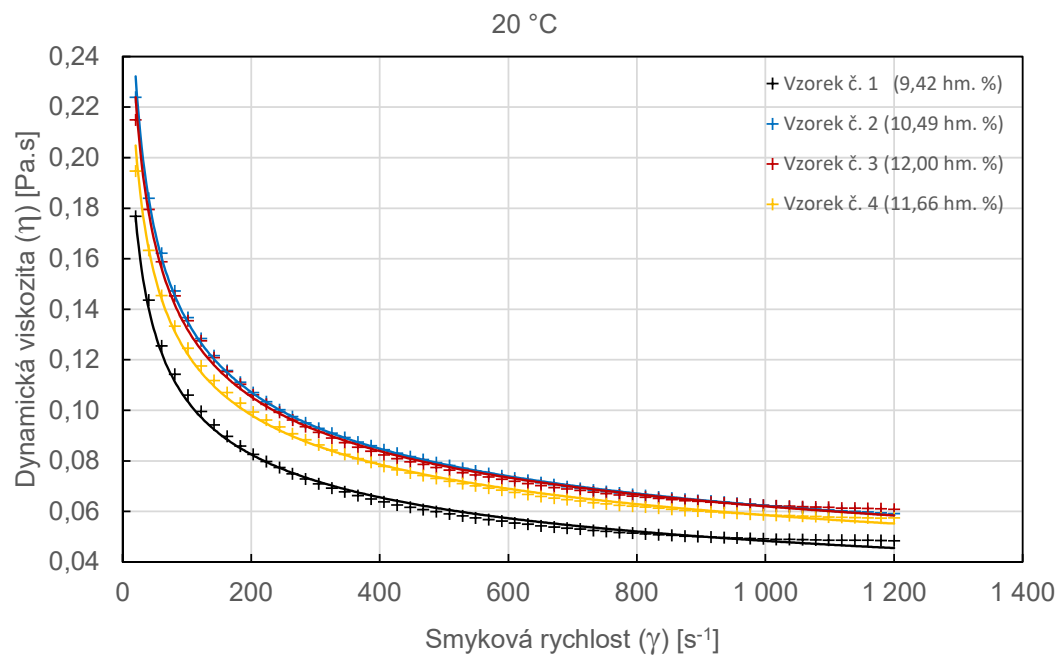
tonské. Tento jev je posílen také s narůstající teplotou. Nejvíce se newtonské kapalině blíží vzorek č. 2 při teplotě 80 °C . Tyto závěry podtrhují i grafy závislosti dynamické viskozity (spočítané softwarem RheolabQC Data Export pro každý bod měření z τ a $\dot{\gamma}$) na smykové rychlosti na Obr. 3.17, kde se s rostoucí smykovou rychlostí dynamická viskozita blíží konstantnímu (mírně klesajícímu) průběhu. K tomuto jevu s rostoucí teplotou fugátu dochází při stále nižších smykových rychlostech. Dynamická viskozita fugátu s narůstající teplotou dle očekávání klesá. Tento trend je možné vyvodit z klesající směrnice křivek v reogramu (Obr. 3.16) nebo přímo ze závislosti dynamické viskozity na smykové rychlosti (Obr. 3.17). Tuto závislost popisuje také literatura [25] a vychází i z teoretického základu v kapitole 3.4.2. Vliv podílu sušiny na dynamickou viskozitu dokazuje především vzorek č. 3. Ten se

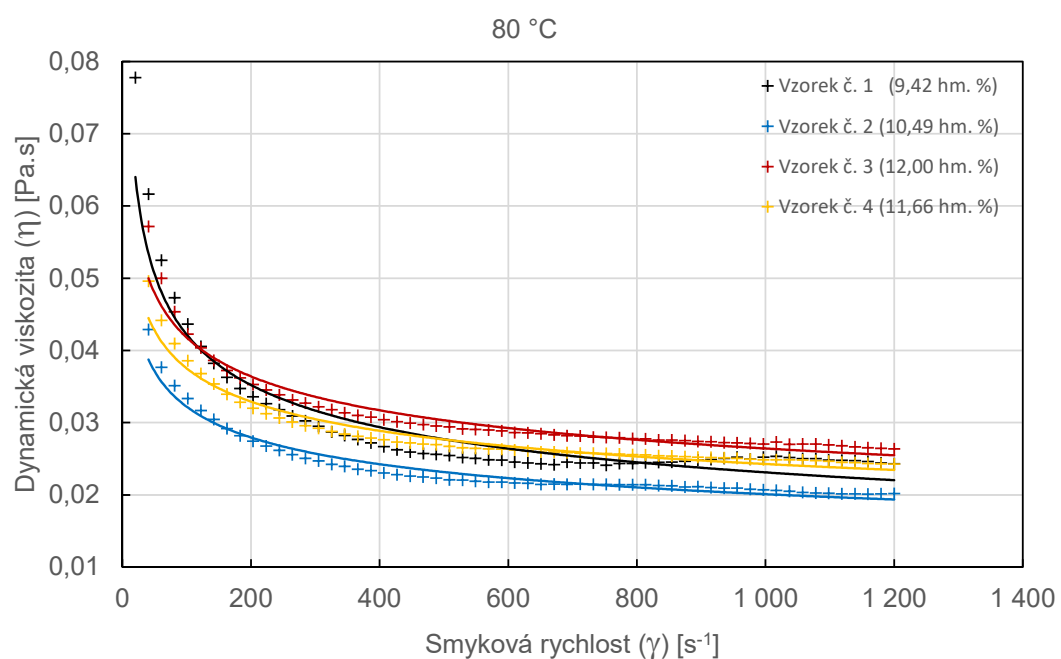
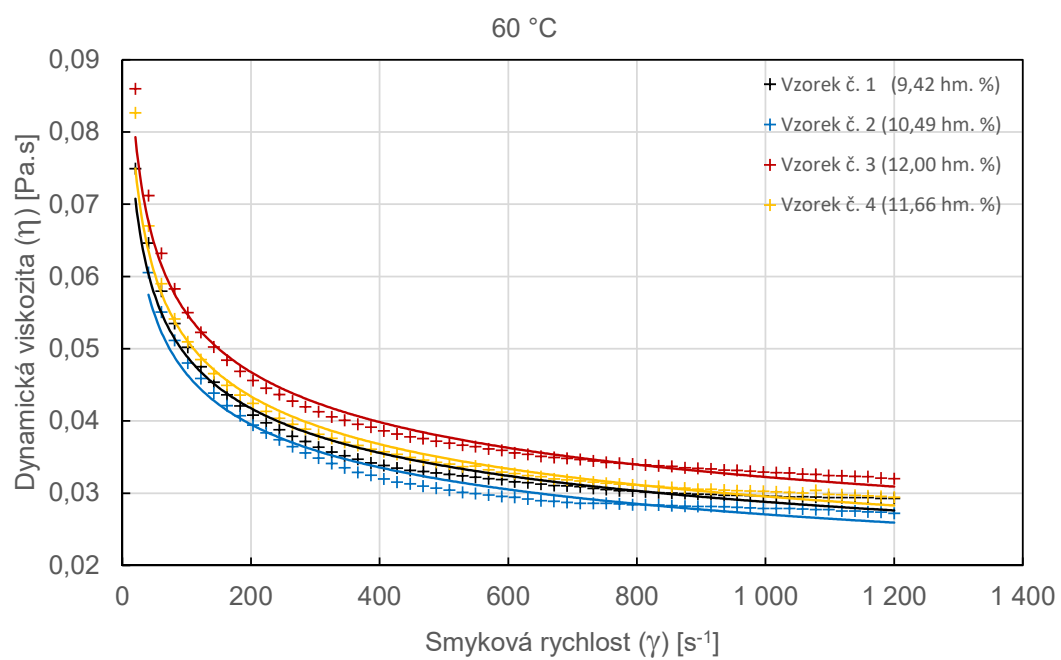
jakožto vzorek s nejvyšším podílem sušiny v grafu vyskytuje vždy v oblasti nejvyšší zdánlivé viskozity. U ostatních vzorků tato závislost již není tak zřejmá.





Obr. 3.16: Reogram: závislost smykového napětí na smykové rychlosti při teplotách 20, 40, 60 a 80 °C, naměřené hodnoty jsou proloženy mocninnou funkcí s předpisem uvedeným u každé křivky v grafu, předpis vyjadřuje rovnici 3.19, číselné koeficienty v jednotlivých rovnicích odpovídají koeficientům k a m , označení vzorků v legendě obsahuje informaci o podílu sušiny





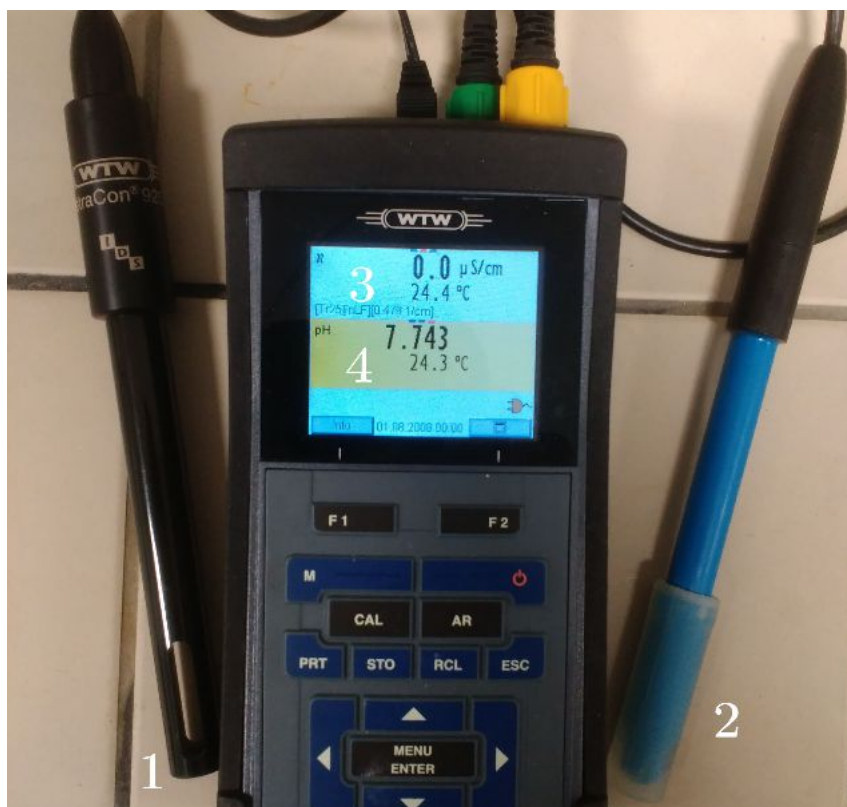
Obr. 3.17: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti, označení vzorků v legendě obsahuje informaci o podílu sušiny

3.5 Měrná elektrická vodivost

Měrná elektrická vodivost, neboli konduktivita (κ), charakterizuje míru koncentrace ionizovatelných látek v elektrolytu [32]. Ionty rozpuštěné v elektrolytu (solí, kyseliny, zásady) umožňují vést elektrický proud. V našem případě elektrolyt představuje odpadní voda z BPS, u které měříme proud přístrojem na Obr. 3.18. Přístroj pro měření konduktivity a pH se skládá z měřící sondy WTW TetraCon® 925 s elektrodami (Obr. 3.18 pozice 1) a měřící jednotky se zobrazením naměřených hodnot WTW Multi 3420 (Obr. 3.18 pozice 3). Chyba měření tohoto přístroje je dána chybou měření sondy, která je rovna $\pm 0,5$ % měřené hodnoty [33]. Tento údaj je uveden v manuálu k měřící sondě [33]. Při znalosti napětí mezi elektrodami sondy, jejich vzdálenosti a plochy, měřící přístroj (za předpokladu homogenního elektrického pole) dopočítá měrnou elektrickou vodivost média, které se mezi elektrodami nachází [34]. Konduktivitu lze taktéž definovat jako převrácenou hodnotu měrného elektrického odporu [35]. Jako jednotka konduktivity se při analýze odpadních vod používá $\mu\text{S}/\text{cm}$ u roztoku obsahující menší množství rozpuštěných částic (iontů) a mS/cm u roztoků s větším množstvím iontů [34]. Konduktivita závisí především na koncentraci vodivých iontů a jejich nábojovém čísle. Dále na pohyblivosti iontů a silně na teplotě elektrolytu (změna teploty o 1°C se projeví změnou konduktivity přibližně o 2 % [32]). Naměřené hodnoty konduktivity odpadních vod lze použít jako přibližnou míru koncentrace minerálních elektrolytů [35]. Dle hodnot měrné elektrické vodivosti odpadních vod tak můžeme velice snadno orientačně posoudit míru znečištění.

Měření měrné elektrické vodivosti fugátu bylo provedeno dne 30.3.2018 zároveň s měřením měrné tepelné kapacity a pH (kapitoly 3.3 a 3.6). Okolní teplota byla 23°C . Tato teplota se blíží standardní teplotě měření konduktivity 25°C [35] a ve výsledcích byla odchylka zanedbána. Relativní vlhkost vzduchu 24 % a atmosferický tlak $974,6\text{ hPa}$ neměly na měření vliv. Tyto hodnoty jsou shrnuty v příloze G. U každého vzorku byla konduktivita změřena třikrát ponořením sondy s elektrodami do kalorimetru s fugátem, vždy před měřením měrné tepelné kapacity. Výsledkem měření jsou průměrné hodnoty konduktivity ($\bar{\kappa}$) jednotlivých vzorků uvedené v Tab. 3.9 včetně směrodatné odchylky. Směrodatné odchylky jsou v porovnání s naměřenými hodnotami nízké, tudíž se dá měření považovat za spolehlivé při zaručení přesnosti měřící soustavy $\pm 0,5$ % naměřené hodnoty.

V grafu na Obr. 3.20 jsou hodnoty konduktivity srovnány s podílem sušiny. Z grafu plyne jistá závislost konduktivity na průběhu destilace. U vzorku č. 1, u kterého destilace neproběhla, je konduktivita téměř dvakrát větší než u vzorků č. 2, 3 a 4, u kterých destilace proběhla. Tento jev mohl nastat připečením značného podílu sušiny na stěny varné baňky při destilaci (více v kapitole 3.1).



Obr. 3.18: Kombinovaný měřicí přístroj (multimetr): sonda pro měření měrné elektrické vodivosti WTW TetraCon® 925 (1), sonda pro měření pH s elektrodou (2), display WTW Multi 3420 pro zobrazení hodnot měrné elektrické vodivosti včetně jednotek a aktuální teploty na sondě 1 (3), display WTW Multi 3420 pro zobrazení hodnot pH a aktuální teploty na sondě 2 (4)

Právě sušina obsahuje velké množství ionizovatelných organických i anorganických látek (viz příloha A), které zvyšují konduktivitu odpadní vody [32]. Rozbor připečené sušiny by mohl prokázat nebo vyvrátit tuto teorii. S daty, které máme k dispozici můžeme alespoň statisticky potvrdit možnou závislost konduktivity na tom, zda destilace proběhla (Ano) či nikoliv (Ne) (viz Tab. 3.9, jelikož koeficient korelace $r = -0,989$. Prudké snížení konduktivity destilovaných vzorků může být taktéž způsobeno odpařením velkého množství amoniaku, jehož ionty NH_4^+ jsou zdrojem vodivosti fugátu [2]. Nejnižší naměřená konduktivita u vzorku č. 2 může souviset s jeho nejnižší hustotou ze všech vzorků. Při nižší hustotě je jistý předpoklad menšího obsahu těžkých vodivých iontů ve fugátu. Tato závislost však není podložena žádným měřením.

Velikost měrné elektrické vodivosti fugátu je vysoká dle očekávání. O této vlastnosti fugátu rozhodují především látky ve fugátu rozpuštěné i nerozpuštěné, jejichž koncentrace jsou uvedeny v protokolu o zkoušce v příloze A. Pro srovnání spodní

Tab. 3.9: Průměrná měrná elektrická vodivost ($\bar{\kappa}$)

Č. vzorku	Měrná elektrická vodivost ($\bar{\kappa}$)	s [-]	Destilace
1	36,40	0,16	Ne
2	15,34	0,17	Ano
3	16,61	0,08	Ano
4	18,92	0,11	Ano

hranice intervalu konduktivity povrchových vod nejnižší jakosti činí 1,6 mS/cm [35].

3.6 pH

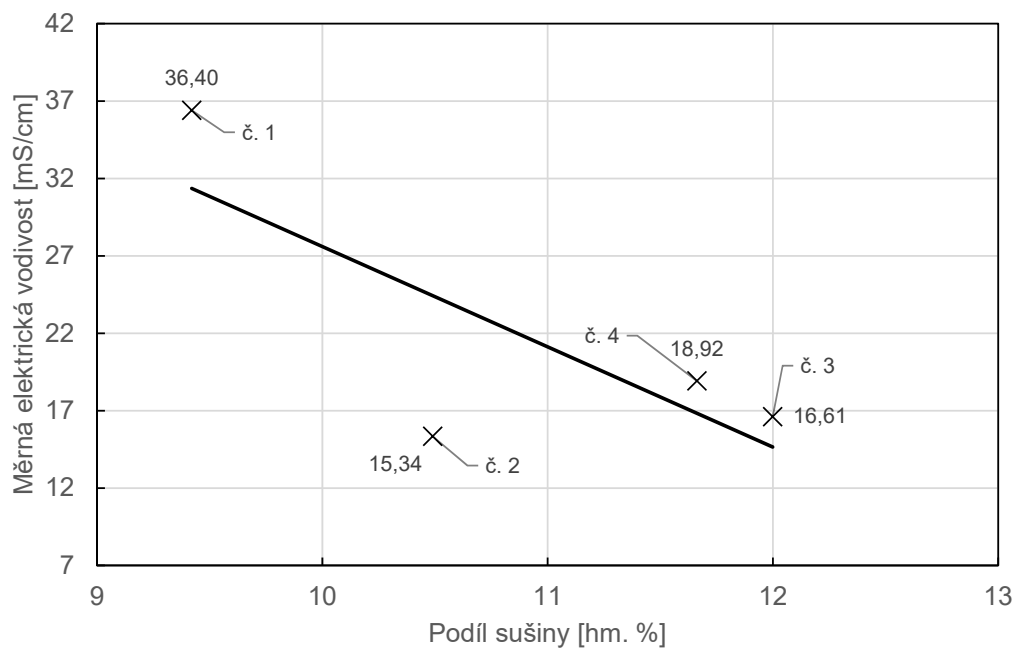
Koncentrace vodíkových iontů, zkráceně pH, je číslo vyjadřující záporný dekadický logaritmus aktivity vodíkových iontů [35]. Dekadický logaritmus při výpočtu pH funguje tak, že změna pH o jednotku je vyvolána desetinásobnou změnou koncentrace vodíkových iontů (H^+) [32]. Látky které mohou vodíkový ion uvolňovat nazýváme kyseliny a látky, které proton váží, nazýváme zásadami. Destilovaná voda má při 25 °C neutrální pH 7. Roztoky s pH větším než 7 nazýváme alkalické, pH menší než 7 značí kyselý roztok. Hodnota pH má velký vliv na průběh většiny chemických a biochemických procesů probíhajících v odpadních vodách [35].

Měření pH fugátu bylo provedeno paralelně a za totožných podmínek jako měření měrné tepelné kapacity a měrné elektrické vodivosti (kapitoly 3.5 a 3.3). Měřicí přístroj byl totožný jako pro měření konduktivity. Měřicí sonda pH s elektrodou je vidět na Obr. 3.18 pozice 2. Naměřené hodnoty jsou zobrazovány na displeji měřicího přístroje WTW Multi 3420 (Obr. 3.18 pozice 4). Sonda byla ponořena do kalorimetru s fugátem a po ustálení hodnot na displeji zapsána do tabulky. Tento postup se u každého vzorku opakoval třikrát.

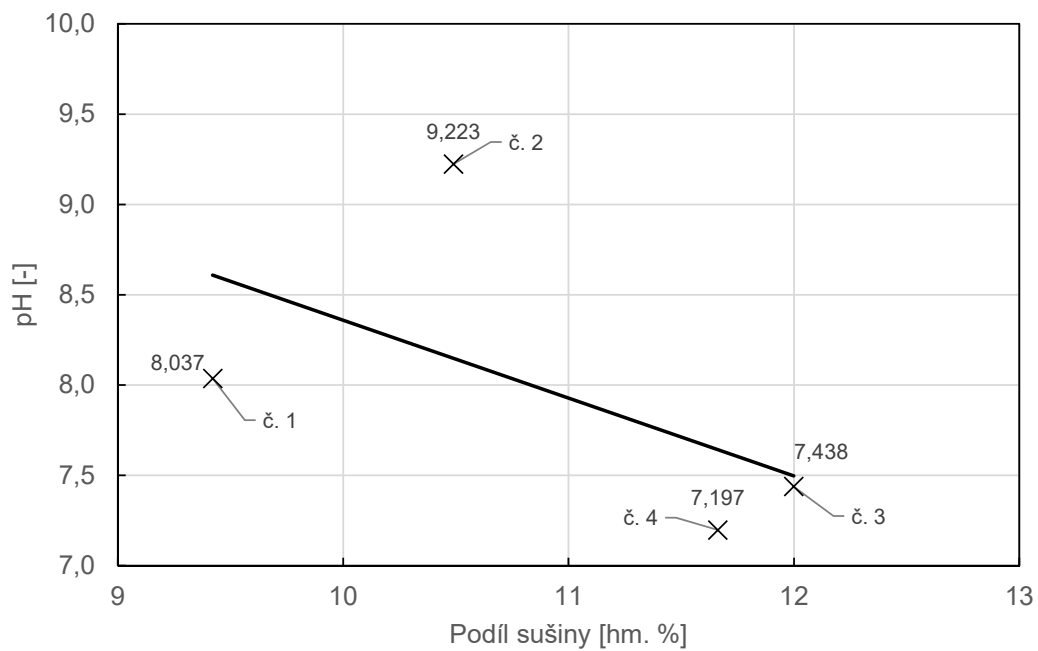
Tab. 3.10: Průměrné pH fugátu

Č. vzorku	pH	s [-]
1	8,037	0,012
2	9,223	0,017
3	7,438	0,008
4	7,197	0,005

Průměrné hodnoty pH jednotlivých vzorků jsou uvedeny v Tab. 3.10 včetně směrodatných odchylek. Závislost pH na podílu sušiny je vidět na Obr. 3.6. Obecně hodnota pH klesá s rostoucím podílem sušiny. Výraznější závislost však mezi hodnotami podílu sušiny a pH nalezena nebyla. Nejvýznamnější je hodnota pH vzorku č. 1 ($pH = 8,037 \pm 0,012$) a hodnota pH fugátu z protokolu o zkoušce v příloze A ($pH = 8,4$). Tyto hodnoty se dají využít pro výpočty před zahájením zahušťování fugátu. Před přidáním oleje lze využít hodnotu $pH = 8,4$ (viz kapitola 2.5), po přidání oleje pak hodnotu $pH = 8,037$ (viz kapitola 2.6.2). Naměřené hodnoty pH jsou kromě vzorku č. 2 v souladu s typickými hodnotami pH digestátu pohybující se od 7,5 do 8,0 [28].



Obr. 3.19: Závislost měrné elektrické vodivosti na podílu sušiny



Obr. 3.20: Závislost pH na podílu sušiny

4 ZÁVĚR

Hlavní náplní této práce je příprava experimentu, měření fyzikálních vlastností fugátu a následné vyhodnocení naměřených dat s odkazem na teoretické základy a dostupnou literaturu. Celý průběh experimentu byl uzpůsoben vývoji zařízení pro zahušťování odpadních vod z BPS. Toto uzpůsobení se týká především místa odběru vzorku, výběru měřených vlastností (externě i v rámci bakalářské práce), posouzení faktorů, které vybrané vlastnosti ovlivňují a v neposlední řadě pak simulace procesu odpařování v jednoduché destilační aparatuře.

Výchozí charakteristikou fugátu, která slouží k porovnání všech dalších naměřených fyzikálních i chemických vlastností, je podíl sušiny. Regulace podílu sušiny během přípravy vzorků fugátu proběhla jednoduchou destilací. Vysoká pěnivost vzorků byla potlačena přidáním protipěnicího přípravku (řepkového oleje). Výsledné rozmezí podílu sušiny je 9,42–12,00 hm. %.

Trend hustoty fugátu je s rostoucím podílem sušiny klesající, což je v rozporu s naměřenými hodnotami v pracích zabývající se stejnou problematikou [24, 2]. Klesající závislost hustoty fugátu na rostoucím podílu sušiny uvádí disertační práce [25]. V této práci je však zkoumanou látkou čistírenský kal o hustotě výrazně nižší než hustota fugátu. Orientačním výsledkem měření je průměrná hustota fugátu všech vzorků $1061,92 \pm 3,66 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ v rozmezí 9,42–12,00 hm. % sušiny. Velice důležitým parametrem je difference mezi hustotou fugátu a vody, která má vliv například při ředění fugátu vodou [2] nebo sedimentaci tuhých částic ve fugátu [36].

Měrná tepelná kapacita fugátu klesá s rostoucím podílem sušiny vlivem procentuálního úbytku vody, jakožto látky s nejvyšší měrnou tepelnou kapacitou. I přes poměrně velkou variabilitu naměřených dat je vhodné použít výsledky této práce při výpočtech operujících s měrnou tepelnou kapacitou odpadních vod z BPS namísto v praxi často používané aproximace měrnou tepelnou kapacitou vody. Aproximační hodnotou měrné tepelné kapacity fugátu je její průměrná hodnota $3853,32 \pm 19,53 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ v rozsahu 9,42–12,00 hm. % sušiny.

Měřením dynamické viskozity byl potvrzen pseudoplastický charakter fugátu [25], tedy klesající závislost zdánlivé viskozity na rostoucím smykovém napětí. Závislost viskozity na podílu sušiny je v celém spektru měření pozorovatelná pouze mezi vzorkem s nejvyšším a nejnižším podílem sušiny. V tomto případě pozorujeme nárůst zdánlivé viskozity se stoupajícím podílem sušiny ve fugátu, což lze vysvětlit zvýšenou mírou blokace ideálního proudění kapaliny tuhými částicemi. U ostatních vzorků tato závislost kolísá. Klesající trend závislosti dynamické viskozity fugátu na teplotě byl potvrzen. Minimální zdánlivá viskozita $20,11 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ byla naměřena u vzorku č. 2 s podílem sušiny 10,49 hm. % při teplotě 80°C a smykové rychlosti $1159,33 \text{ s}^{-1}$. Demineralizovaná voda má při stejných podmínkách dynam-

ickou viskozitu $0,35 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ [12], tedy téměř šedesátkrát menší.

Fugát nevykazuje výraznější odchylku pH od standardních hodnot u odpadních vod z BPS [28] a osciluje kolem hodnoty 8,0. Konduktivita fugátu je u vzorků, které prošly destilací výrazně odlišná od vzorku, který destilací neprošel. Tento jev může negativně ovlivnit proces zahušťování. Jeho cílem je mimo jiné zachovat organický a anorganický obsah fugátu [2], což souvisí i se zachováním hodnoty konduktivity.

Všechny výsledky bakalářské práce mohou být použity nejen pro další vývoj zařízení pro zahušťování fugátu, ale také pro další výzkumnou a vývojovou činnost v oblasti odpadového hospodářství v zemědělském sektoru. Další experimentální činnost by mohla směřovat k bližšímu popisu vlastností destilátu vzniklého při vakuovém odpařování fugátu a způsobům jeho využití v zemědělství.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Po fotovoltaiice skončí i boom bioplynových stanic* / E15.cz [online][cit. 22. května 2018]. Aug. 2012. URL: <http://zpravy.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/po-fotovoltaiice-skonci-i-boom-bioplynovych-panic-908891>.
- [2] Marek Vondra. “Zařízení pro zahušťování odpadní vody z bioplynových stanic”. PhD thesis. Vysoké učení technické v Brně, 2017, p. 138.
- [3] Oto Budín. *Zpracování fermentačních zbytků z bioplynových stanic*. Vysoké učení technické v Brně, 2017, p. 68.
- [4] Oto Budín. *Nakládání s odpady z bioplynových stanic*. Vysoké učení technické v Brně, 2015, p. 41.
- [5] agriKomp Bohemia s.r.o. *Bioplynové stanice* [online][cit. 23. května 2018]. 2015. URL: <http://www.sunfin.cz/cs/page/bioplynové-panic/>.
- [6] Česká bioplynová Asociace. *Bioplynová stanice Bořetice* [online][cit. 12. dubna 2018]. 2011. URL: <http://www.czba.cz/mapa-bioplynovych-panic/177-bioplynova-panic-boretice.html>.
- [7] agriKomp Bohemia s.r.o. *Provozní deník*. Brno (CZ), 2018.
- [8] Marie Štrejbarová. *Srovnání výroby kukuřičných siláží a siláží ze zavadlé píce*. Mendelova Univerzita v Brně, 2014, p. 39.
- [9] *Norma ČSN EN 15934*.
- [10] Jaroslav Medek, Miloš Moláček, and Josef Uherek. *Experimentální práce*. 1987, p. 114.
- [11] Baogen Duan et al. “Description of ionic surfactant/water system by adjusting mesoscopic parameters”. In: *Journal of Physical Chemistry B* 113 (2009).
- [12] Ing. František Šob. *Hydromechanika*. Brno, 2008, p. 238. ISBN: 978-80-214-3578-0.
- [13] Prof. Ing. Milan Pavelek. *Termomechanika*. Brno, 2011, p. 192. ISBN: 978-80-214-4300-6.
- [14] Bc. Tomáš Jurčák. *Komparace elektrických vlastností alternativních elektroizolačních kapalin a minerálních olejů*. Vysoké učení technické v Brně, 2016, p. 60.
- [15] Katherine Denniston, Joseph Topping, and Robert Caret. *General, Organic , Biochemistry*. 2008, p. 821. ISBN: 9780073511108.
- [16] *Norma ČSN EN ISO 3405*.

- [17] Dabao Zhang. “A Coefficient of Determination for Generalized Linear Models”. In: *The American Statistician* 71.4 (2016), p. 19.
- [18] Bhola R. Gurjar and Vinay Kumar Tyagi. *Sludge Management*. 2017, p. 304. ISBN: 978-1-138-02954-5.
- [19] Inc Metcalf & Eddy. *Wastewater engineering: treatment disposal and reuse*. 1991, p. 1819. ISBN: 0070418780.
- [20] *Norma ČSN EN 12880*.
- [21] *Norma ČSN EN 14346*.
- [22] Jan Kotek. *Laboratorní technika*. Univerzita Karlova v Praze, p. 105.
- [23] Daniel L. Gysling. *Fluid density measurement using acoustic pressures for industrial sensing applications*. 2006. DOI: 10.1074/JBC.274.42.30033.(51).
- [24] Miroslav Rebej. *Měření vybraných fyzikálních vlastností odpadních vod z bioplynových stanic*. Vysoké učení technické v Brně, 2016, p. 40.
- [25] Thomas ELSÄßER. “Perspective methods of sewage sludge utilisation for energy production”. PhD thesis. Vysoké učení technické v Brně, 2011, p. 115.
- [26] Zdeněk Karpíšek, Pavel Popela, and Josef Bednář. *Statistika a pravděpodobnost*. Brno, 2006, p. 59.
- [27] Setaram Instrumentation. “Heat capacity determination”. In: *Technical Note* (), p. 6.
- [28] Bernhard Drosig et al. *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing*. 2015, p. 40. ISBN: 9781910154168.
- [29] Jaroslav Janalík. *Viskozita tekutin a její měření*. VŠB TU Ostrava, 2010, p. 65.
- [30] Renata Holubová. *Základy Reologie a Reometrie Kapalin*. Olomouc, 2014, p. 50. ISBN: 9788024441788.
- [31] Anton Paar GmbH. *Návod k použití RheolabQC*. Ostfildern, 2008, p. 46.
- [32] Michal Bc. Kunert. *Hodnocení vlivu čistíren odpadních vod na kvalitu vody v recipientu*. Univerzita Karlova v Praze, 2013, p. 78. ISBN: 0021620857.
- [33] WTW GmbH. *Multi 3420 conductivity meter manual*. Weilheim, 2011.
- [34] Matěj Vykoukal. *Měření elektrické vodivosti kolagenu*. České vysoké učení technické v Praze, 2016, p. 42.
- [35] Barbora Musilová. *Hodnocení jakosti vody – soustava rybníků u Velkého Meziříčí*. Mendelova univerzita v Brně, 2013, p. 55.
- [36] agriKomp Bohemia s.r.o. “Nová technologie na úpravu kapalně frakce digestátu”. In: (2017).

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

Symbol	Význam	Jednotka
P_{el}	elektrický výkon	[kW _{el}]
P_{th}	tepelný výkon	[kW _{th}]
Q	teplo	[J]
p	tlak	[Pa]
t	teplota	[°C]
T	teplota	[K]
m	hmotnost	[kg]
m	objem	[m ⁻³]
c	měrná tepelná kapacita	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
ΔT	změna teploty	[°C]
T_{tot}	celková doba zdržení substrátu v reaktorech	[kW _{th}]
V_F	pracovní objem fermentoru	[m ³]
V_D	pracovní objem dofermentoru	[m ³]
m_{tot}^{den}	celková denní vstupní dávka	[t]
HZ	hmotnostní zlomek	[—]
$m_{sur,i}^{den}$	průměrná hmotnost denní dávky i-té suroviny	[t]
N_{vzor}	počet vzorků	[—]
TS_{MIN}	minimální podíl sušiny	[%]
TS_{MAX}	maximální podíl sušiny	[%]
$TS_{exp,i}$	očekávaný podíl sušiny i-tého vzorku	[%]
V_{MIN}	minimální objem vzorků pro měření příslušné veličiny	[kg · m ⁻³]
V_{tot}	vstupní objem fugátu do experimentů bez rezervy	[kg · m ⁻³]
$m_{vzor,i}^{pred}$	hmotnost i-tého vzorku před destilací	[g]
$m_{dest,i}^{po}$	hmotnost destilátu po ukončení destilace	[g]
$c_{oil,i}^{pred}$	koncentrace oleje před destilací ve vzorku č. i	[ml/l]
$c_{oil,i}^{po}$	koncentrace oleje před destilací ve vzorku č. i	[ml/l]
$m_{vreal,i}^{pred}$	reálná (zvážená) hmotnost vzorku před destilací	[g]
$m_{dreal,i}^{po}$	reálná (zvážená) hmotnost vzorku po destilaci	[g]
$TS_{real,i}$	podíl sušiny vypočítaný z reálných hodnot po destilaci	[%]
Δ	hmotnostní ztráta	[g]
m_{dreal}	hmotnost destilátu	[g]
R^2	koeficient determinace	[—]

Symbol	Význam	Jednotka
TS	podíl sušiny	[%]
$\overline{TS}$	průměrný podíl sušiny	[%]
s	směrodatná odchylka	[—]
m_{DM}	hmotnost sušiny	[g]
m_{VZ}	hmotnost vzorku před sušením	[g]
m_A	hmotnost anorganických látek v sušině	[g]
A	podíl anorganických látek v sušině	[%]
m_O	hmotnost organických látek v sušině	[g]
O	podíl organických látek v sušině	[%]
$\Delta_{per.}$	procentuální úbytek hmotnosti	[%]
$\Delta_{hm.}$	hmotnostní úbytek	[g]
m_{MF}	hmotnost misky s fugátem	[g]
m_M	hmotnost misky	[g]
m_F	hmotnost fugátu	[g]
m_{MS}	hmotnost misky se sušinou	[g]
ρ	hustota (měrná hmotnost)	[kg · m ⁻³]
m_P	hmotnost pyknometru	[g]
m_{PF}	hmotnost pyknometru s fugátem	[g]
V_P	objem pyknometru	[ml]
$\bar{\rho}$	průměrná hustota fugátu	[kg · m ⁻³]
r	korelační koeficient	[—]
c	měrná tepelná kapacita	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
c_p	měrná tepelná kapacita za stálého tlaku	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
c_v	měrná tepelná kapacita za stálého objemu	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
dQ	přenesené teplo	[J]
dT	změna teploty	[K]
C_K	tepelná kapacita kalorimetru	[J · K ⁻¹]
c_{H_2O}	měrná tepelná kapacita vody	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
t_i	počáteční teplota (initial)	[°C]
t_h	teplota teplé vody (hot)	[°C]
t_f	koncová teplota (final)	[°C]
m_K	hmotnost kalorimetru	[g]
m_{h,H_2O}	hmotnost teplé vody (hot)	[g]
m_{c,H_2O}	hmotnost studené vody (cold)	[g]

Symbol	Význam	Jednotka
dQ_{h,H_2O}	teplo dodané teplou vodou	[J]
dQ_{c,H_2O}	teplo odebrané studenou vodou	[J]
dQ_K	teplo odebrané kalorimetrem	[J]
dQ_F	teplo odebrané fugátem	[J]
$\bar{c}_p$	průměrná měrná tepelná kapacita fugátu	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
η	dynamická viskozita	[Pa · s]
τ	smykové napětí	[Pa]
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost (rychlostní gradient)	[s ⁻¹]
dv/dy	smyková rychlost (rychlostní gradient)	[s ⁻¹]
ν	kinematická viskozita	[m ² · s ⁻¹]
v	rychlost	[m · s ⁻¹]
k	koeficient koexistence	[–]
m	exponent newtonského toku	[–]
τ_0	mez tekutosti	[Pa]
M	moment síly	[Nm]
ω	úhlová rychlost	[s ⁻¹]
r	poloměr	[m]
h	výška	[m]
κ	měrná elektrická vodivost (konduktivita)	[mS · cm ⁻¹]
$\bar{\kappa}$	průměrná konduktivita	[mS · cm ⁻¹]
pH	pH	[–]

Zkratka	Význam
BPS	bioplynová stanice
FSI	Fakulta strojního inženýrství
VUT	Vysoké učení technické
KJ	kogenerační jednotka
IBC	intermediate bulk container
BP	bakalářská práce
FUG	fugát
č.v.	číslo vzorku
TS	total solids
DM	dry matter

SEZNAM PŘÍLOH

A	Příloha A: Protokol o zkoušce	77
B	Příloha B: Průběh destilace	80
C	Příloha C: Destilační křivky	81
D	Příloha D: Naměřené hodnoty, podíl sušiny (TS)	83
E	Příloha E: Naměřené hodnoty, hustota (ρ)	84
F	Příloha F: Naměřené hodnoty, měrná tepelná kapacita (c)	85
G	Příloha G: Okolní podmínky měření	86

A Příloha A: Protokol o zkoušce



Zkušební laboratoř Brno
 Polní 23/340, 639 00 Brno

**PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 3352/2018**

Strana: 1
 Stran celkem: 2

Zákazník: agriKomp Bohemia s.r.o.
 Ostopovická 756/10
 664 47 Střelice

Analyzovaný materiál: digestát
Datum a čas příjmu: 26.2.2018 13:23
Datum analýzy: 26.2.2018 - 7.3.2018
Datum odběru: 12.2.2018
Odběr provedl: Zákazník

Č. vzorku	Označení vzorku				
5124	Fugát (odběr 12.2.2018)				
Parametr	jednotka	č.vzorku: 5124	NM	Identifikace zkušební metody	Akr
Rozpuštěné látky	mg/l	43600	12%	GRA 01:ČSN 757346	(1) A
Nerozpuštěné látky	mg/l	57600	12%	GRA 01:ČSN EN 872	(1) A
CHSK Cr	mg/l	83900	10%	VOL 05:ČSN ISO 6060	(1) A
Síra	mg/l	506	20%	ICP 02:ČSN EN ISO 11885	(1) A
Sušina	%	8,50	10%	GRA 03A:ČSN 720102, ČSN EN 14346	(1) A
Spalitelné látky	% suš.	63,1	10%	GRA 04A:ČSN EN 12879, ČSN 465735	(1) A
Amoniakální dusík	mg/l	3200	20%	SPE 12:ČSN ISO 7150-1	(1) A
Dusičnany	mg/l	<0,01		SPE 08:ČSN ISO 7890-3	(1) N
Dusitany	mg/l	0,15		SPE 09:ČSN EN 26777	(1) N
Dusík celkový	mg/l	8720	10%	VOL 11A:ČSN 465735, ČSN EN 13342	(1) A
pH		8,4		ECH 01B:ČSN 465735, ČSN EN 12176, ČSN ISO 10390	(1) A
Vápník	mg/l	1490	20%	ICP 02:ČSN EN ISO 11885	(1) A
Hořčík	mg/l	479	20%	ICP 02:ČSN EN ISO 11885	(1) A
Draslík	mg/l	6340	20%	ICP 02:ČSN EN ISO 11885	(1) A
Fosfor celkový	mg/l	586	20%	ICP 04A:ČSN EN ISO 11885	(1) A
Chrom	mg/kg suš.	9,13	20%	ICP 04A:ČSN EN ISO 11885	(1) A
Měď	mg/kg suš.	79,3	20%	ICP 04A:ČSN EN ISO 11885	(1) A
Arsen	mg/kg suš.	<0,59		ICP 03B:ČSN EN ISO 17294-2	(1) A
Kadmium	mg/kg suš.	0,27	20%	ICP 03B:ČSN EN ISO 17294-2	(1) A
Rtuť	mg/kg suš.	0,765	20%	AAS 06-07:ČSN EN ISO 16968, EN ISO 16968, ČSN 465735, ČSN EN 71-3, JPP ÚKZUZ 03	(1) A
Molybden	mg/kg suš.	10,2	20%	ICP 03B:ČSN EN ISO 17294-2	(1) A
Nikl	mg/kg suš.	8,58	20%	ICP 04A:ČSN EN ISO 11885	(1) A
Olovo	mg/kg suš.	1,48	20%	ICP 03B:ČSN EN ISO 17294-2	(1) A
Zinek	mg/kg suš.	373	20%	ICP 04A:ČSN EN ISO 11885	(1) A

Poznámka:

Pro stanovení rozpuštěných a/nebo nerozpuštěných látek byl použit filtr ze skleněných mikrovláken Filpap Z8, ϕ 47 mm.
 Pro stanovení kovů byl vzorek extrahován lučavkou královskou dle ISO 11466.

pH měřeno v původním vzorku

Číslice u označení zkušební metody označuje pracoviště, na kterém byl parametr stanoven: 1-Labtech Brno, Polní 23/340, 639 00 Brno;

2-Labtech Paskov, Rudé armády 637,739 21 Paskov; 4-Hygienické laboratoře Klatovy, Pod Nemocnicí 683,339 01 Klatovy;

4a-Labtech Sušice, Pražská 1087,342 01 Sušice



Zkušební laboratoř Brno
Polní 23/340, 639 00 Brno



PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 3352/2018

Strana: 2
Stran celkem: 2

Nejistota měření (NM) je definována jako rozšířená nejistota měření na hladině významnosti 95% s koeficientem rozšíření $k=2$ a nezahrnuje nejistotu odběru. Nejistota je vyjádřena v souladu s EA-4/16. K hodnotám výsledků pod spodní a nad horní mezí stanovitelnosti se nejistota nevztahuje.

Informace "Akr" rozlišuje akreditované (A) a neakreditované (N) standardní operační postupy (SOP). Zkoušky s uděleným flexibilním rozsahem akreditace jsou označeny FRA. Akreditované zkoušky provedené v jiné laboratoři jako subdodávky jsou označeny SA.

Výsledky zkoušek se týkají pouze zkoušených předmětů uvedených výše.

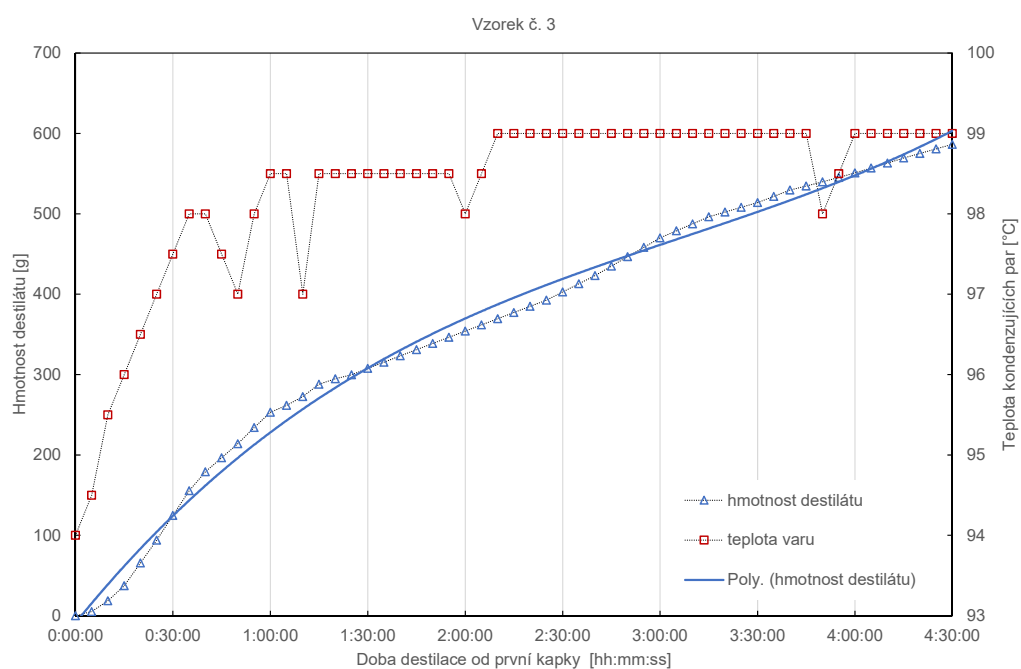
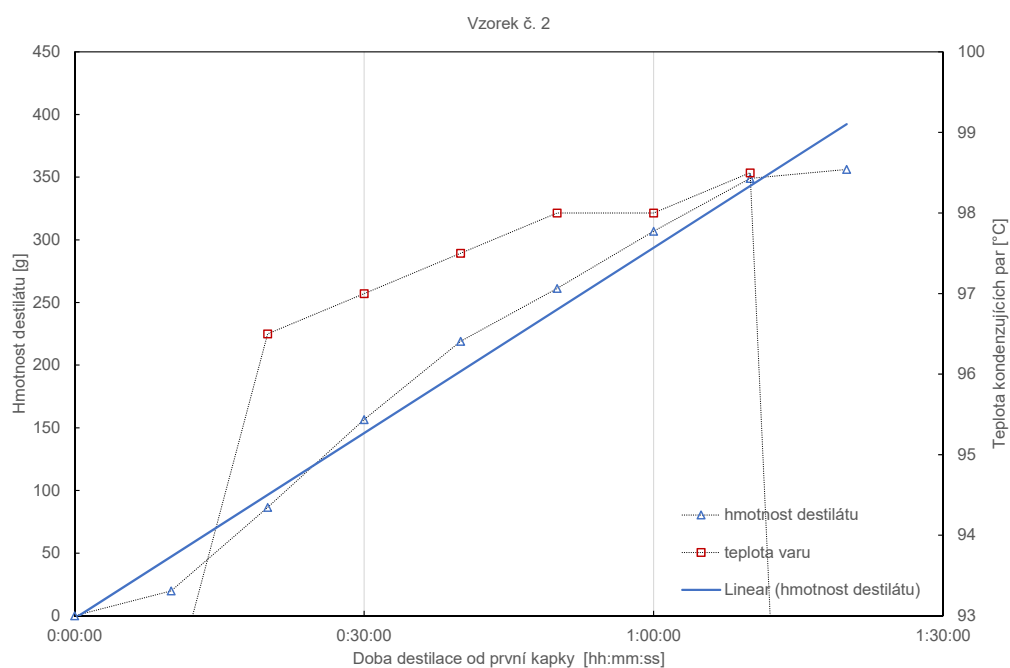
Protokol nenahrazuje jiné dokumenty, např. správního charakteru a státního odborného dozoru.

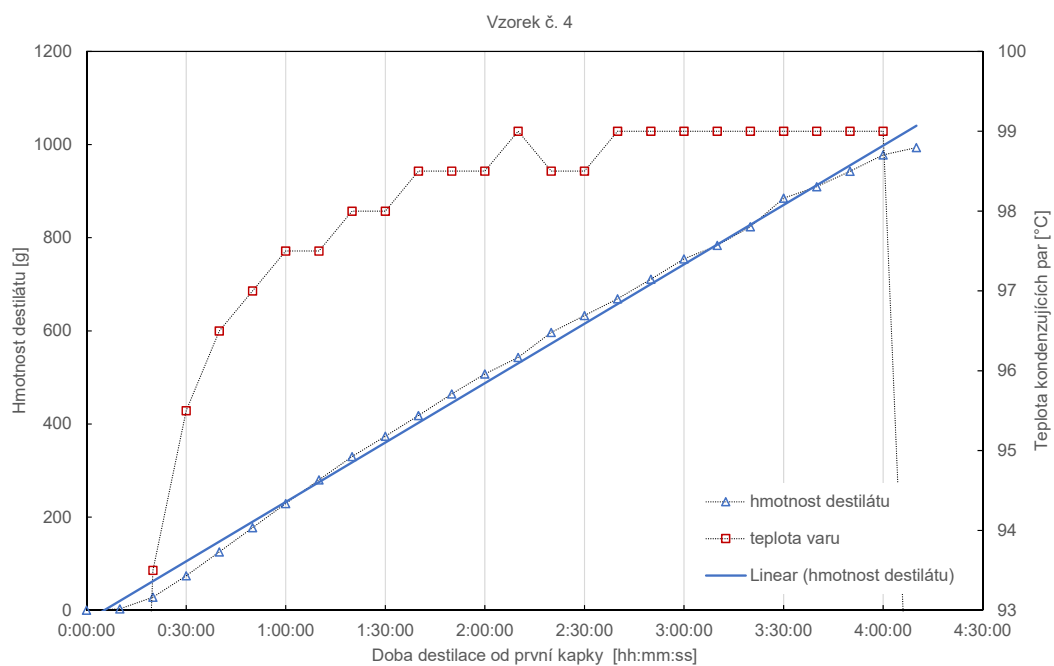
Tento protokol může být reprodukován pouze celý, jinak jen s písemným souhlasem laboratoře.

Protokol vystaven:
7.3.2018

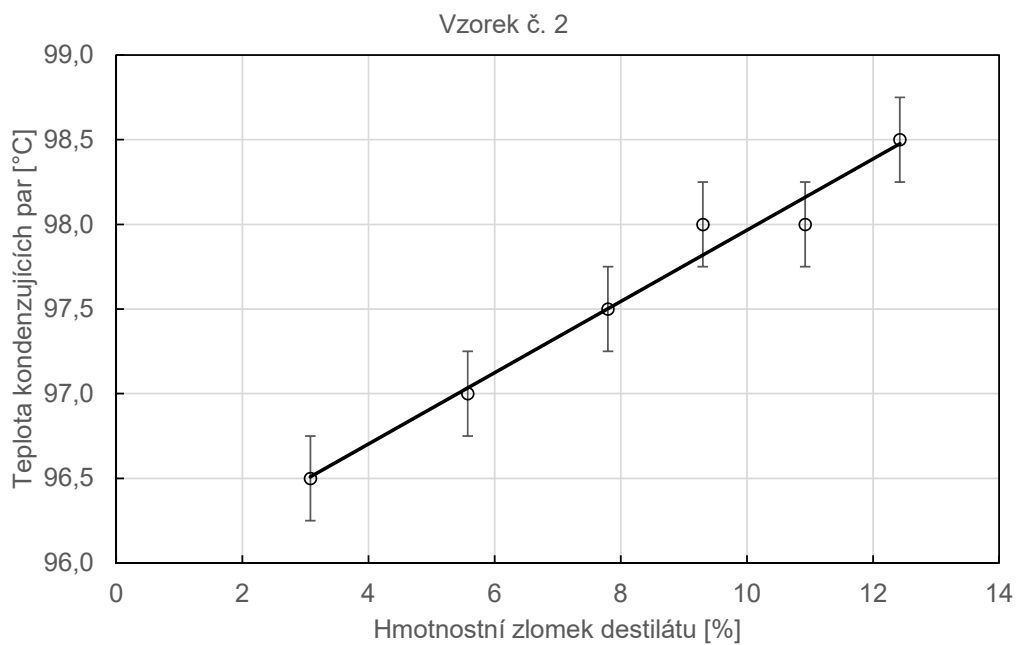
Ing. Pavel Hradil
vedoucí Zkušební laboratoře Brno

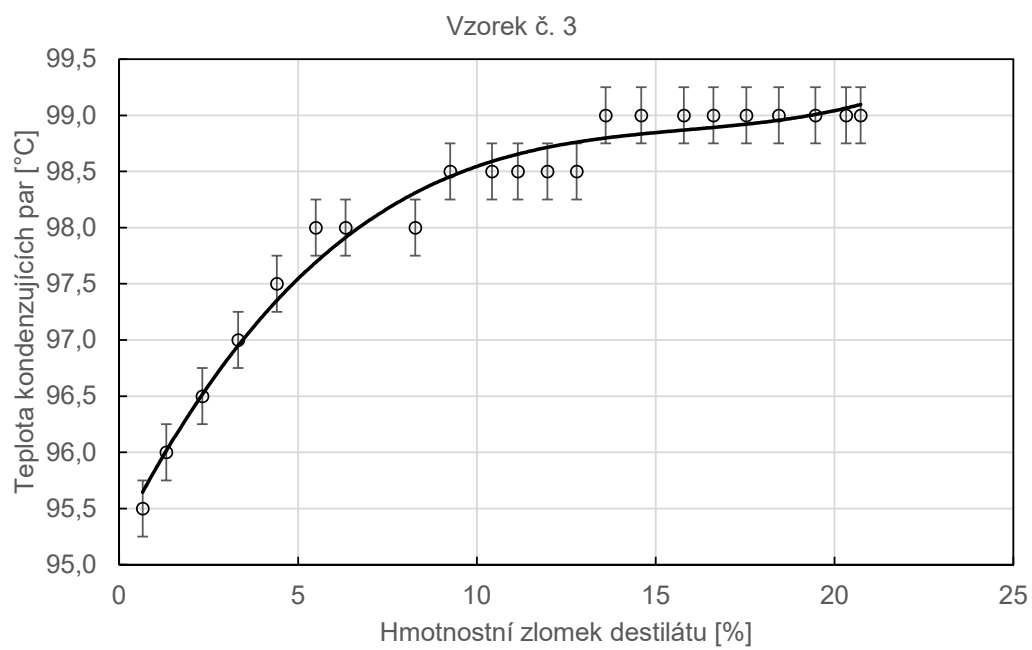
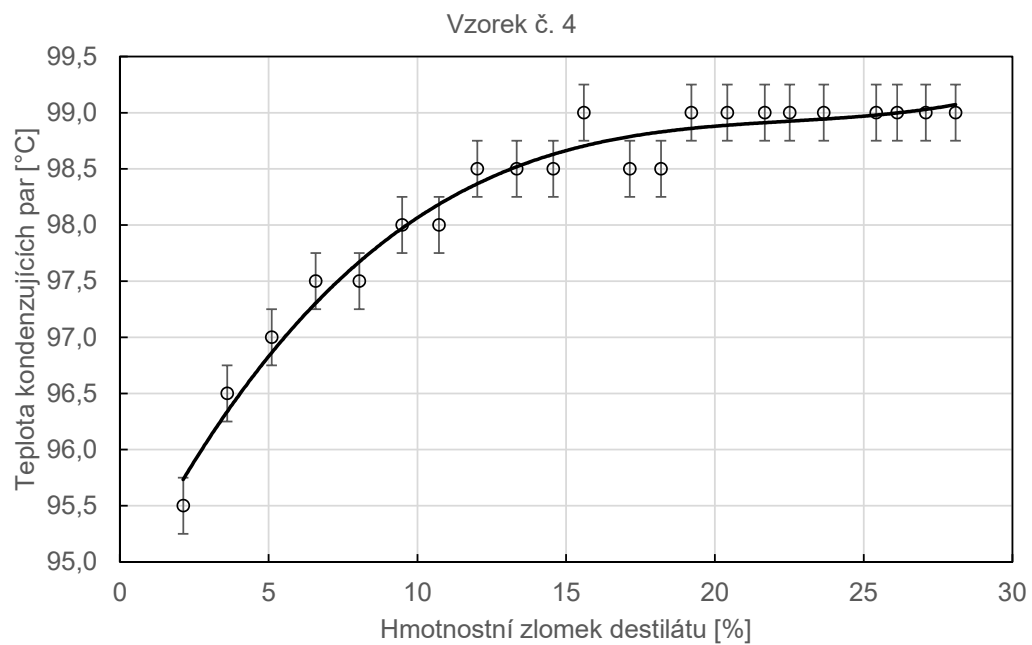
B Příloha B: Průběh destilace





C Příloha C: Destilační křivky





D Příloha D: Naměřené hodnoty, podíl sušiny (TS)

Č.isky	Č. v.	m _M [g]	m _{MF} [g]	m _F [g]	m _{MS} [g]	m _S [g]	TS [hm. %]
100	1	52,168	84,102	31,934	55,177	3,009	9,42
101	1	49,260	89,202	39,942	53,011	3,751	9,39
102	1	55,613	90,712	35,099	58,910	3,297	9,39
103	1	51,885	81,143	29,258	54,646	2,761	9,44
104	1	51,784	84,922	33,138	54,919	3,135	9,46
18	2	31,986	62,046	30,060	35,120	3,134	10,43
20	2	38,319	71,246	32,927	41,774	3,455	10,49
23	2	31,254	65,190	33,936	34,814	3,560	10,49
25	2	32,661	65,880	33,219	36,147	3,486	10,49
26	2	36,562	68,347	31,785	39,914	3,352	10,55
105	3	58,227	93,196	34,969	62,405	4,178	11,95
106	3	56,929	93,261	36,332	61,274	4,345	11,96
107	3	51,277	84,687	33,410	55,276	3,999	11,97
108	3	53,740	87,038	33,298	57,732	3,992	11,99
109	3	58,645	95,949	37,304	63,170	4,525	12,13
8	4	39,369	69,495	30,126	42,874	3,505	11,63
22	4	33,031	62,021	28,990	36,399	3,368	11,62
29	4	33,931	64,419	30,488	37,475	3,544	11,62
30	4	37,681	69,263	31,582	41,370	3,689	11,68
31	4	34,055	62,917	28,862	37,448	3,393	11,76

E Příloha E: Naměřené hodnoty, hustota (ρ)

Č. pyknometru	Č. v.	m_P [g]	m_{PF} [g]	m_F [g]	V_P [l]	ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
18	1	24,619	77,738	53,119	0,050	1062,38
39	1	23,644	77,194	53,550	0,050	1071,00
29	1	25,427	77,916	52,489	0,050	1049,78
27	1	26,140	80,129	53,989	0,050	1079,78
39	1	23,644	77,274	53,630	0,050	1072,60
27	2	26,140	79,631	53,491	0,050	1069,82
29	2	25,427	77,386	51,959	0,050	1039,18
39	2	23,644	76,706	53,062	0,050	1061,24
18	2	24,619	77,207	52,588	0,050	1051,76
39	2	23,644	76,738	53,094	0,050	1061,88
27	3	26,140	79,814	53,674	0,050	1073,48
29	3	25,427	77,651	52,224	0,050	1044,48
18	3	24,619	77,415	52,796	0,050	1055,92
39	3	23,644	76,992	53,348	0,050	1066,96
39	3	23,644	76,999	53,355	0,050	1067,10
29	4	25,427	77,625	52,198	0,050	1043,96
39	4	23,644	76,954	53,310	0,050	1066,20
27	4	26,140	79,851	53,711	0,050	1074,22
18	4	24,619	77,527	52,908	0,050	1058,16
39	4	23,644	77,064	53,420	0,050	1068,40

F Příloha F: Naměřené hodnoty, měrná tepelná kapacita (c)

Č.v.	m_F [g]	m_{h,H_2O} [g]	t_i [°C]	t_h [°C]	t_f [°C]	c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
1	198,0	222,2	22,1	44,8	33,6	3881,86
1	202,8	237,7	22,6	46,9	35,2	3879,02
1	212,8	220,7	22,9	45,1	33,8	3855,47
2	211,6	225,1	22,6	49,9	36,2	3836,94
2	215,2	251,4	23,0	44,5	34,2	3859,09
2	211,4	245,5	23,1	44,6	34,3	3821,13
3	205,0	237,7	22,4	44,7	34,0	3807,53
3	214,0	238,5	22,9	48,2	35,8	3842,77
3	207,8	252,6	22,9	44,0	34,1	3837,18
4	198,2	247,4	22,7	47,6	36,0	3864,73
4	218,6	234,4	23,2	45,0	34,1	3860,32
4	206,4	239,9	23,1	47,7	35,8	3893,75

G Příloha G: Okolní podmínky měření

Měření/Operace	Datum	V_{MIN} [ml]	Okolní podmínky		
			teplota	tlak	rel. vlhkost
			[°C]	[hPa]	[%]
Odběr z BPS	01/02/2018	-	-	-	-
Odběr pro zkuš. lab.	12/02/2018	-	-	-	-
Odběr pro experiment	09/03/2018	-	-	-	-
Destilace	09/03/2018	-	24,2	974,3	22,0
CK kalorimetru	16/03/2018	0	23,5	964,1	30,2
Podíl sušiny	23/03/2018	1000	23,6	968,4	19,8
Hustota	23/03/2018	1000	23,3	970,5	17,7
Měrná tepelná kapacita	30/03/2018	2800	23,0	974,6	24,0
Konduktivita	30/03/2018	0	23,0	974,6	24,0
pH	30/03/2018	0	23,0	974,6	24,0
Dynamická viskozita	04/04/2018	1800	24,4	970,0	31,5