

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav procesní a zpracovatelské techniky



Technologie a zařízení pro čištění
upotřebeného kuchyňského oleje

Diplomová práce

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Deáková** Jméno: **Anna** Osobní číslo: **482410**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Procesní inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Technologie a zařízení pro čištění upotřebeného kuchyňského oleje

Název diplomové práce anglicky:

Technology and equipment for cleaning used cooking oil

Pokyny pro vypracování:

- Zpracujte literární, patentovou a průmyslovou rešerši zaměřenou na technologie a zařízení pro čištění upotřebeného kuchyňského oleje před jeho následným rafinérským zpracováním.
- Proveďte koncepční návrh automatizované linky pro tuto technologii.
- Na základě modelových experimentů odzkoušejte vybraný technologický krok a definujte procesní parametry pro scale-up zařízení.
- Zpracujte návrh vybraného zařízení do pilotní linky na úrovni basic-design.

Seznam doporučené literatury:

Dle vlastní rešerše a doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **17.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **04.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **24.09.2023**

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Anna Deáková

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce, prof. Ing. Tomáši Jiroutovi, Ph.D., za odborné vedení této diplomové práce, za poskytnutí vybavení a materiálu pro realizaci experimentů, za trpělivost a za vlídná slova, jež mi dodávala víru, že práci dokončím. Stejně velké díky náleží Ing. Mgr. Vojtěchu Bělohlovovi, Ph.D. za praktickou pomoc při sestavování experimentální aparatury a za pomoc při provádění samotných experimentů. Za pomoc při měření hustoty a viskozity oleje bych chtěla poděkovat Ing. Adamu Krupicovi. Dále bych chtěla poděkovat své rodině, všem svým blízkým a svému příteli za podporu při psaní této práce. Nejvíce však děkuji své dcerce, která mi dodala vůli dotáhnout nejen diplomovou práci, ale i celou tuto životní etapu do šťastného konce.

Anotační list

Jméno autora:	Anna
Příjmení autora:	Deáková
Název práce česky:	Technologie a zařízení pro čištění upotřebeného kuchyňského oleje
Název práce anglicky:	Technology and equipment for cleaning used cooking oil
Rozsah práce:	počet stran: 62 počet obrázků: 31 počet tabulek: 12 počet příloh: 0
Akademický rok:	2022/2023
Jazyk práce:	Čeština
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	Energetika a procesní inženýrství
Vedoucí práce:	prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ú12118

Anotace česky: Diplomová práce je zaměřena na technologie čištění a předúpravy upotřebeného kuchyňského oleje se záměrem jeho druhotného využití. Cíli práce jsou na základě rešerše vytvoření koncepčního návrhu automatizované linky na čištění upotřebeného kuchyňského oleje a následný výběr jednoho technologického kroku pro provedení experimentů. Dále uskutečnění těchto experimentů, jejich vyhodnocení a vyvození závěrů, které poslouží pro návrh scale-up vybraného zařízení. V práci jsou popsány vlastnosti upotřebeného kuchyňského oleje, možnosti jeho využití a technologie na jeho předúpravu. Je uveden teoretický základ pro výpočty potřebné k vyhodnocení experimentů. Tento základ je rovněž využit při návrhu scale-up zařízení.

Klíčová slova: Upotřebený kuchyňský olej, odstředivka, předúprava, čištění, separace pevných částic,

Anotace anglicky: This diploma thesis is focused on technologies of purification and pretreatment of used cooking oil with the intention of its secondary use. The aims of this thesis are, based on research, the creation of a conceptual design of an automated line for cleaning used cooking oil and the subsequent selection of one technological step for conducting experiments. Furthermore, carrying out these experiments, evaluating them and drawing conclusions that will serve for the scale-up design of the selected device. The work describes the properties of used cooking oil, the possibilities

of its use and technology for its pretreatment. The theoretical basis for the calculations needed to evaluate the experiments is given. This basis is also used in the design of scale-up equipment.

Klíčová slova anglicky: Used cooking oil, centrifuge, pretreatment, purification, separation of solid particles

Využití: Aplikace výsledků experimentů při návrhu obdobných zařízení. Přehled možností čištění a zpracování upotřebeného kuchyňského oleje.

Seznam použitých zkratk

ČR	Česká republika
FAME	methyl estery mastných kyselin (fatty acids methyl esters)
FFA	volné mastné kyseliny (free fatty acids)
UCO	upotřebený kuchyňský olej (used cooking oil)

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Definice upotřebeného kuchyňského oleje	10
1.2	Produkce upotřebeného kuchyňského oleje	11
2	Čištění upotřebeného kuchyňského oleje	12
2.1	Složení a fyzikální vlastnosti upotřebeného kuchyňského oleje	12
2.2	Technologie odstraňování jednotlivých nečistot	14
2.3	Využití upotřebeného kuchyňského oleje	15
3	Ko-hydrokrakování	17
3.1	Požadavky na čistotu upotřebeného kuchyňského oleje	18
4	Linky na čištění upotřebeného kuchyňského oleje	19
4.1	Existující a patentované linky a technologie	19
4.2	Koncepční návrh automatizované linky	21
4.2.1	Výběr technologického kroku pro modelové experimenty	22
5	Teoretický základ	23
5.1	Základní vztahy teorie odstředování	23
6	Experimentální práce	28
6.1	Uspořádání a popis aparatury	28
6.1.1	Parametry odstředivky	31
6.2	Použité látky a jejich vlastnosti	31
6.2.1	Strouhanka	31
6.2.2	Řepkový olej	34
6.2.3	UCO	36
6.3	Modelové experimenty	36
6.3.1	Teoretické výpočty odlučivosti	37
6.3.2	Nastavení experimentů	39
6.3.3	Průběh experimentů, naměřená data a výsledky	40
7	Návrh scale-up zařízení	51
8	Závěr	54
	Seznamy	56

1 Úvod

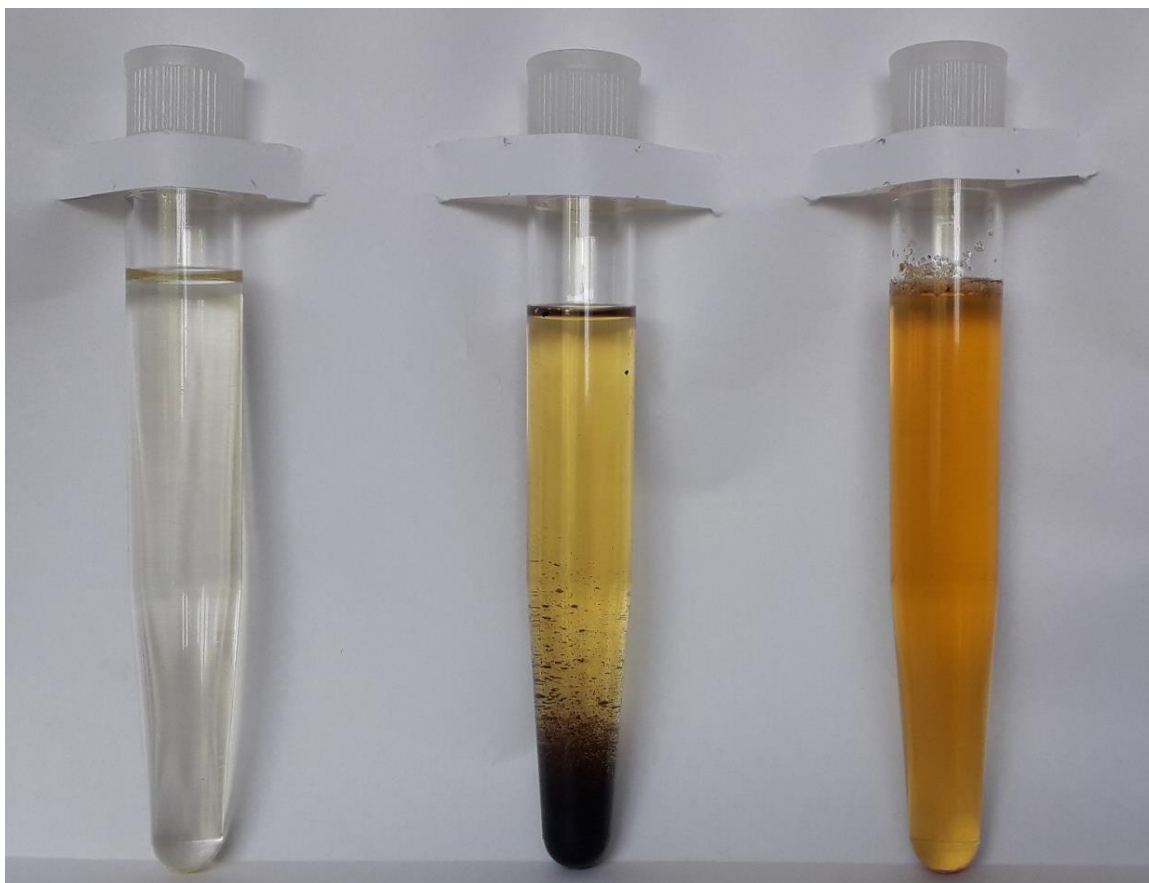
Jedním z rozsáhlých ekologických problémů, který se lidstvo pokouší v současnosti vyřešit, je snižování množství potravin a jedlých výrobků, jež končí mezi odpady. Nemusí se přitom jednat pouze o minimalizaci množství takového odpadu, ale i o hledání možností, jak některé složky vyhozených potravin nějakým způsobem využít. V současné době dochází globálně ke ztrátě 31 % vyrobeného jídla ročně [1]. Děje se tak v různých fázích produkce a spotřeby jídla, nejedná se tedy jen o vyhazování nesnědených zbytků nebo jídla po skončení jeho doby trvanlivosti, ale i o ztráty při zpracování potravinářských výrobků či o potraviny, které se například během přípravy pokrmu stanou nejedlými. Takové ztráty jsou nevyhnutelné a potravinový odpad tudíž nelze zcela eliminovat.

Mezi poslední zmíněnou skupinu odpadu spadá i takzvaný upotřebený kuchyňský olej neboli UCO (z anglického pojmenování Used Cooking Oil). Tento odpadní produkt vzniká při přípravě smažených jídel ve značném množství po celém světě. Pokud je s tímto odpadem nesprávně nakládáno, může způsobovat řadu škod životnímu prostředí, například znečištění podzemních vod a půdy, zahubení mikroorganismů a malých živočichů žijících v půdě či vodě v důsledku oddělení jejich ekosystému od vzduchu nebo naopak dodání potravy škůdcům a přenašečům chorob s následným navýšením jejich populace [2]. Značné problémy rovněž přináší vylévání oleje do odpadu, v důsledku čehož dochází k zanášení kanalizační infrastruktury a zvyšování náročnosti čištění odpadních vod [2, 3]. To jsou důvody, proč se v dnešní době rozvíjí snaha upotřebený kuchyňský olej sbírat a využít pro nové účely. Než však k jakémukoliv využití dojde, musí olej projít různými technologiemi úprav, jejichž charakter se odvíjí od složení vstupujícího oleje a požadavků na jeho kvalitu před konkrétním využitím.

V této diplomové práci budou shrnuty poznatky o vlastnostech UCO, zejména druhy a rozsah jeho znečištění a technologické možnosti, jak znečištění odstranit, ale také jeho fyzikální vlastnosti a potenciál jeho využití. Dále bude na základě rešerše proveden koncepční návrh automatizované linky na předúpravu UCO a následně bude vybrán jeden technologický krok z této linky, pro který budou provedeny modelové experimenty a jejich vyhodnocení. Ze závěrů vyvozených z výsledků experimentů bude proveden návrh scale-up zařízení vybrané části technologie a budou pro ni definovány doporučené procesní podmínky.

1.1 Definice upotřebeného kuchyňského oleje

Upotřebený kuchyňský olej je souhrnné označení pro odpadní oleje a tuky, které prošly smažením při přípravě pokrmů v domácnostech a v komerčních subjektech, jako jsou restaurace, rychlá občerstvení, kantýny nebo hotely. Tyto původně jedlé potraviny, nejčastěji jsou používány rostlinné oleje, jsou při smažení vystavovány teplotám $150 \div 200 \text{ }^\circ\text{C}$ a kontaminaci složkami jídla. Tím se změní některé fyzikální (viskozita, hustota, barva) a chemické vlastnosti oleje, jenž přijímá vlhkost, zůstávají v něm různě velké pevné částice smaženého jídla, mění se složení mastných kyselin, obsah jódu, pH, olej podléhá tepelné degradaci, oxidaci, hydrolyzaci či polymerizaci [4]. Mnohé z produktů těchto dějů nejsou příznivé pro opětovné použití oleje k přípravě pokrmů. Platí, že čím vícekrát je olej přesmažen, tím více nežádoucích látek v něm vzniká a olej se stává nejedlým až zdraví škodlivým. Na Obrázku 1 jsou vzorky tří rostlinných olejů, první z nich je čerstvý slunečnicový olej, druhý je UCO z domácnosti po přípravě smažených sýrů po dobu osmi minut a třetí je UCO z fastfoodové restaurace v České republice.



Obrázek 1 - Porovnání olejů

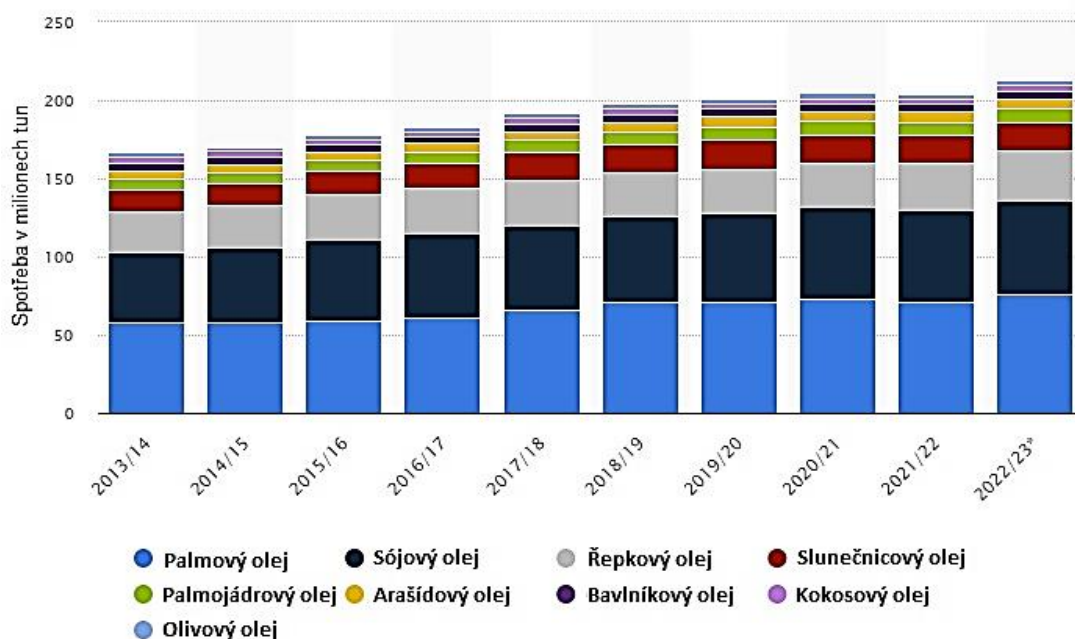
UCO i po všech těchto změnách představuje především zdroj lipidů, tedy esterů vyšších mastných kyselin (majoritně derivátů karboxylových kyselin trojsytného alkoholu) [3, 5]. UCO je

tedy význačným zdrojem chemicky vázané energie. Ostatní látky, které olej pojmul při smažení, jsou považovány za nečistoty, které je potřeba před dalším použitím oleje odstranit vhodnými technologiemi.

1.2 Produkce upotřebeného kuchyňského oleje

Zjistit přesně celkové množství vyprodukovaného upotřebeného oleje není jednoduché. Největší překážkou je nekompletní sběr UCO a znemožnění následného přímého určení jeho množství. Sběr nebo výkup poměrně dobře funguje u komerčních subjektů, v nichž je olej produkován centralizovaně ve velkých objemech. Oproti tomu ale stojí domácnosti, které samostatně produkují malá množství, a tak většina domácností UCO vyhazuje s tuhým komunálním odpadem, nebo s ním nakládá nezodpovědně. V součtu jde však o značné objemy, které nelze přímo určit.

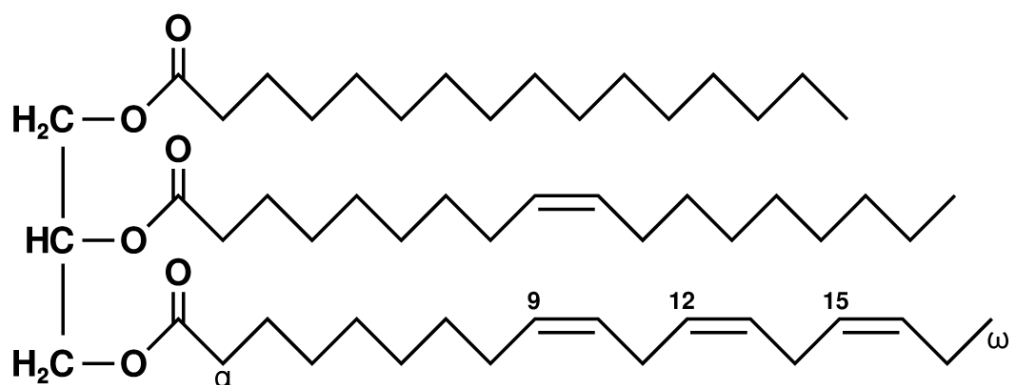
Produkce upotřebeného kuchyňského oleje tak byla různými studiemi odhadnuta alespoň ve vztahu k celkové spotřebě jedlých rostlinných olejů, a to na 20 až 32 % [3]. Roční spotřeba rostlinných olejů v období 2021/2022 činila 204,17 milionů tun [6], produkce UCO tedy mohla být až 69 milionů tun/rok. Obrázek 2 ukazuje vývoj spotřeby rostlinných olejů od období 2013/2014 a predikci na poslední období 2022/2023. Z rostoucího trendu spotřeby olejů lze předpokládat, že i na dále poroste rovněž množství vyprodukovaného upotřebeného oleje.



Obrázek 2 - Spotřeba rostlinných olejů celkem [6]

2 Čištění upotřebeného kuchyňského oleje

Čerstvé jedlé oleje jsou tvořeny z 88 až 98 % triacylglyceroly [4]. Jedná se o sloučeniny glycerolu (trojsytný alkohol), místo jehož tři alkoholových skupin jsou navázány deriváty dlouhých mastných kyselin v různém stupni nasycení tak, jak ukazuje příklad na Obrázku 3, s počtem uhlíků 4 až 22, nejčastěji však C16 a C18 [3].



Obrázek 3 - Příklad molekuly triacylglycerolu [5]

Během smažení prochází olej vlivem zvýšené teploty a kontaktu se vzduchem, vlhkostí a jídlem řadou chemických reakcí a fyzikálních procesů, které mění jeho složení a fyzikální vlastnosti. Vzniklé nežádoucí látky ovlivňují alternativní aplikace UCO, proto je nutné olej nejprve upravit a zbavit jednotlivých nečistot. Aby mohly být využity nejvhodnější technologie čištění, je potřeba se nejprve seznámit s vlastnostmi UCO. Také je důležité znát požadovanou kvalitu pro konkrétní využití UCO.

2.1 Složení a fyzikální vlastnosti upotřebeného kuchyňského oleje

Stejně, jako u čerstvého oleje, tvoří hlavní složku UCO triglyceridy. Látky, které se do UCO dostaly nebo v něm vznikly při smažení, však mohou mít významný vliv na jeho další využití a bezpečnost, některé složky jsou dokonce toxické. Nejčastějšími komplikacemi při dalším zpracování UCO jsou nežádoucí chemické reakce na úkor těch žádoucích, zvýšení spotřeby reaktantů, inhibice či otrávení katalyzátorů a snížení jejich životnosti, koroze zařízení, snížení kvality produktu apod.

Na první pohled viditelnou příměsí v UCO jsou pevné nečistoty, části jídla smaženého v oleji o velikostech od jednotek mikrometrů po jednotky milimetrů. Pevná frakce může mít objemový podíl v UCO až 20 % [3] a představuje problém především pro zařízení a potrubí v technologiích čištění a zpracování UCO, protože pevné a poměrně tvrdé částice přesmaženého jídla způsobují

abrazi vnitřních povrchů a mohou rovněž ucpat některé části technologie, proto je nutné odstranit pevné nečistoty jako první. Dalším důvodem, proč odstranit pevné částice, je možný obsah kyslíku a jiných nežádoucích prvků, které se mohou při dalším zpracování uvolňovat a podléhat chemickým reakcím, vytvářet nežádoucí sloučeniny a snižovat účinnost žádoucích procesů.

Další látkou, kterou je nutné z UCO odstranit, je voda. Do oleje se dostává zejména přímo z jídla a může zaujímat 0,1 až 8 hmotnostních procent. Voda vytváří problémy především reakcemi s dalšími prvky, kdy může vznikat množství škodlivých, toxických či například korozivních sloučenin, voda vnáší do směsi kyslík, tedy oxidační činidlo, které ochotně reaguje s nejrůznějšími prvky a sloučeninami používanými při následném zpracování. Voda také vytváří podmínky vhodné pro biologické a enzymatické procesy, které mohou UCO zkazit. Téměř vždy je požadavek na naprosto minimální vlhkost, jedním z cílů čištění UCO je tedy kompletní odstranění vody [3].

Hydrolytickým rozkladem triacylglycerolů a oxidativním štěpením nenasycených řetězců mastných kyselin vznikají různě velké molekuly volných mastných kyselin (free fatty acids, FFA). Obsah FFA je jedním z hlavních kvalitativních ukazatelů, který určuje cenu UCO a je důležitý zejména při využití UCO pro biopaliva a jako oleochemickou surovinu [3].

Síra, dusík a fosfor jsou uvolňovány do oleje při smažení přímo z jídla a jedná se o zvlášť škodlivé nečistoty. Velice ochotně oxidují, síra navíc snadno reaguje s vodíkem za vzniku sirovodíku. Tyto prvky tedy vytváří jednoduché anorganické sloučeniny, které mohou být jedovaté a jsou škodlivé životnímu prostředí, navíc mohou poškodit procesní zařízení a katalyzátory [3]. To ovlivňuje možné využití UCO, pokud by byl například UCO s vysokým podílem síry a dusíku použit při výrobě biopaliv, měla by pak tato paliva vysoké emise.

Polární sloučeniny a těkavé látky ovlivňují především senzorycké vlastnosti UCO, jako jsou zápach, barva a chuť. Do této kategorie spadají monoacylglyceroly, diacylglyceroly, oxidované či oligomerizované triacylglyceroly, steroly, aldehydy, ketony, peroxidy, fosfolipidy, aromatické a lehké uhlovodíky [3]. Tyto látky lze rozdělit na těkavé a netěkavé a vznikají zejména během oxidativních reakcí, tudíž jsou nositeli kyslíku.

Fyzikální vlastnosti UCO bývají podobné jako u čerstvých olejů, avšak hustota a viskozita mírně vzrůstají. Hustota čerstvých olejů se pohybuje okolo 915 kg/m^3 při pokojové teplotě [7], hustota UCO pak kolem 920 kg/m^3 [3, 4]. Dynamická viskozita bývá u UCO vyšší o přibližně 5 mPa s než u čerstvých olejů [3]. Hodnoty obou těchto vlastností klesají se vzrůstající teplotou, čehož lze s výhodou využít při úpravě a zpracování UCO [7].

2.2 Technologie odstraňování jednotlivých nečistot

Pro předúpravu UCO může být použito široké spektrum technologií, přičemž některé jsou schopny odseparovat více nežádoucích složek najednou. Mnohé technologie jsou stejné nebo obdobné jako při úpravách jedlých olejů, a jsou tedy dobře zvládnuté.

Jak již bylo uvedeno, nejprve je potřeba odstranit pevné nečistoty. Může být použito mnoho metod nebo jejich kombinace. První z nich je odstředování, které je pro svou rychlost, kapacitu a možnost kontinuálního provozu vhodné pro aplikace v průmyslovém měřítku. Dále může být využívána povrchová filtrace, většinou vícestupňová. V poslední řadě pro malé kapacity může posloužit i gravitační usazování. Při všech těchto technologiích bývá olej zahříván především pro snížení viskozity a urychlení procesu separace. Teplota bývá kolem 60 °C [3].

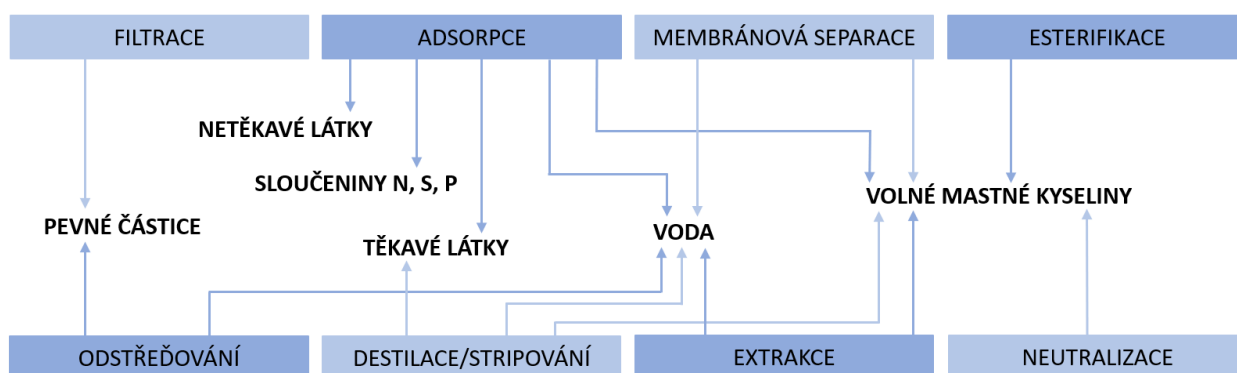
Po pevných částicích bývají odstraňovány volné mastné kyseliny, kdy lze využít jak fyzikální, tak i chemické metody separace. Nejčastěji používanou fyzikální metodou při snižování kyselosti rostlinných olejů je vakuová destilace a stripování, to lze využít i pro čištění UCO. Výhodou je, že tento proces odstraní i řadu dalších příměsí, především těkavé látky a vlhkost. Aby nedocházelo k další tepelné degradaci oleje, je nutné dbát na krátkou dobu zdržení, čehož lze docílit navýšením teplosměnné plochy [3]. Vakuum pak snižuje teplotu v koloně, která tak může dosahovat 160 až 280 °C. Dalším separačním procesem je adsorpce, která rovněž odstraňuje i jiné nečistoty, jako je vlhkost, sloučeniny dusíku, síry a fosforu a polární sloučeniny, pokud je použit vhodný sorbent. Nejčastěji jde o běžně používané sorbenty, jako jsou zeolity, silika gel, aktivní uhlí nebo různé hlinky. Adsorpce rovněž vylepšuje sensorické vlastnosti UCO, především barvu. Pokud je použita adsorpce, musí technologie čištění obsahovat také krok odstranění sorbentu z UCO. Jelikož se jedná o pevnou fázi, mohou být použity stejné metody separace, jako pro odstraňování pevných nečistot. Z chemických procesů lze použít neutralizaci, nejčastěji pomocí roztoků hydroxidu sodného či draselného. Pokud reaguje organická kyselina se zásadou, produktem jsou voda a alkalické soli mastných kyselin neboli mýdla. Ty jsou v oleji nerozpustné a je nezbytné je odseparovat, nejčastěji promýváním vodou a následným odstředěním [3]. Vzniklá voda musí být později také odseparována. Další chemickou cestou je esterifikace čili slučování FFA s alkoholy, často za přítomnosti katalyzátoru. Mohou být použity jednoduché alkoholy (zejména pokud má být UCO využito pro výrobu biodieselu), pak reakce probíhá při teplotě cca 100 °C a v mírném přetlaku, nebo mohou být použity vícesytné alkoholy, pak je pro zajištění reakce potřeba teplota 240 až 280 °C [3]. V neposlední řadě mohou být FFA odstraněny extrakcí, superkritickou extrakcí, membránovou separací a existují zmínky

o biologické separaci pomocí mikroorganismů, tyto technologie však nejsou rozšířené zejména kvůli vysokým nákladům.

Dusík, síra a fosfor mohou být ze sloučenin v UCO odstraněny kromě adsorpce také hydrogenací nebo procesem zvaným odslizení, což je metoda, která se běžně používá při úpravě jedlých rostlinných olejů [3].

Voda může být odseparována řadou výše uvedených procesů, konkrétně vakuovou destilací a stripováním, adsorpcí, také extrakcí a membránovou separací [3]. Lze však také využít hydromechanických procesů, protože voda má vyšší hustotu než UCO. Jelikož není rozdíl tak značný, jedná se zejména o odstřeďování. Nejvhodnější je talířová odstředivka, jelikož má takové zařízení vysoké investiční náklady, není tato technologie výhodná při nízké kapacitě výroby.

Obrázek 4 shrnuje, jaké nečistoty lze odstranit danými separačními procesy, přičemž nebyly uvedeny méně perspektivní procesy jako biologické odstranění FFA nebo hydrogenace a odslizení pro odstranění síry a dusíku. Zde je názorně vidět, že je adsorpce velmi všestranná, neboť dokáže odstranit hned pět typů nečistot.



Obrázek 4 - Přehled separačních metod a odstraňovaných nečistot

2.3 Využití upotřebeného kuchyňského oleje

Jelikož v sobě upotřebený kuchyňský olej nese především chemicky vázanou energii, nabízí se jeho energetická recyklace. Pokud je však UCO kvalitně předupraven, může být využit i jako surovina pro nahrazení nebo doplnění různých přírodních zdrojů v oleochemickém průmyslu.

Nejjednodušším způsobem využití UCO je ovšem jeho přímé spalování ve spalovnách odpadu. Pro toto využití není třeba sofistikovaných předúprav, případně vhodné je odvodnění a odstranění některých nečistot [8], a ačkoliv tento způsob nakládání nepřidává UCO žádnou vysokou hodnotu, je to stále lepší možnost než ukládání UCO na skládkách s tuhým odpadem nebo jeho vylévání do kanalizace.

Další energetické využití je přeměna UCO na biopaliva druhé generace, konkrétně biodiesel. Pro tuto aplikaci je nutné odstranit během čištění co nejvíce vlhkosti a volných mstných kyselin. Biodiesel totiž vzniká transesterifikací, což je chemická reakce, během které je jeden alkohol v esteru (pro UCO glycerol) nahrazen jiným (pro biodiesel methanol). Dalším označením pro biodiesel získaný z olejů je zkratka FAME (fatty acid methyl esters, česky methyl estery mastných kyselin) [9]. Pokud by v UCO byly přítomny volné mastné kyseliny ve větším množství, docházelo by k opětovnému slučování s uvolněným glycerolem, jenž je vedlejším produktem transesterifikace, za vzniku původních triacylglycerolů. Dalšími složkami UCO, které musí být pro toto využití v minimálním množství, jsou síra a dusík, a to kvůli pozdějším emisím, které budou vznikat při spalování biodieselu. Na Obrázku 5 je vidět, jak biodiesel z UCO vypadá.



Obrázek 5 - Ukázka vzorků ze tří stupňů výroby biodieselu z UCO [10]

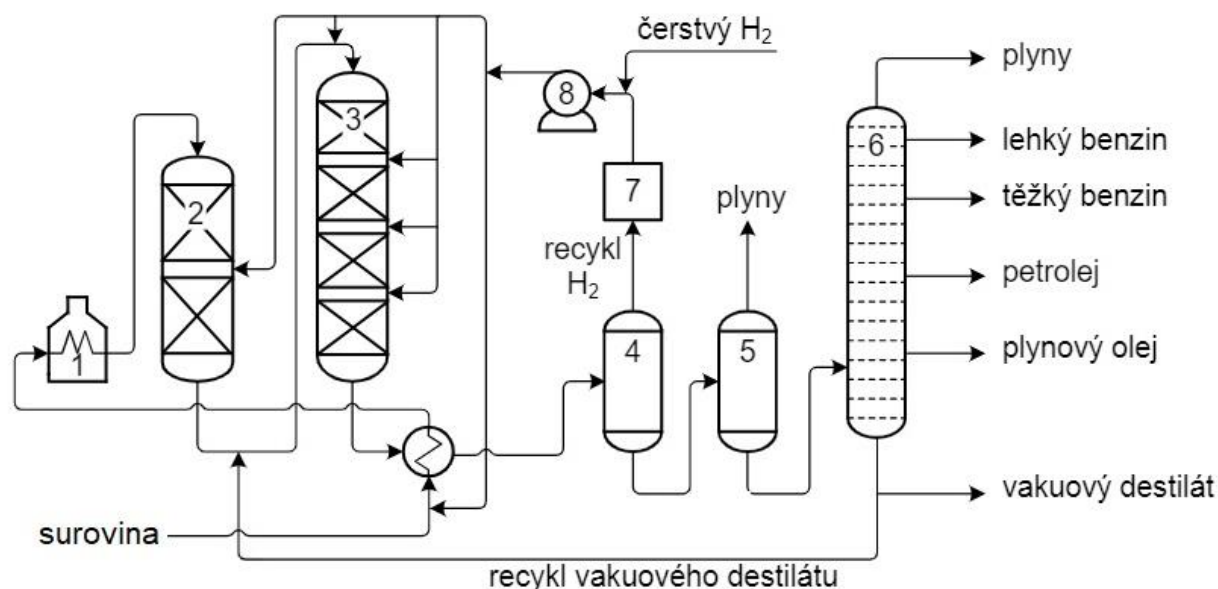
Tento způsob využití UCO je v dnešní době poměrně dobře zvládnutý a rozšířený, zejména pro podobnost technologie s výrobou biodieselu z primárních rostlinných olejů [11]. Přidaná hodnota však není tak vysoká, jako při materiálovém využití.

Materiálové využití může UCO najít v řadě aplikací, například při výrobě změkčovadel plastů, povrchově aktivních látek, polyuretanu a některých dalších polymerů, glycerolu či jiných vícesytných alkoholů, organických kyselin, pryskyřic, různých maziv, dále jako pojivo do asfaltu, nebo jako doplněk do fermentačních substrátů [12].

Posledním důležitým způsobem využití UCO, který bude zároveň předmětem dalších kapitol této diplomové práce, je mísení s vakuovým zbytkem po destilaci ropy v rafinerii a následné zpracování v hydrokraku [13]. Většinou zastoupené složky UCO mají totiž chemickou strukturu na stejné bázi, jako vakuový destilační zbytek, jedná se o dlouhé uhlovodíkové řetězce, jež jsou v hydrokraku štěpeny na kratší a žádanější produkty.

3 Ko-hydrokrakování

Ko-hydrokrakování znamená zpracování alternativních látek spolu s vakuovým destilačním zbytkem v rafinérském hydrokraku. Hydrokrak je zařízení používané na hydrogenační katalytické krakování dlouhých uhlovodíkových řetězců za teplot 350 až 450 °C a zvýšeného tlaku [13, 14] především v ropných rafinériích, probíhá v něm tedy termolýza dlouhých molekul ve vodíkové atmosféře za vzniku směsi kratších (lehkých až středně těžkých) uhlovodíků, například petroleje, benzínů nebo nafty, které jsou v rámci rafinérie žádanějšími produkty než těžké ropné destiláty. Obrázek 6 znázorňuje schéma jednostupňového hydrokrakování včetně uvedených možných produktů (1 – pec, 2 – hydrogenační reaktor, 3 – hydrokrakovací reaktor, 4 – vysokotlaký separátor, 5 – nízkotlaký separátor, 6 – frakční kolona, 7 – vypírka kyselých plynů, 8 – kompresor vodíku) [13].



Obrázek 6 - Schéma jednostupňového hydrokrakování [13]

Výhodou hydrokrakování je, že jsou produkty rafinované, tzn. obsahují málo heteroatomů, které byly ze suroviny odstraněny chemickou reakcí právě s vodíkem [14]. Alternativními látkami mohou být kromě upotřebeného kuchyňského oleje například také odpadní mazací oleje, kapalný zbytek z rychlé pyrolýzy, ale také primární rostlinné oleje [13, 15]. Tyto látky jsou parciálním substituentem, mohou se přidávat v podílu nízkých desítek procent k fosilní surovině tak, aby nebyla snižována kvalita produktů a ovlivňován provoz hydrokrakování (například zvyšována spotřeba vodíku nebo snižována životnost katalyzátoru) [13, 16]. V případě UCO má velký vliv na projevení těchto negativních faktorů jeho čistota.

Ko-hydrokrakování stojí na třech výhodách, první z nich je přeměnění odpadní suroviny na hodnotný produkt, druhou je nahrazení části fosilních zdrojů zdroji obnovitelnými a třetí je možnost využití stávajících rafinérií bez nutnosti výstavby nových zařízení [17]. Použití UCO má navíc pozitivní vliv na složení směsi produktů, kdy může vznikat vyšší podíl lehčích frakcí, než když je použit samotný vakuový zbytek [18].

3.1 Požadavky na čistotu upotřebeného kuchyňského oleje

Produktem rafinérského hydrokrakování jsou běžná paliva včetně motorových, proto by přidání UCO ke vstupní surovině nemělo vnášet do produktů prvky, které jsou při spalování paliv nežádoucí, zejména se jedná o kyslík, dusík a síru. Hydrokrakování umí tyto heteroatomy samo o sobě odstranit [17], ale zvyšuje se tím spotřeba vodíku, a tak je výhodnější sloučeniny obsahující tyto prvky odstranit během předúpravy.

Nejpřísnější požadavky jsou na odstranění vody, jejíž podíl by se měl dostat na naprosté minimum do nízkých jednotek ppm [3], ideálně však na nulu. Nižší organické sloučeniny (ketony, aldehydy, aromatické a těkavé uhlovodíky apod.) obsahující kyslík, dusík a síru by také měly být odstraněny v maximální možné míře. V neposlední řadě by UCO neměl obsahovat ani pevnou frakci. Uvádí se, že pro využití v oleochemickém průmyslu by měly být odstraněny částice větší než 100 μm [3], je však lepší odseparovat i menší částice, pokud je to možné.

4 Linky na čištění upotřebeného kuchyňského oleje

Dnes stojí linky na čištění a úpravu UCO po celém světě. Jakou mají konkrétní podobu však záleží zejména na lokalitě, v níž jsou umístěné. Rozdíly způsobuje hlavně způsob sběru UCO, jeho množství, kvalita a samozřejmě následné využití.

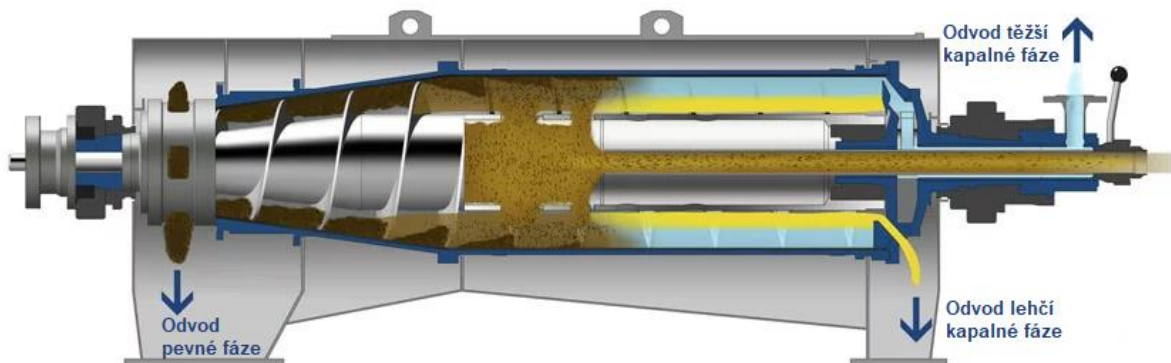
Prvním krokem linky bývá naskladnění UCO, což znamená jeho přemístění ze sběrných nádob do skladovacích tanků. Tato operace může mít různé podoby v závislosti na tom, do jakých nádob je UCO sbírán. Z domácností UCO často míří v rozličných nádobách do sběrných dvorů, případně do sběrných kontejnerů. Novou možnost sběru pak nabízejí společnosti ORLEN Unipetrol a ORLEN UniCRE, a to sběr do unifikovaných lahví a jejich následné odevzdání na čerpacích stanicích ORLEN Benzina [19]. Z komerčních subjektů bývá UCO vykupován ve větších objemech. Výkup v dnešní době provádí řada společností, na území ČR jsou to například ECOSERVIS [8], Bilit [20], Viking group [21] nebo Trafin Oil [22], jež UCO následně i čistí.

Druhým krokem bývá zahřátí pro snížení viskozity a odseparování pevných nečistot. Další části technologie už více závisí na následné aplikaci UCO, ale po separaci tuhých částic většinou přichází odstraňování nežádoucích chemických látek, často je využívána destilace/stripování, adsorpce, extrakce, případně při následné výrobě biodieselu esterifikace. Nakonec bývá odstraněna vlhkost, pokud se ji nepodařilo odseparovat v předchozím kroku, nebo byla do UCO během předúprav naopak přidávána (stripování vodní parou).

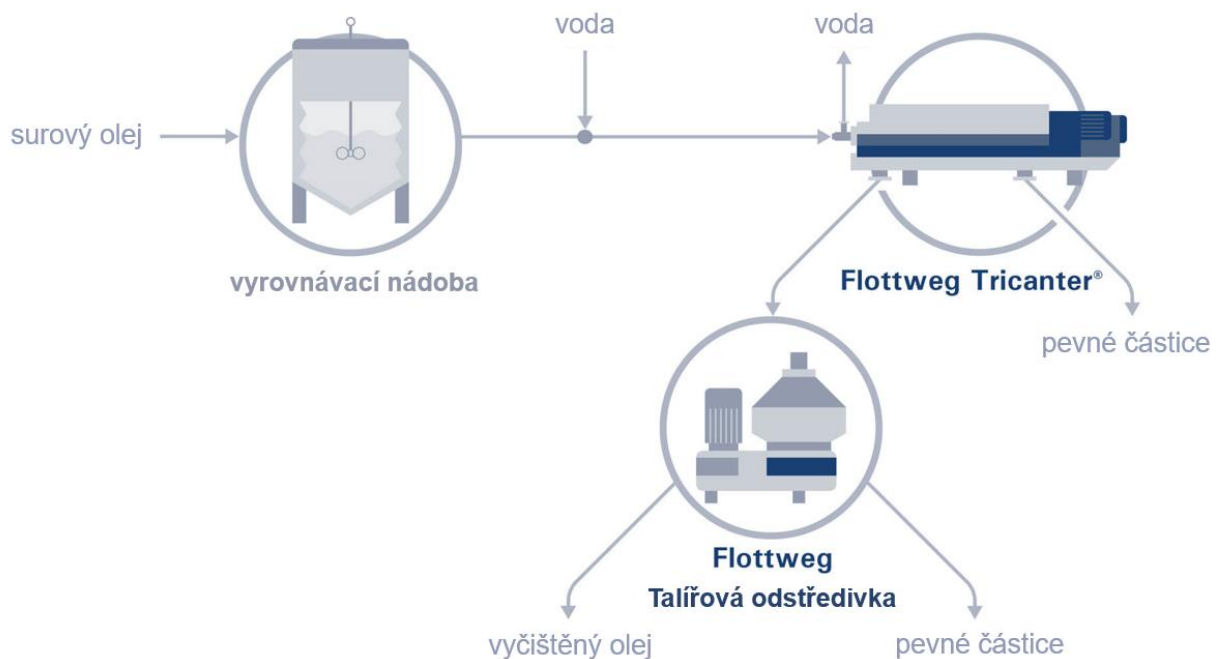
4.1 Existující a patentované linky a technologie

Společnost Trafin Oil, která již byla zmíněna výše, provozuje továrnu na čištění UCO na kvalitu pro následné využití jako bionaftu nebo recyklované letecké palivo. Působí v Česku, Slovensku a Polsku a soustředí se výhradně na nakládání s UCO. Většina jiných společností, které UCO zpracovávají, má širší portfolio činností a UCO pro ně bývá spíše sekundárním odvětvím. Finská společnost Neste [23] provozuje několik rafinérií pro výrobu paliv a od konce minulého století cílí na nahrazování fosilních zdrojů těmi obnovitelnými na bázi lipidů. Zabývá se tedy zejména následnou přeměnou olejů na biopaliva, UCO ale rovněž předupravuje [24]. Firma Flottweg nabízí různá zařízení pro separaci mnoha druhů heterogenních směsí na principu odstředivé síly [25], nemá tedy patentovanou linku na kompletní předúpravu UCO, ale pouze některé její části. Na Obrázku 7 a Obrázku 8 je vidět patentované zařízení nazvané tricanter,

sloužící na separaci tří fází. Hodí se tedy pro čištění UCO, protože je schopné v jednom kroku odstranit z oleje pevné částice i vodu [26].



Obrázek 7 - Řez tricanterem [26]



Obrázek 8 - Zapojení tricanteru do části linky na čištění UCO [26]

Poslední z výběrů společností, jež se zabývá úpravou UCO, je Farmet, která se primárně zabývá zemědělskou technikou. Technologie čištění UCO, jež firma nabízí, sestává z centrálního velkoobjemového separátu, který je vyhříván duplikátory a funguje na principu sedimentace, dále z odstředivého separátoru pro odstranění jemných nečistot a jako doplněk k technologii je nabízena deacidifikační jednotka pro odstranění FFA pomocí vakuové destilace a stripování [27].

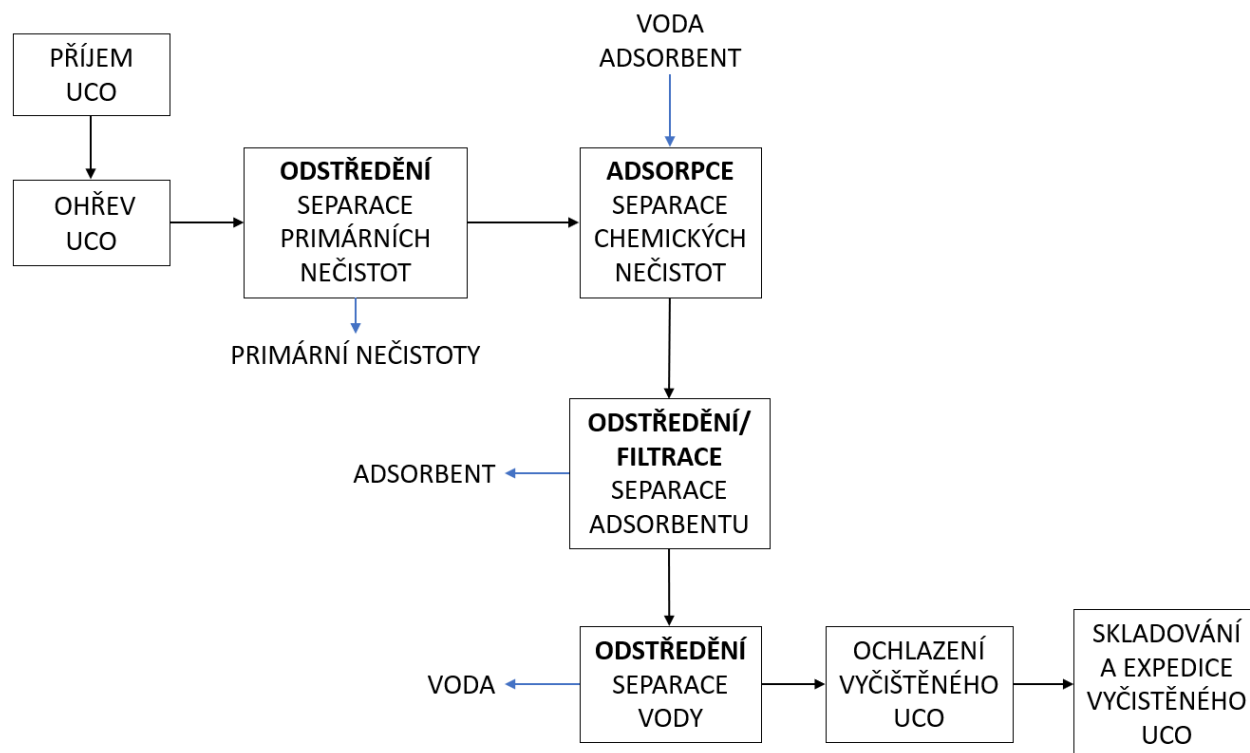
Při tvoření patentové rešerše lze narazit na nespočet technologií a jejich částí, které mají souvislost s upotřebeným kuchyňským olejem. Při zaměření na purifikační linky byly nalezeny následující patenty.

KR102378685B1 [28]. Systém pro čištění UCO zahrnuje v prvním kroku smísení s horkou vodou, která naváže některé cizí látky, a odfiltrování pevných látek. V druhém kroku je UCO zahříván, přičemž se vysráží navázaná vlhkost spolu s cizími látkami do větších kapiček. Následuje vakuová separace veškeré vlhkosti. Dalším krokem je ochlazení a následné zrání, kdy je UCO míchán a udržován při konstantní teplotě. Posledním krokem je odvoskování v "dewaxeru", ve kterém mají být od sebe odděleny rostlinné oleje a živočišné tuky [28].

JP2007145974A [29]. UCO je nejprve smíchán s adsorbentem. Čisticí aparát sestává z míchané a vyhřívané nádrže, v níž dochází k adsorpci, a dále z hrubého a jemného filtru, jež mají za úkol odseparovat nasycený adsorbent a tuhé nečistoty z oleje [29].

4.2 Koncepční návrh automatizované linky

Na základě všech výše uvedených poznatků byl vytvořen koncepční návrh linky na čištění UCO, jenž je znázorněn pomocí blokového schématu na Obrázku 9.



Obrázek 9 - Blokové schéma linky na čištění UCO

UCO je nejprve rekuperačně ohříván na teplotu 60 °C. Odstranění primárních nečistot, zejména pevných částic, je provedeno pomocí odstředování na bubnové odstředivce. Následuje další zahřátí a smíchání s vodou, v níž se rozpustí polární sloučeniny a některé další nežádoucí látky. Větší množství vody také pomůže uvolnit a vysrážet vlhkost v oleji. Dále následuje adsorpce s použitím fluidního lože, přičemž nasycený sorbent odchází společně s přečištěným UCO a poté je odseparován filtrací, popřípadě odstředováním. Předposledním krokem je separace vody, a to na talířové odstředivce. Nakonec je vyčištěný UCO ochlazen na teplotu okolí a připraven k expedici.

4.2.1 Výběr technologického kroku pro modelové experimenty

Pro účely diplomové práce se jako vhodný technologický krok jeví odstranění primárních nečistot – pevných látek obsažených v UCO. Poznatky získané v rešerši říkají, že ve většině případů bývají pevné nečistoty z UCO odstraňovány pomocí filtrace. V této diplomové práci však bude zkoumána separace pevných částic pomocí odstředování, konkrétně na bubnové odstředivce dostupné v laboratoři. Nejprve je potřeba provést teoretické výpočty, které mají svůj podklad uveden v následující kapitole. V pozdějších kapitolách je pak popsáno nastavení a výsledky experimentů uskutečněných v laboratorním měřítku. Poslední částí diplomové práce je scale-up návrh bubnové odstředivky pro průmyslové aplikace.

5 Teoretický základ

Při odstředování se využívá principu dělení směsí působením vnějších objemových sil. Takové dělení je vhodné pro heterogenní směsi, jejichž složky mají rozdílnou hustotu (1) a alespoň jedna ze složek je v tekutém stavu (tzv. kontinuální fáze) [30]. Druhá složka, která mívá zpravidla vyšší hustotu, je označována jako skupenství částic, nemusí se však jednat pouze o pevné látky, ale i o kapalinu.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

kde m je hmotnost látky, V objem látky a ρ její hustota [31].

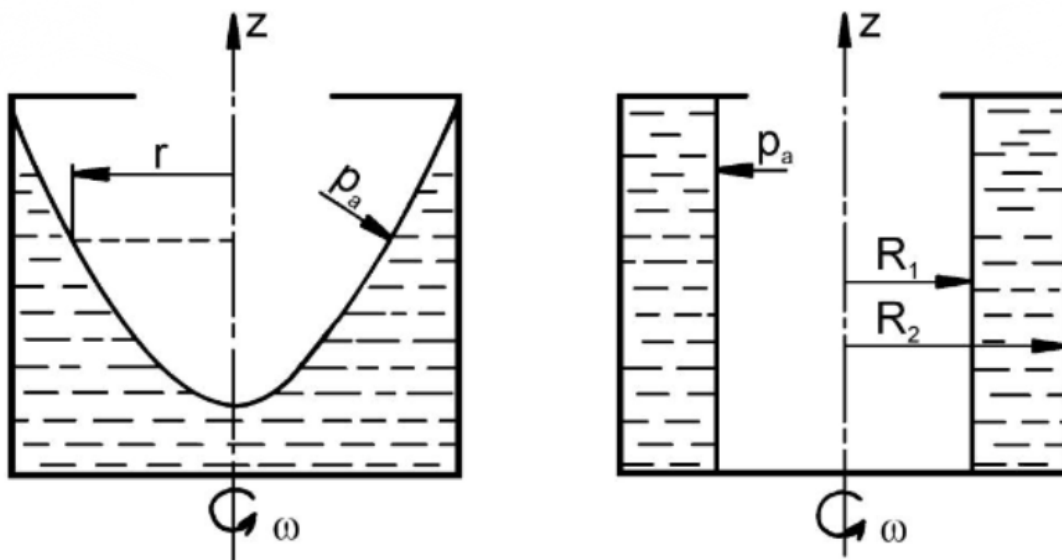
Měřítkem úspěšnosti těchto procesů separace je především minimální velikost odloučené částice a doba zdržení, která se odvíjí od velikosti usazovací rychlosti. Velikost usazovací rychlosti odpovídá silovému účinku, jež působí na částice.

5.1 Základní vztahy teorie odstředování

Matematický popis odstředování vychází z teorie usazování, při kterém je skupenství částic oddělováno od kontinuální fáze účinkem gravitační síly. Při odstředování však rotuje směs v odstředivém poli vysokou úhlovou rychlostí a její těžší složky putují od osy ke stěnám rotační nádoby. Na částice tak působí především odstředivá síla, kromě ní ale také vztlková síla v odstředivém poli, Coriolisova síla, tíhová síla, vztlková síla v gravitačním poli, odporová síla a setrvačná síla. Řadu těchto sil je však možné zanedbat, protože jejich velikost bývá oproti odstředivým účinkům mnohonásobně menší. Poměr odstředivé a gravitační síly se nazývá dělicí faktor a je roven Froudovu číslu (2). V praxi u odstředivek nabývá hodnot 50 až $5 \cdot 10^4$, respektive $1 \cdot 10^6$ pro ultraodstředivky [30].

$$\frac{F_o}{G} = \frac{u_\varphi^2}{r \cdot g} = Fr \quad (2)$$

kde F_o je odstředivá síla, G je gravitační síla, u_φ obvodová rychlost, r je charakteristický rozměr (v tomto případě poloměr), g je gravitační zrychlení a Fr Froudovo číslo. Froudovo číslo slouží také jako ukazatel tvaru, který zaujme směs v odstředivce, jak je ukázáno na Obrázku 10. Při nižším Froudově čísle vytváří směs rotační paraboloid, při vysokých hodnotách rotuje směs v mezikruží při stěnách nádoby.



Obrázek 10 - Tvar směsi v odstředivce, vlevo při malých Fr , vpravo při velkých Fr [30]

Pro sestavení rovnováhy sil působících na částice jsou vytvořeny určité předpoklady. Vzhledem ke skutečnosti, že cíleným směrem pohybu částic je směr radiální, a tedy je pro výpočty podstatná radiální složka usazovací rychlosti, bude rovnováha sil sestavena pouze v radiálním směru. Setrvačnou sílu, jež na částice působí v radiálním směru po celou dobu odstředování, je možné vzhledem k ostatním silám zanedbat [30]. Tím vyplyne rovnováha (3):

$$F_o - F_{ov} - F_r = 0 \quad (3)$$

kde F_o je odstředivá síla, F_{ov} je vztlková síla v odstředivém poli a F_r je radiální složka odporové síly. Pro výpočty těchto sil bude uvažován kulový tvar částic o průměru D a objemu V (4) [32], částice budou mít hustotu ρ_s a budou se pohybovat na poloměru r v kapalině s hustotou ρ , jež bude rotovat úhlovou rychlostí ω . Pak se odstředivá síla určí pomocí vztahu (5), vztlková síla pomocí vztahu (6), a odporová síla vztahem (7) [30].

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot D^3 \quad (4)$$

$$F_o = \frac{\pi \cdot D^3}{6} \rho_s \cdot r \cdot \omega^2 \quad (5)$$

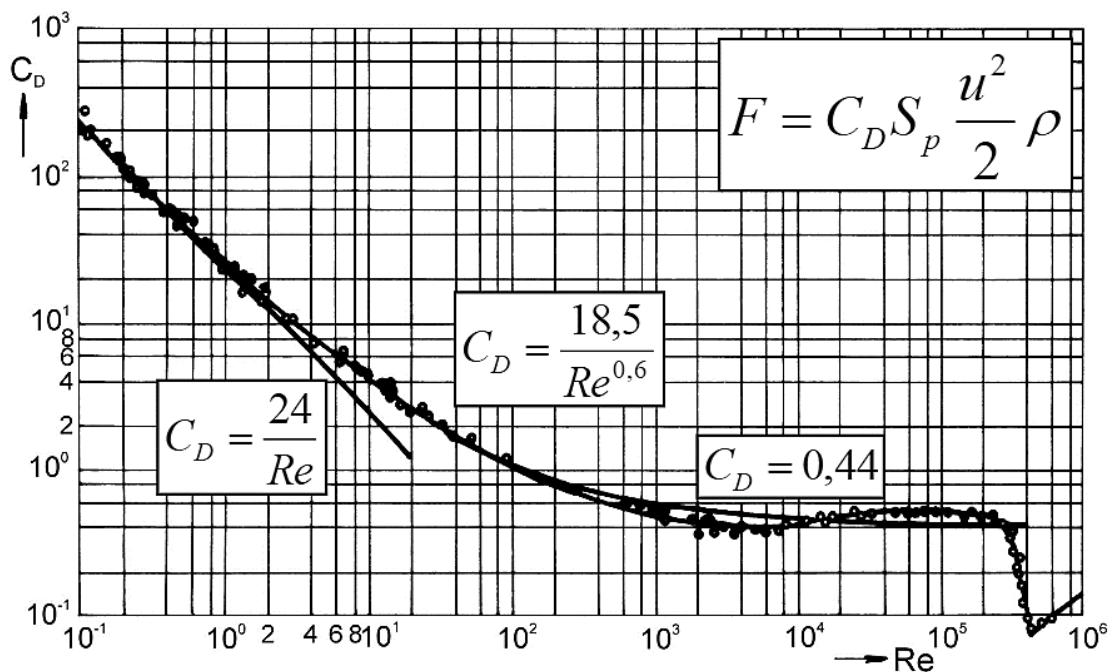
$$F_{ov} = \frac{\pi \cdot D^3}{6} \rho \cdot r \cdot \omega^2 \quad (6)$$

$$F_r = C_D \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \frac{u^2}{2} \rho \quad (7)$$

Ve vztahu pro odporovou sílu figuruje usazovací rychlost u a odporový součinitel C_D , který je funkcí tvaru částice a Reynoldsova čísla (8) [33]. Pro jeho určení při uvažování kulového tvaru částic se používá závislost na Obrázku 11.

$$Re = \frac{u \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (8)$$

kde u je rychlost částice, D její průměr, ρ je hustota kontinuální složky a μ její dynamická viskozita.



Obrázek 11 - Závislost odporového součinitele na Reynoldsově čísle [33]

Tři vzorce pro výpočet odporového součinitele platí pro tři různé oblasti determinované velikostí Reynoldsova čísla. Tyto tři oblasti se nazývají Stokesova oblast ($Re \leq 2$), přechodová oblast ($2 < Re < 500$) a Newtonova oblast ($500 < Re < 300\,000$) [33].

Po dosazení vzorců (5), (6) a (7) do vztahu pro rovnováhu sil (3) může být vyjádřena mezní usazovací rychlost u (9), která je základem pro určení doby zdržení, potažmo minimální velikosti odloučené částice [30].

$$u = \sqrt{\frac{4D \cdot (\rho_s - \rho) \cdot r \cdot \omega^2}{3 C_D \cdot \rho}} \quad (9)$$

Vzhledem k tomu, že ve vztahu pro usazovací rychlost figuruje odporový součinitel, je potřeba vzít v potaz oblast, ve které se daný pohyb nachází, čili velikost Reynoldsova čísla. Vztah

(8) pro jeho výpočet ale obsahuje právě neznámou usazovací rychlost, proto je pro určení oblasti vytvořeno jiné bezrozměrné kritérium $C_D Re^2$ (10), které usazovací rychlost neobsahuje [30].

$$C_D Re^2 = \frac{4 D^3 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot \rho \cdot r \cdot \omega^2}{3 \mu^2} \quad (10)$$

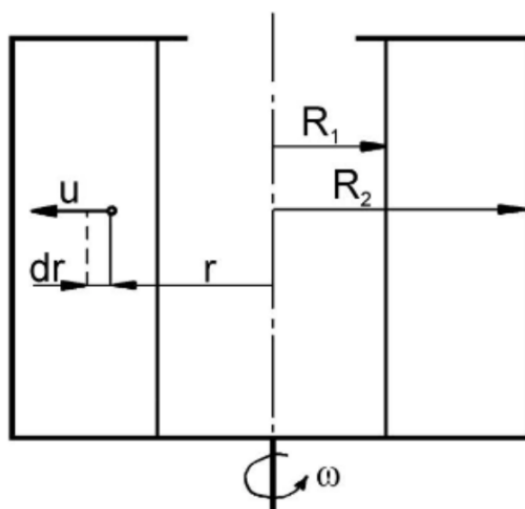
Toto nové bezrozměrné kritérium potřebuje nové hodnoty mezí oddělujících oblasti, jež jsou následující: Stokesova oblast ($C_D Re^2 \leq 48$), přechodová oblast ($48 < C_D Re^2 < 1,1 \cdot 10^5$) a Newtonova oblast ($1,1 \cdot 10^5 < C_D Re^2 < 4 \cdot 10^{10}$) [33]. V oblastech v tomto pořadí pak platí vztahy pro výpočet usazovací rychlosti (11), (12) a (13) [30].

$$u = \frac{D^2 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot r \cdot \omega^2}{18 \cdot \mu} \quad (11)$$

$$u = 0,153 \frac{D^{1,14} \cdot (\rho_s - \rho)^{0,71} \cdot r^{0,71} \cdot \omega^{1,42}}{\rho^{0,29} \cdot \mu^{0,43}} \quad (12)$$

$$u = 1,74 \sqrt{\frac{D \cdot (\rho_s - \rho) \cdot r \cdot \omega^2}{\rho}} \quad (13)$$

Radiální souřadnice r , která se vyskytuje ve výše uvedených vzorcích, nemá konstantní hodnotu, ale jedná se o aktuální polohu částice v čase, viz Obrázek 12.



Obrázek 12 - Diferenciace polohy částice [30]

Usazovací rychlost, která též závisí na r , je tedy rovněž proměnná v čase. Pro výpočet doby usazování je tedy nutné integrovat (14), (15) [30].

$$dr = u dt \quad (14)$$

$$\int_0^t dt = \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{u} \quad (15)$$

Po postupném dosazení vzorců (11), (12) a (13) do vztahu (15) a následné integraci v daných mezích lze získat vztahy pro výpočet doby usazování částice o průměr D ve Stokesově (16), přechodové (17) a Newtonově (18) oblasti tak, aby byla odloučena částice o daném minimálním průměru [30].

$$t = \frac{18 \cdot \mu}{D^2 \cdot (\rho_s - \rho) \cdot \omega^2} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (16)$$

$$t = 22,5 \frac{\rho^{0,29} \cdot \mu^{0,43}}{D^{1,14} \cdot (\rho_s - \rho)^{0,71} \cdot \omega^{1,42}} (R_2^{0,29} - R_1^{0,29}) \quad (17)$$

$$t = 1,15 \sqrt{\frac{\rho}{(\rho_s - \rho) \cdot \omega^2}} (\sqrt{R_2} - \sqrt{R_1}) \quad (18)$$

Posledním potřebným vzorcem je vztah pro výpočet doby zdržení při známém průtoku (\dot{V}) a objemu aparátu (V) (19) [30].

$$t_z = \frac{V}{\dot{V}} \quad (19)$$

Základní podmínkou pro úspěšnost separace částic a pro návrhové výpočty rozměrů zařízení je, že doba zdržení t_z musí být větší nebo rovna době usazování t pro požadovanou velikost částice D na vzdálenosti určené poloměry R_1 a R_2 .

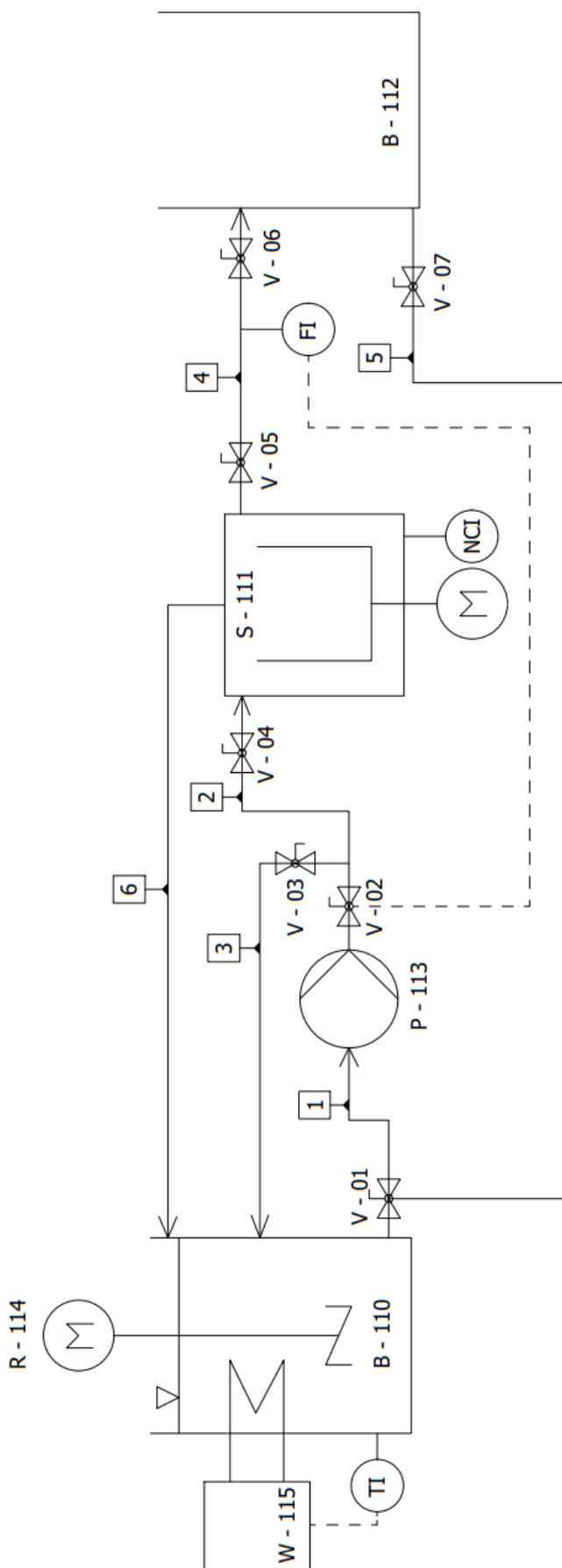
6 Experimentální práce

Experimentální práce, která představuje hlavní vlastní praktickou část této diplomové práce, se skládala z návrhu a vytvoření laboratorní aparatury, výběru modelové experimentální směsi UCO a zjištění jejích vlastností, teoretických výpočtů odlučivosti částic a ověření těchto výpočtů vybranými modelovými experimenty. Z výsledků experimentů byly učiněny poznatky pro další rozvoj této oblasti procesního inženýrství.

6.1 Uspořádání a popis aparatury

Pro provedení experimentů byla navržena a sestavena speciální aparatura v halové laboratoři. Hlavní části aparatury tvořily dvě zásobní nádrže, objemové čerpadlo a bubnová odstředivka. Směs mezi těmito prvky proudila hadicemi, které k nim byly připojeny mosaznými fitinkami a kulovými kohouty. Poslední dvě zařízeními byla axiální šestilopátkové míchadlo se šikmými lopatkami o průměru 130 mm v zásobní nádrži B-110 a termostat vyvedený v topnou spirálu rovněž do nádrže B-110. Oba tyto prvky sloužily k přípravě suspenze, konkrétně k homogenizaci částic v kontinuální fázi a k ohřevu na požadovanou teplotu. Aparatura byla doplněna o měřicí prvky pro teplotu a průtok, měření a nastavení otáček bylo integrováno přímo na odstředivce. Obrázek 13 zobrazuje PID schéma měřicí trati, tabulku proudů a tabulku se základními parametry použitých zařízení.

B - 110 ZÁSObNÍK SUSPENZE
 S - 111 BUBNOVÁ ODSŤRĚDÍVKA
 B - 112 ZÁSObNÍK ODSŤRĚDĚNĚHO OLEJE
 P - 113 ČERPADLO
 R - 114 AXIÁLNÍ MÍCHADLO
 W - 115 TERMOSTAT



ČÍSLO	MĚDIUM
1	Suspence
2	Suspence
3	Suspence
4	Čistý olej
5	Čistý olej
6	Nečistoty

TABULKA ZAŘÍZENÍ	
OZNAČENÍ	NÁZEV
B-110	ZÁSObNÍK SUSPENZE
S-111	BUBNOVÁ ODSŤRĚDÍVKA
B-112	ZÁSObNÍK ODSŤRĚDĚNĚHO OLEJE
P-113	ODSŤRĚDÍVĚ ČERPADLO
R-114	AXIÁLNÍ MÍCHADLO
W-115	TERMOSTAT
	ZÁKLADNÍ PARAMETRY
	OBJEM 120 l
	OTÁČKY 300÷3500 ot/min; OBJEM 5,5 l; PŘÍKON MOTORU 1,5 kW
	OBJEM 120 l
	PŘŮTOK 80÷250 l/min; MAX. TEPLOTA KAPALINY 90 °C
	ŠESTILOPKOVĚ SE ŠIKMÝMI LOPATKAMI; OTÁČKY 60÷400 ot/min
	MAX. PŘŮTOK 20 l/min; PŘÍKON 2,3 kW

Obrázek 13 – PID schéma experimentální aparatury

Provoz měřicí trati měl dva režimy, a to režim odstředování, při kterém byla získávána kýžená data, a režim přečerpávání a čištění, během kterého byla aparatura připravována na další měření.

Při režimu odstředování se začínalo s naplněnou nádrží B-110, zapnutým míchadlem a termostatem. Aby bylo rychleji dosaženo požadované experimentální teploty suspenze, byly nejprve otevřeny pouze kohouty V-01, V-02 a V-03. Suspenze tak proudila z nádrže B-110 proudem 1 přes čerpadlo P-113, kde se vlivem disipace vazkým třením vydatně ohřívala, proudem číslo 3, jenž sloužil jako bypass, zpět do B-110. Po ohřátí směsi byl přivřen kohout V-02, otevřen kohout V-04 a po zaplavení odstředivky S-111 také kohouty V-05 a V-06. Poté byla odstředivka najeta na dané otáčky, pomocí kohoutu V-02 na výtlačku čerpadla byl nastaven průtok a po ustálení procesu byla na proudu 4 změřena hodnota průtoku a odebrán vzorek odstředěného oleje. Kohout V-07 zůstal zavřený až do naplnění nádrže B-112.

V režimu přečerpávání a čištění byla přepojena trať tak, aby výpusť z nádrže B-112 vedla do čerpadla P-113 a výpusť z nádrže B-110 byla kohoutem V-01 uzavřena. Rovněž bylo vypnuto míchání a ohřívání. Dále byly otevřeny kohouty V-02 a V-03, kohout V-04 zůstal zavřený. Přečištěný olej byl tedy přes proudy 5 a 3 přečerpán zpět do nádrže B-110. Nakonec byla ručně vyčištěna odstředivka S-111 od odseparovaných pevných částic, které byly proudem 6 přeneseny v nádobách zpět do nádrže B-110. Na Obrázku 14 je fotografie experimentální aparatury.



Obrázek 14 - Fotografie aparatury (zleva termostát, míchadlo, zásobní nádrž, čerpadlo, odstředivka)

6.1.1 Parametry odstředivky

Nejdůležitějším zařízením experimentální aparatury je laboratorní bubnová odstředivka CENTRIFUGE "RAPIDE" RC 30 Vx R od společnosti Rousselet Robatel. Pro teoretické výpočty a vyhodnocení experimentů je nutné znát některé geometrické parametry odstředivky, ty uvádí Tabulka 1.

Tabulka 1 - Parametry odstředivky

Vnější průměr bubnu	D_B	300	mm
Tloušťka stěny bubnu	s	2	mm
Vnitřní poloměr bubnu	R_2	148	mm
Poloměr přepadu	R_1	100	mm
Výška bubnu	L	148	mm
Užitný objem bubnu	V	5,5	l

Jak už je ukázáno na Obrázku 13, rozsah otáček odstředivky je $300 \div 3500$ otáček za minutu. Odstředivka má odnímatelný buben, což přišlo vhod při čištění od pevných částic. Elektromotor, jenž odstředivku pohání, má instalovaný výkon 1,5 kW.

6.2 Použité látky a jejich vlastnosti

Pro změření odlučivosti částic na bubnové odstředivce byla vytvořena modelová směs z čerstvé strouhanky a čerstvého rafinovaného řepkového oleje, aby mohly být jasně stanoveny vlastnosti a množství jednotlivých složek a také pro lepší optické vlastnosti čerstvého oleje oproti UCO pro snazší porovnání vzorků odstředěného oleje. Olej byl použit v množství 100 litrů, strouhanka v 1% objemovém podílu (1360 gramů) pro základní testy odlučivosti. Dále byla připravena 3% obj. směs (4080 g) pro ověření vlivu koncentrace pevných částic na kvalitu separace. Nakonec bylo provedeno měření s reálným UCO, který byl nasbírán v ČR a jehož objem byl 50 litrů, koncentrace pevných částic přibližně 6 %.

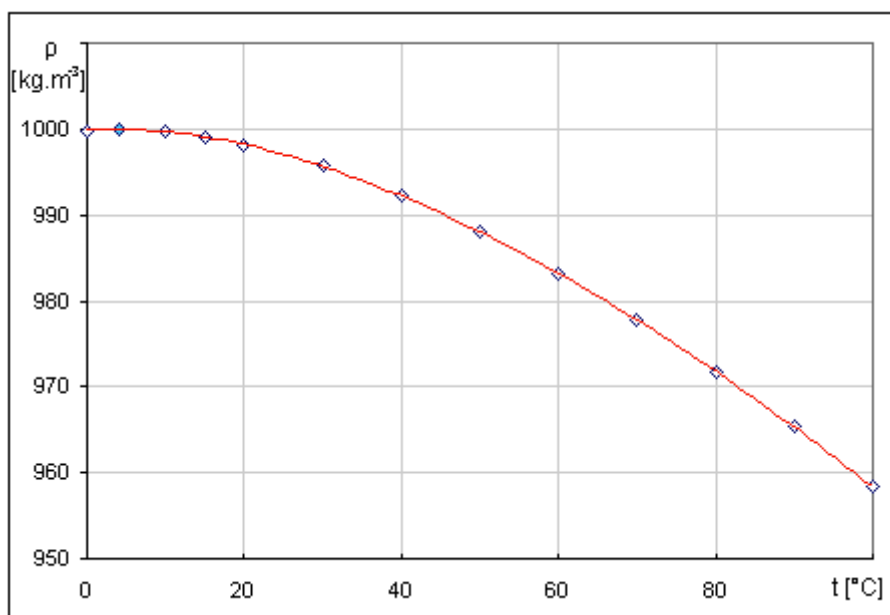
Před započítáním experimentů na odstředivce byly naměřeny fyzikální vlastnosti strouhanky a oleje potřebné pro teoretické výpočty, konkrétně hustota a dynamická viskozita oleje v závislosti na teplotě a hustota strouhanky, pro niž byla změřena i distribuce velikosti částic.

6.2.1 Strouhanka

Jako modelové pevné částice byla zvolena obyčejná strouhanka ze světlého pečiva, která má podobné vlastnosti jako běžné nečistoty v UCO, mezi nimiž bývá zastoupena největším

podílem. Nejvýznamnější vlastností pro výpočty je její hustota, která byla stanovena opakovaným pyknometrickým měřením (pyknometr měl objem 25 ml při 20 °C), pomocí demineralizované vody. Nejprve byla připravena směs o 10 % hm. strouhanky v demineralizované vodě. Poté byl pyknometr zvážen na analytické váze s přesností na setiny gramu a zkalibrován demineralizovanou vodou na teplotu v místnosti. Po vysušení byl naplněn směsí a opět zvážen.

Obrázek 15 ukazuje teplotní závislost hustoty demineralizované vody, z níž byla získána hodnota pro teplotu v laboratoři.



Obrázek 15 - Závislost hustoty demineralizované vody na teplotě [34]

Tabulka 2 uvádí naměřené a zjištěné hodnoty, ze kterých byla stanovena hustota strouhanky níže uvedeným výpočtem.

Tabulka 2 - Hodnoty pro výpočet hustoty strouhanky

	Měření 1	Měření 2
Teplota v místnosti	22,3 °C	22,3 °C
Objem pyknometru při 20 °C	25 ml	25 ml
Zkalibrovaný objem pyknometru	25,04 ml	25,04 ml
Hmotnost směsi v pyknometru	46,21 g	46,20 g
Hmotnost pyknometru	20,59 g	20,59 g
Hmotnost směsi	25,63 g	25,62 g
Hustota demineralizované vody při 22,3 °C	997,7 kg/m³	997,7 kg/m³

Rovnice (20), (21), (22) a (23) provázejí výpočtem, jehož výsledkem je hustota strouhanky pro první měření. Nejprve bylo potřeba určit hmotnost samotné strouhanky, a to přes hmotnostní koncentraci strouhanky ve vodě. V dalším kroku byl vypočten objem vody pomocí vzorce (1) z hmotnosti vody, jež byla získána rozdílem hmotnosti směsi a hmotnosti strouhanky, a z hustoty vody při 22,3 °C. Dále byl prostým rozdílem objemu pyknometru a objemu vody vypočten objem strouhanky. Nakonec byla opět podle vzorce (1) stanovena hustota strouhanky na hodnotu 1333 kg/m³.

Z naměřených hodnot druhého měření byl vypočtena hodnota hustoty 1326 kg/m³. Pro vyhodnocování modelových experimentů pak byla uvažována hodnota 1330 kg/m³.

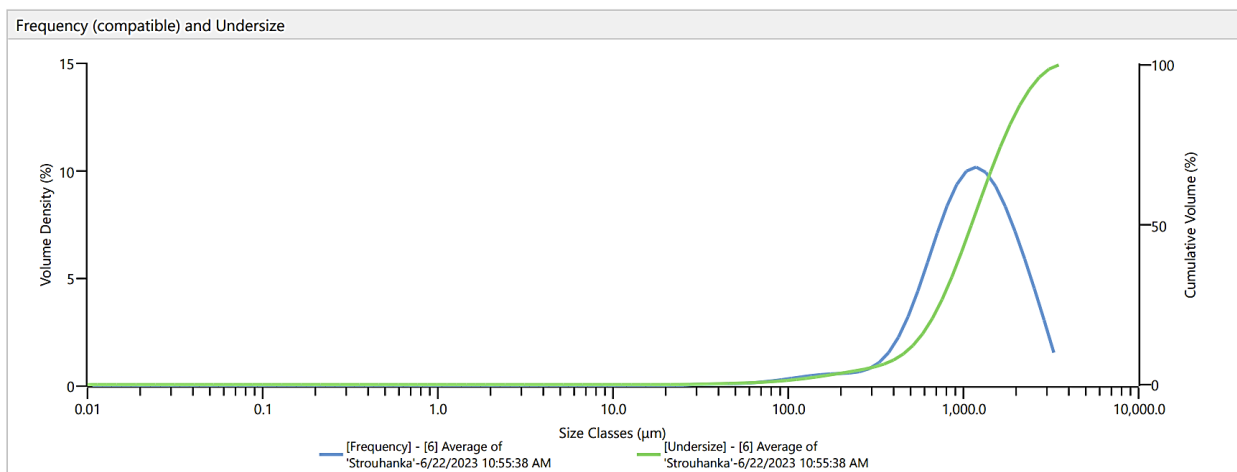
$$m_{\text{strouhanka}} = m_{\text{směs}} \cdot c_{\text{strouhanka}}^m = 25,63 \cdot 0,1 = 2,563 \text{ g} \quad (20)$$

$$V_{\text{voda}} = \frac{m_{\text{směs}} - m_{\text{strouhanka}}}{\rho_{\text{voda}}} = \frac{(25,63 - 2,563)}{997,67 \cdot 10^{-3}} = 23,12 \text{ ml} \quad (21)$$

$$V_{\text{strouhanka}} = V_{\text{pyknometr}} - V_{\text{voda}} = 25,04 - 23,12 = 1,92 \text{ ml} \quad (22)$$

$$\rho_{\text{strouhanka}} = \frac{m_{\text{strouhanka}}}{V_{\text{strouhanka}}} = \frac{2,563 \cdot 10^{-3}}{1,92 \cdot 10^{-6}} = 1333 \text{ kg/m}^3 \quad (23)$$

Měření distribuce velikosti částic probíhalo pomocí analyzáru velikosti částic Malvern MASTERSIZER 3000 metodou laserové difrakce v plynné disperzi. Výsledky znázorňují Obrázek 16 a Obrázek 17. Tabulka výsledků na Obrázku 17 říká, že 90 % částic má větší velikost než 464 μm. Částice s velikostí do 100 μm, o které se zmiňuje literatura [3], tvoří zhruba dvouprocentní podíl.



Obrázek 16 - Distribuce velikosti částic

Result	
Concentration	0.1452 %
Span	1.602
Uniformity	0.490
Specific Surface Area	8.513 m ² /kg
D [3,2]	705 µm
D [4,3]	1240 µm
Dv (10)	464 µm
Dv (50)	1110 µm
Dv (90)	2250 µm

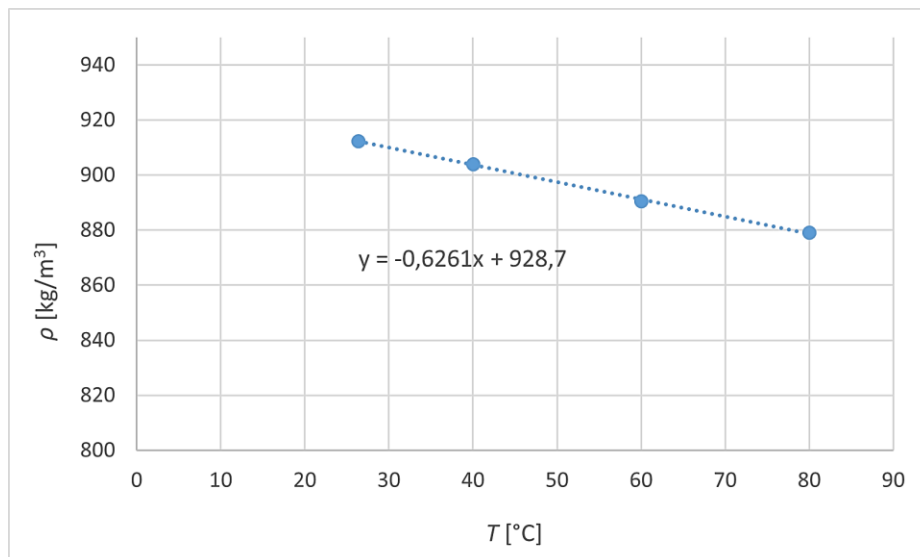
Obrázek 17 - Výsledky měření distribuce velikosti částic

6.2.2 Řepkový olej

Čerstvý řepkový olej sice nemá zcela stejné vlastnosti jako přesmažené oleje, jejich fyzikální vlastnosti jsou však stále dostatečně blízké, a tak nebylo použití čerstvého oleje jako modelové kontinuální složky nevhodné.

Pro výpočty je potřeba znát hustotu a dynamickou viskozitu kapalně fáze suspenze. Oba tyto parametry byly změřeny v závislosti na teplotě. Výsledkem těchto měření jsou tedy rovnice teplotních závislostí hustoty a viskozity, aby mohly být následně vypočteny hodnoty těchto veličin pro každou teplotu, při které byly provedeny experimenty

Hustota byla měřena pyknometricky (pyknometr s objemem 50 ml při teplotě 20 °C byl zkalibrován demineralizovanou vodou obdobně jako při měření hustoty strouhanky) při pokojové teplotě a dále po zahřátí oleje v topném hnízdě postupně na 40, 60 a 80 °C. Graf (Obrázek 18) znázorňuje výsledky měření hustoty oleje. Z grafu byl lineární regresí získán vztah (24) pro výpočet hustoty za dané teploty.

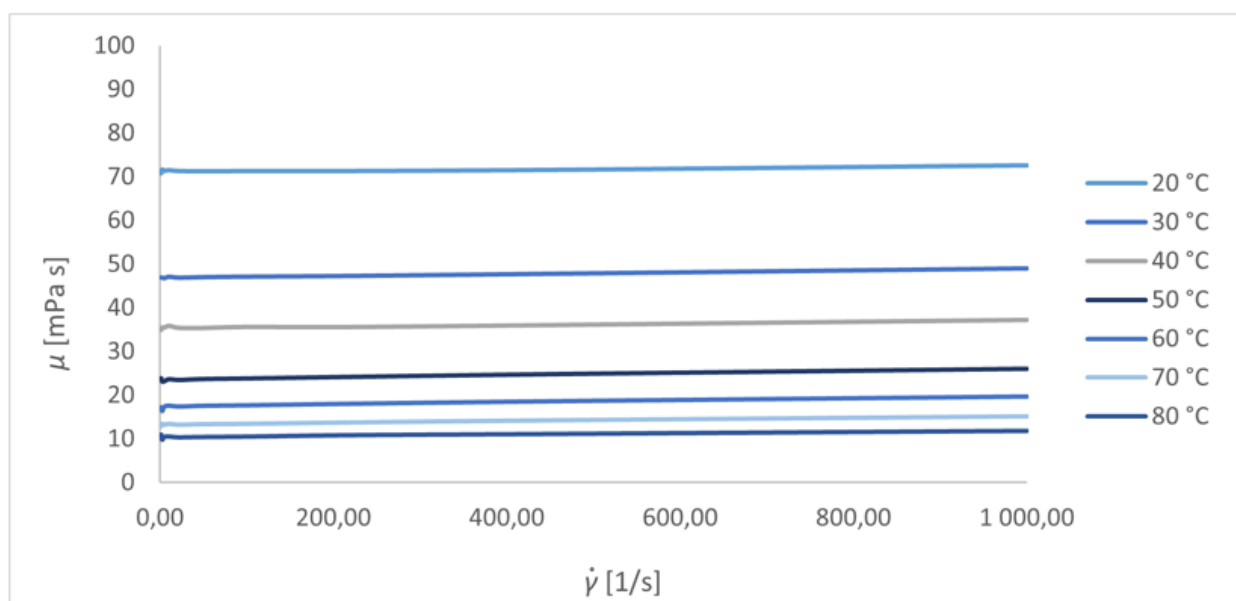


Obrázek 18 - Závislost hustoty oleje na teplotě

Rovnice teplotní závislosti hustoty oleje:

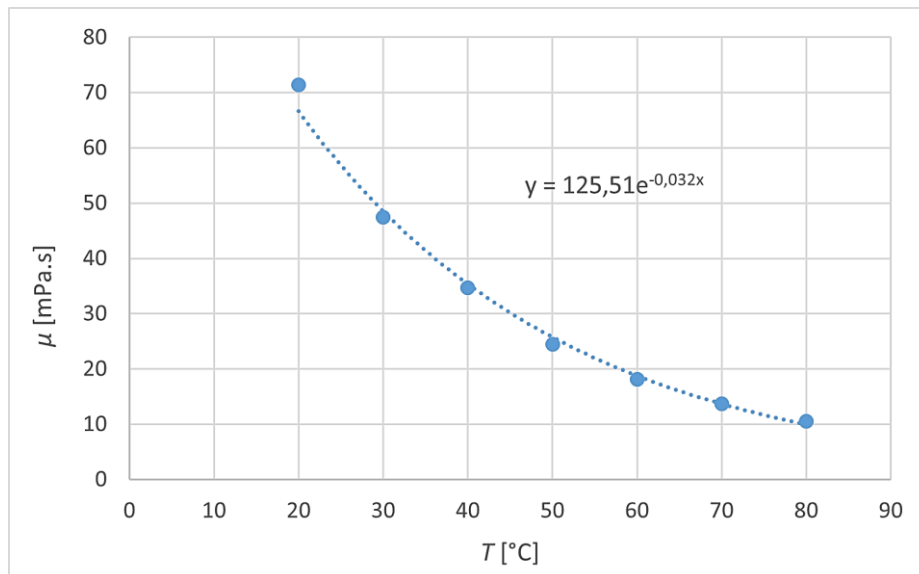
$$\rho = -0,6261 \cdot T + 928,7 \quad (24)$$

Dynamická viskozita oleje byla naměřena na rotačním reometru Anton Paar MCR 102 v konfiguraci se dvěma sousými válci. Vzorek byl v reometru postupně zahříván od 20 do 80 °C s krokem 10 °C. Reometr naměřil při každé teplotě 20 hodnot viskozity při rostoucí a následně klesající smykové rychlosti. Tyto hodnoty byly prakticky konstantní (lišily se v setinách mPa s), jak je vidět z grafické závislosti dynamické viskozity na smykové rychlosti pro jednotlivé teploty znázorněné na Obrázku 17. Tato skutečnost dokazuje newtonské chování oleje.



Obrázek 19 - Graf závislosti dynamické viskozity oleje na smykové rychlosti

Proto mohla být pro vyhodnocení závislosti uvažována vždy střední hodnota z dvaceti naměřených hodnot viskozity. Obrázek 20 ukazuje grafickou závislost vytvořenou z těchto středních hodnot viskozity, ze které byla získána rovnice exponenciální závislosti viskozity oleje na teplotě (25).



Obrázek 20 - Závislost dynamické viskozity oleje na teplotě

Vztah pro teplotní závislost dynamické viskozity oleje:

$$\mu = 125,51 \cdot e^{-0,032 \cdot T} \quad (25)$$

6.2.3 UCO

Reálný upotřebený kuchyňský olej byl nasbíraný společností ORLEN Unipetrol a pro účely této diplomové práce byl dodán dne 27.7. v množství 50 litrů s oddělenou pevnou fází v množství 1,125 kg. Nejednalo se však o veškerou pevnou fázi, která se v UCO nacházela, neboť na dně kanystrů s olejem byla zřetelná vrstva sedimentu. Kontinuální fáze nebyla oproti čerstvému oleji téměř vůbec průhledná.

6.3 Modelové experimenty

Po připravení aparatury a modelových látek bylo potřeba definovat procesní podmínky. Mezi nastavitelné parametry patří teplota, otáčky odstředivky a průtok, jenž determinuje dobu zdržení. Těmto parametrům byly na základě poznatků z rešerše a možností příslušných zařízení zvoleny hodnoty, pro jejichž kombinace byla vypočtena velikost odloučené částice. Následně bylo vybráno pro koncentraci strouhanky 1 % osm a pro koncentraci strouhanky 3 % čtyři

nejrelevantnější kombinace, které byly fyzicky odzkoušeny. Pro experimenty s UCO pak byly zvoleny dvě kombinace podmínek, a to i na základě výsledků experimentů s modelovými suspenzemi. Hodnoty nastavitelných parametrů jsou následující:

- Teplota: 30 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C
- Otáčky: 1500 ot/min, 2000 ot/min, 2500 ot/min, 3000 ot/min, 3500 ot/min
- Průtok: "Malý průtok" (cca 0,114 l/s), "Velký průtok" (cca 0,228 l/s)

6.3.1 Teoretické výpočty odlučivosti

Pro každý ze dvou průtoků byla vytvořena matice všech kombinací otáček a teplot. Pro každou z těchto kombinací byla spočtena hodnota bezrozměrného kritéria $C_D Re^2$ dle vztahu (10), čímž bylo určeno, do které oblasti obtékání dané podmínky experimentu patří (Tabulka 3), a následně byl pro každou kombinaci vybrán odpovídající ze vzorců (11), (12), (13), z něž byla vyjádřena a vypočtena teoretická velikost odloučené částice (Tabulky 4 a 5). Výpočet dílčích proměnných pro jedny hodnoty experimentálních podmínek ukazují rovnice (26), (27) a (28). Výpočet hodnoty kritéria $C_D Re^2$ pak rovnice (29), přičemž byla pro dosažení za D vybrána velikost částice 50 μm . Za r byl dosazen vnitřní poloměr bubnu R_2 . Výpočet doby zdržení pro oba průtoky je uveden rovnicemi (30) a (31) a výpočet minimální velikosti odloučené částice rovnicí (32).

$$\rho = -0,6261 \cdot 30 + 928,7 = 909,9 \text{ kg/m}^3 \quad (26)$$

$$\mu = 125,51 \cdot e^{-0,032 \cdot 30} = 48,06 \text{ mPa s} \quad (27)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1500}{60} = 157,1 \text{ 1/s} \quad (28)$$

$$C_D Re^2 = \frac{4 \cdot 0,00005^3 \cdot (1330 - 909,9) \cdot 909,9 \cdot 0,148 \cdot 157,1^2}{0,04806^2} = 0,1 \quad (29)$$

První sada experimentálních podmínek (30 °C a 1500 ot/min) spadá do Stokesovy oblasti, neboť hodnota bezrozměrného kritéria $C_D Re^2$ je rovna 0,1, což je méně, než mezní hodnota 48.

Tabulka 3 - Hodnoty kritéria $C_D Re^2$

$C_D Re^2$	T		30 °C	40 °C	60 °C	80 °C
	ρ	μ	909,9 kg/m ³	903,7 kg/m ³	891,1 kg/m ³	878,6 kg/m ³
N	ω	μ	48,06 mPa s	34,9 mPa s	18,4 mPa s	9,7 mPa s
1500 ot/min	157,1 1/s		0,1	0,2	0,7	2,6
2000 ot/min	209,4 1/s		0,2	0,3	1,3	4,6
2500 ot/min	261,8 1/s		0,3	0,5	2	7,2
3000 ot/min	314,2 1/s		0,4	0,8	2,8	10,3
3500 ot/min	366,5 1/s		0,6	1,1	3,9	14

Všechny výsledné hodnoty $C_D Re^2$ rovněž spadají do Stokesovy oblasti, tudíž výpočet velikosti částice pro všechny kombinace experimentálních podmínek proběhne podle vztahu (11). V ukázce výpočtu budou dosazeny hodnoty pro stejné podmínky, jako při výpočtu $C_D Re^2$ a delší doba zdržení odpovídající průtoku 0,114 l/s.

$$t = \frac{5,5}{0,114} = 48,25 \text{ s} \quad (30)$$

$$t = \frac{5,5}{0,228} = 24,12 \text{ s} \quad (31)$$

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu}{t \cdot (\rho_s - \rho) \cdot \omega^2} \ln \frac{R_2}{R_1}} = \sqrt{\frac{18 \cdot 0,04806}{48,25 \cdot (1330 - 909,9) \cdot 157,1^2} \ln \frac{0,148}{0,1}} = 26 \text{ } \mu\text{m} \quad (32)$$

Tabulka 4 obsahuje výsledné hodnoty velikosti částic pro průtok 0,114 l/s, Tabulka 5 pro průtok 0,228 l/s. Teoreticky nejmenší odloučené částice by dle výsledků měly mít velikost řádově v jednotkách až nízkých desítkách mikrometrů, což jsou vzhledem distribuci velikosti částic strouhanky velmi dobré výsledky.

Tabulka 4 - Teoretická velikost odloučené částice pro malý průtok

D [μm] 0,114 l/s	T	30 °C	40 °C	60 °C	80 °C
	ρ	909,9 kg/m³	903,7 kg/m³	891,1 kg/m³	878,6 kg/m³
N	ω / μ	48,06 mPa s	34,9 mPa s	18,4 mPa s	9,7 mPa s
1500 ot/min	157,1 1/s	26	22	16	11
2000 ot/min	209,4 1/s	19	16	12	8
2500 ot/min	261,8 1/s	16	13	9	7
3000 ot/min	314,2 1/s	13	11	8	6
3500 ot/min	366,5 1/s	11	9	7	5

Tabulka 5 - Teoretická velikost odloučené částice pro velký průtok

D [μm] 0,228 l/s	T	30 °C	40 °C	60 °C	80 °C
	ρ	909,9 kg/m³	903,7 kg/m³	891,1 kg/m³	878,6 kg/m³
N	ω / μ	48,06 mPa s	34,9 mPa s	18,4 mPa s	9,7 mPa s
1500 ot/min	157,1 1/s	37	31	22	16
2000 ot/min	209,4 1/s	28	23	17	12
2500 ot/min	261,8 1/s	22	19	13	10
3000 ot/min	314,2 1/s	18	16	11	8
3500 ot/min	366,5 1/s	16	13	10	7

6.3.2 Nastavení experimentů

Tabulka 6 představuje výběr celkem čtrnácti kombinací podmínek pro provedení experimentů. Experimenty s jednoprocenní modelovou směsí mají přinést hlavní sadu výsledků teoretické velikosti nejmenší odloučené částice a vizuální porovnání těchto výsledků s odebranými vzorky odstředěného oleje. Experimenty s modelovou směsí o třech objemových procentech strouhanky a s reálným upotřebeným olejem mají ověřit, že odstředivka separuje pevné částice stejně kvalitně i při větším stupni znečištění.

Tabulka 6 - Výběr experimentálních podmínek

Experimentální směs	Číslo experimentu	Teplota [°C] (30/60/80)	Otáčky [ot/min] (1500/3500)	Průtok (Malý/Velký)
Olej + strouhanka 1 % obj.	1	30	3500	Malý
	2	30	3500	Velký
	3	60	1500	Malý
	4	60	3500	Malý
	5	60	3500	Velký
	6	80	1500	Malý
	7	80	1500	Velký
	8	80	3500	Velký
Olej + strouhanka 3 % obj.	9	60	1500	Malý
	10	60	3500	Malý
	11	60	1500	Velký
	12	60	3500	Velký
UCO	13	60	1500	Velký
	14	60	1500	Malý
	15	60	3000	Malý

6.3.3 Průběh experimentů, naměřená data a výsledky

Během měření byla aparatura nastavena tak, jak je popsáno v kapitole 6.1 – režim odstředování. Po nastavení experimentálních podmínek a dosažení ustáleného stavu byl odebrán vzorek do odměrné kádinky v místě ústí proudu 4 v nádrži B-112 a při tom změřen průtok. Poté bylo vypnuto čerpadlo, proběhlo přenastavení podmínek a po opětovném zapnutí čerpadla a ustálení stavu byl odebrán další vzorek. Během odstředění první stolitrové vsádky byly odebrány vzorky 1 až 5 (dle pořadí v Tabulce 6). Poté byla provedena fáze přečerpávání a čištění. Experimenty číslo 6 až 8 byly provedeny při druhém kole odstředování. Po dalším čištění byla připravena směs s vyšším podílem strouhanky a provedeny experimenty 9 až 12. Nakonec byla modelová směs vyměněna za reálné UCO a byly odebrány poslední vzorky.

Každý vzorek v odměrné kádince byl nejprve ponechán otevřený alespoň 18 hodin, aby mohl vyprchat vzduch vmísený do oleje především během čerpání. Poté byl vzorek ručně promíchán, aby se vznesly usazené neodstředěné částice a po dosažení homogenizace byl z kádinky odebrán menší vzorek do 100 ml průhledné vzorkovnice. Tyto vzorky byly opět

ponechány v laboratoři, aby pevné částice usedly na dno, a to alespoň 8 hodin. Poté byly vzorky nafoceny a vizuálním porovnáním byly vyvozeny závěry experimentu. Dalším výsledkem experimentů byla nejmenší velikost odloučené částice vypočtená z naměřených hodnot.

Směs o 1 % obj. strouhanky

Než bylo započato měření, byl ze zhomogenizované směsi odebrán referenční vzorek, jenž byl po usazení (přibližně po 8 hodinách) vyfocen (Obrázek 21).



Obrázek 21 - Referenční vzorek modelové směsi 1 % obj.

Osm experimentů s první modelovou směsí proběhlo na dvě 100 l vsádky. To vytvořilo jeden nezanedbatelný vliv, a sice zanášení odstředivky sedimentem, které zmenšovalo vnitřní poloměr bubnu a užitný objem bubnu. Při výpočtu doby zdržení a velikosti odloučené částice byly tak musely být hodnoty V a R_2 odhadem zkorigovány. Pro prvních 5 experimentů byl zjištěn nárůst rovnoměrné vrstvy do tloušťky 1,5 cm po celé výšce bubnu (Obrázek 22). U experimentů 6 až 8 byla odhadována střední hodnota mezi tloušťkami sedimentu v horní části a spodní části bubnu, neboť sediment nepokryl stěny bubnu rovnoměrně jako při prvním odstředování

(Obrázek 23). Objem byl zmenšován o přibývající množství sedimentu určené z hmotové bilance. Pro každý výpočet velikosti odloučené částice byla uvažována varianta s největším zanesením.



Obrázek 22 - Odstředěný sediment po prvních pěti experimentech



Obrázek 23 - Odstředěný sediment po experimentech 6, 7 a 8

V Tabulce 7 jsou naměřené a nastavované hodnoty pro každý experiment. Z těchto dat byly získány hodnoty proměnných pro výpočet doby zdržení a velikosti odloučené částice. Poslední dva řádky tabulky se týkají korekce objemu a vnitřního poloměru bubnu, přičemž je zapsán kumulativní součet pro experimenty 1 až 5 a 6 až 8.

Tabulka 7 - Naměřené hodnoty experimentů 1 až 8

Číslo experimentu	1	2	3	4	5	6	7	8
Teplota [°C]	30	30	60	60	60	80	80	80
Otáčky [ot/min]	3500	3500	1500	3500	3500	1500	1500	3500
Objemový průtok [l/s]	0,12	0,227	0,11	0,137	0,259	0,083	0,241	0,285
Zpracovaný objem V_L [l]	25	45	60	70	80	12	24	36
Tloušťka úsady h [mm]	3	6	9	12	15	3	7	12

Výpočty velikosti odloučené částice byly provedeny obdobným postupem, jako teoretické výpočty. Demonstrativní výpočet je zde popsán pro experiment číslo 1. Prvním krokem bylo vypočtení hustoty a dynamické viskozity oleje při dané teplotě (pro experiment 1 viz výpočty (26) a (27)) a úhlové rychlosti (33). Dále byla stanovena korekce objemu bubnu (34) a to odečtením objemu vrstvy strouhanky v bubnu po každém experimentu, jehož hodnota byla získána z hmotové bilance strouhanky (objem zpracovaného oleje vynásobený objemovou koncentrací strouhanky) se zahrnutím porozity vrstvy, od užitého objemu bubnu. Korekce poloměru R_2 byla provedena odečtením tloušťky úsady po každém experimentu od vnitřního poloměru bubnu. Poté byla vypočtena doba zdržení (35) při dosažení zkorigovaného objemu bubnu, a nakonec velikost odloučené částice (36), kde za R_2 byl dosažen zkorigovaný poloměr.

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3500}{60} = 366,5 \text{ 1/s} \quad (33)$$

$$V = V_B - \frac{V_L \cdot c_s^v}{(1 - \varepsilon)} = 5,5 - \frac{25 \cdot 0,01}{(1 - 0,15)} = 5,2 \text{ l} \quad (34)$$

$$t_z = \frac{5,2}{0,12} = 43,43 \text{ s} \quad (35)$$

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot 0,04806}{43,43 \cdot (1330 - 909,9) \cdot 366,5^2} \ln \frac{0,145}{0,1}} = 11,4 \text{ } \mu\text{m} \quad (36)$$

Tabulka 8 shrnuje hodnoty proměnných a výsledky všech osmi experimentů naměřených pro směs s 1 % obj. strouhanky.

Tabulka 8 - Výsledky experimentů 1 až 8

Číslo experimentu	1	2	3	4	5	6	7	8
Úhlová rychlost [1/s]	366,5	366,5	157,1	366,5	366,5	157,1	157,1	366,5
Hustota oleje [kg/m ³]	909,9	909,9	891,1	891,1	891,1	878,6	878,6	878,6
Viskozita oleje [mPa s]	48,06	48,06	18,4	18,4	18,4	9,7	9,7	9,7
Objemový průtok [l/s]	0,12	0,227	0,11	0,137	0,259	0,083	0,241	0,285
Korigovaný R_2 [mm]	145	142	139	136	133	145	141	136
Korigovaný objem V [l]	5,35	5,2	5,05	4,9	4,75	5,38	5,26	5,14
Doba zdržení [s]	44,63	22,9	45,99	35,89	18,35	64,9	21,79	18,02
Velikost odl. částice [μm]	11,4	15,6	15,2	7,1	9,5	9,5	15,7	7

Na Obrázku 24 jsou fotky vzorků odstředěných olejů po usazení neodseparovaných částic.



Obrázek 24 - Vzorky odstředěného oleje (experimenty 1 až 8)

Vzorky jsou si poměrně podobné a na fotografiích není na dně zřetelný sediment, avšak vzorky ve skutečnosti obsahovaly velmi jemné částice. U vzorků E4, E5, E7 a E8 a patrný zákal, přičemž tři z těchto vzorků náleží k nastavení experimentu s vyššími otáčkami. Jak bude popsáno v následující části, tento zákal tvoří vzduch, který byl vlivem vysokých otáček při odstředování zašlehán do oleje. Nejčistěji se tak jeví vzorek E3, ačkoliv mu náleží vyšší vypočtená teoretická hodnota odloučené částice. Vzorek E6 také vypadá poměrně čistě.

Směs o 3 % obj. strouhanky

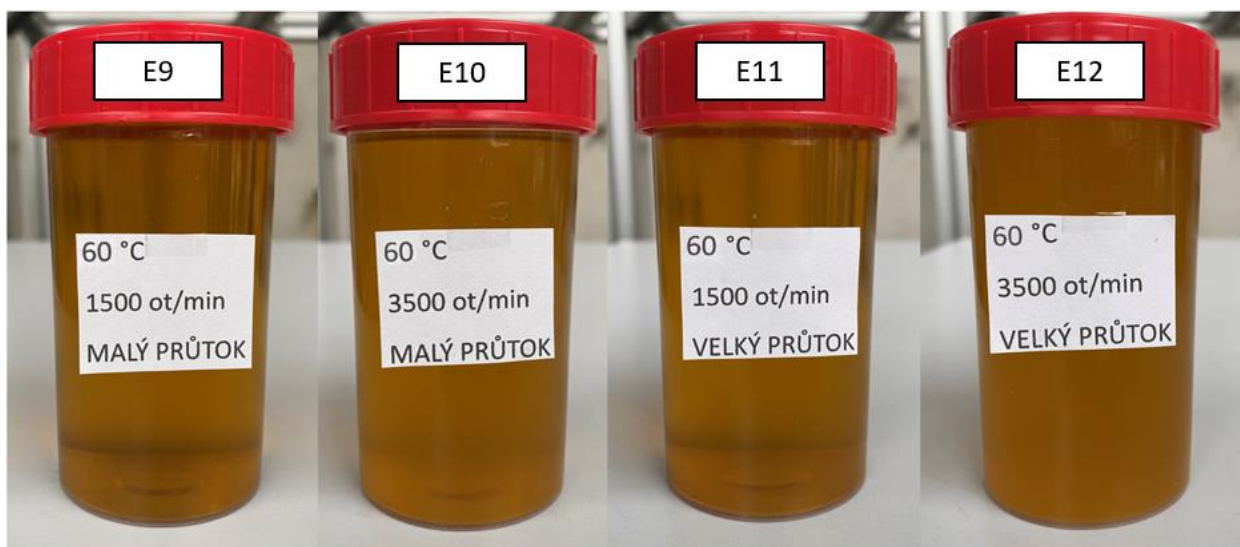
Jak již bylo zmíněno výše, tato sada měření měla především prověřit nezávislost kvality odstředování na množství nečistot v oleji. Všechny 4 experimenty probíhaly při teplotě 60 °C (viz Tabulka 6) a byly naměřeny během jedné 100 l vsádky. Nejprve byl odebrán referenční vzorek (Obrázek 25), který stejně jako v případě jednocentní směsi přibližně 8 hodin sedimentoval, následně probíhalo odstředování a odebírání vzorků stejným postupem, jako v případě jednocentní směsi, a vzorky byly po usazení částic vyfotografovány (Obrázek 27). Na rozdíl od vyhodnocování prvních osmi experimentů nebyla počítána velikost odloučené částice, neboť došlo k velkému zanesení bubnu pevnými nečistotami (Obrázek 26). To však představuje důležitý poznatek pro budoucí návrhy obdobných technologií. Byl tedy změřen pouze průtok (Tabulka 9).



Obrázek 25 - Referenční vzorek modelové směsi 3 % obj.



Obrázek 26 - Odstředěný sediment po experimentech 9 až 12



Obrázek 27 - Vzorky odstředěného oleje (experimenty 9 až 12)

Vzorky E10 a E12 vykazují zřetelný zákal v celém objemu oproti druhým dvěma vzorků podobně, jako to bylo pozorováno mezi prvními osmi experimenty. Tentokrát jsou však vzorky jednoznačně rozděleny otáčkami, proto byl proveden experiment sedimentace vzduchu, kdy byl vzorek E12 ponechán po dobu čtrnácti dnů otevřený vedle vzorku E11, který sloužil jako porovnávací měřítko průhlednosti a zůstal zavřený. Vzorky E9 a E10 zůstaly rovněž zavřené po celou dobu experimentu. Po sedmi dnech vypadaly vzorky E11 a E12 stejně, po dalším týdnu se vzorek E12 zdál být nepatrně průhlednější než vzorek E11. Vzorky E9 a E10 se nijak nezměnily. Obrázek 28 ukazuje porovnání vzorků po tomto experimentu.



Obrázek 28 - Vzorky experimentů 9 až 12 po vyprchání vzduchu

Jak na Obrázku 27, tak na Obrázku 28 je rozeznatelná tenká vrstva sedimentu jemných částic, kterých zde bylo více než v případě experimentů s jednocentní směsí, jejich velikost ale byla srovnatelná.

Tabulka 9 - Naměřené hodnoty průtoku pro experimenty 9 až 12

E9	E10	E11	E12
0,098 l/s	0,097 l/s	0,229 l/s	0,226 l/s

Reálný UCO

Cílem experimentů s UCO bylo ověření kvality separace pevných částic odstředováním na reálném materiálu, jehož vlastnosti a chování nemusejí být vystihnuty při experimentech s modelovými směsmi. Opět byl nejprve odebrán referenční vzorek, jenž byl po osmi hodinách sedimentace vyfotografován (Obrázek 29). Z tohoto vzorku byl určen podíl pevných částic

na základě výšky hladiny oleje a výšky rozhraní pevných částic. Podíl byl odhadnut na 6 % obj. Na Obrázku 29 je také vidět, jak znečištěný a neprůhledný reálný UCO je.



Obrázek 29 - Referenční vzorek UCO

Experimenty s UCO proběhly 3, první při nastavení nejméně příznivých parametrů (velký průtok a 1500 ot/min), zbylé dva při malém průtoku a 1500, resp. 3000 ot/min. Průběh experimentů byl analogický k modelovým směsím, po nastavení a ustálení podmínek byly odebrány vzorky do velkých kádinek, v kterých nejprve sedimentovaly (tentokrát 8 hodin), poté byl sediment pevných částic uveden do vznosu ručním promícháním a po dosažení homogenity byly odebrány vzorky do průhledných vzorkovnic. Ty před nafocím (Obrázek 31) sedimentovaly 3 dny. Na Obrázku 31 je pro názorné porovnání také referenční vzorek, který před pořízením této fotografie sedimentoval rovněž 3 dny. Naopak chybí vzorek experimentu číslo 15, neboť došlo při 3000 otáčkách k silné aeraci, která v kombinaci s již tak nepříznivými optickými vlastnostmi UCO způsobila, že vzorek zůstal zcela neprůhledný, a to i po snaze o odvzdušnění.

Odseparované částice v odstředivce vytvořily nerovnoměrný sediment podobně jako při experimentech 6 až 12, tentokrát ale nebyl soudržný, což ukazuje Obrázek 30. Příčinou tohoto

jevu by mohla být nasákavost strouhanky, kdy s narůstající dobou kontaktu s olejem strouhanka pojme větší množství oleje.



Obrázek 30 - Odstředěný sediment po experimentech 13 a 14



Obrázek 31 - Vzorčky odstředěného UCO, vpravo referenční vzorek

Po prvním provedeném experimentu, číslo 13, bylo zjištěno, že při nastavení velkého průtoku a malých otáček probíhá separace hůře, než by teoreticky měla, neboť v odstředěném oleji zůstaly i hrubé částice. Pro výpočet odlučivosti bylo nutné změřit hustotu a dynamickou viskozitu UCO při 60 °C, přičemž měření bylo provedeno stejnou metodikou jako u modelového oleje, hodnota hustoty byla stanovena na 950 kg/m³, viskozita na 27,4 mPa s. Tabulka 10 uvádí naměřené hodnoty průtoků, dob zdržení a výsledky teoretických výpočtů nejmenší odloučené částice pro všechny tři experimenty, které byly vypočteny stejným postupem, jako u modelových směsí.

Tabulka 10 - Naměřené hodnoty a výsledky experimentů 13, 14 a 15

Číslo experimentu	Otáčky [ot/min]	Objemový průtok [l/s]	Doba zdržení [s]	Velikost odl. částice [μm]
13	1500	0,36	15,28	36,6
14	1500	0,15	36,67	23,9
15	3000	0,13	42,31	11

Příčinu nedostatečného odstředění experimentu 13 lze hledat částečně v horších fyzikálních vlastnostech oleje, je ale možné, že separaci ovlivnily nějaké další jevy. Experimenty 14 a 15 však ukázaly, že při nastavení příznivějších procesních podmínek funguje odstředování dobře. Ve vzorku 14 zůstaly pouze jemné částice (světlý proužek). Tmavý proužek, který se vyskytuje u všech třech vzorků na Obrázku 31, je ve skutečnosti kapalina, která je lehčí než jemné částice, ale těžší než částice hrubé. Je tedy vidět, že jemné částice mají menší hustotu, a je možné, že pochází ze specifického zdroje. U vzorku 15 nebyla vrstva z důvodu omezené průhlednosti disperze přímo viditelná. Nicméně po přefiltrování odebraného vzorku nebyla patrná přítomnost částic větších než dvě desítky mikrometrů, navíc tyto částice byly navázány na rozptýlené bublinky plynu. Z vyhodnocení testů s reálným UCO je zřejmé, že parametry experimentů, jež zaručovaly dostatečnou odlučivost částic v modelových suspenzích, nezaručují dostatečnou odlučivost částic u reálných vzorků. Z toho důvodu je nutné navýšit otáčky z 1500 na 3000 ot/min.

Z výsledků všech provedených experimentů vyplývají následující závěry. Pro odstředování UCO je vhodné zvýšit teplotu směsi na 60 °C, kdy dojde k výraznému snížení viskozity a hustoty oleje oproti hodnotám při běžné teplotě okolí, další ohřev už však nemá tak zásadní vliv, neboť viskozita klesá s rostoucí teplotou exponenciálně. Dále je potřeba dodržet minimální dobu zdržení okolo 45 s, pro níž je nezbytné nastavení vyšších otáček, například 3000 ot/min, pro nižší otáčky (1500 ot/min) je doba zdržení potřebná pro odloučení stejně velké částice čtyřnásobná, výrazně by tak narostla velikost odstředivky.

7 Návrh scale-up zařízení

Na základě výsledků uskutečněných experimenty byl proveden basic design odstředivky v průmyslovém měřítku ve dvou variantách rozměrů. Pro obě varianty byl uvažován jednosměnný provoz po dobu 250 dní v roce. Dále bylo počítáno se střídáním dvou režimů, a sice režimu odstředování a režimu regenerace. Výchozími parametry pro návrhové výpočty byly procesní podmínky vyplývající z experimentů, fyzikální vlastnosti a složení UCO a také základní rozměry odstředivky. Dále byl dán požadavek na velikost nejmenší odloučené částice o hodnotě 10 μm , která byla stanovena na základě experimentů s modelovou směsí i reálným vzorkem UCO jako cílená, a na maximální tloušťku sedimentu h_{max} na konci fáze odstředování. Výsledkem návrhových výpočtů byla výkonnost v metrech krychlových zpracovaného UCO za rok.

Pro výpočty byly použity již známé vztahy pro výpočet úhlové rychlosti (28), pro určení doby usazování (16), potažmo potřebné doby zdržení a pro výpočet průtoku z doby zdržení a objemu bubnu (19). Dále byly použity vztah pro výpočet užitého objemu odstředivky ze známé geometrie (37), kde \overline{R}_u je poloměr odstředivky zmenšený o polovinu tloušťky úsady, R_1 poloměr přepadu a L výška bubnu.

$$V = \pi \cdot (\overline{R}_u^2 - R_1^2) \cdot L \quad (37)$$

Vztah pro objem úsady stanovený z jejích rozměrů (38) a bilanční rovnice (39) pro výpočet zpracovaného objemu UCO během jedné fáze odstředování s použitím porozity úsady ε a objemové koncentrace pevných částic v UCO c_s^v .

$$V_u = \pi \cdot (R_2^2 - (R_2 - h_{max})^2) \cdot L \quad (38)$$

$$V_L = \frac{V_u \cdot (1 - \varepsilon)}{c_s^v} \quad (39)$$

Podílem objemu zpracovaného UCO a jeho objemového průtoku byla vypočtena doba odstředování t_o , která byla společně s manipulační dobou regenerace t_m , předem stanovenou na 10 minut, použita pro výpočet středního průtoku z V_L (40).

$$\dot{V}_{střední} = \frac{V_L}{t_o + t_m} \quad (40)$$

Z hodnoty středního objemového průtoku byla prostým vynásobením hodnotou příslušné doby získána výkonnost odstředivky na jednu směnu a za jeden rok.

Tabulka 11 uvádí dané parametry, které platí pro obě varianty odstředivky. Tabulka 12 pak návrhové rozměry a výsledky výše popsaných výpočtů pro obě varianty.

Tabulka 11 - Výchozí parametry UCO

Hustota pevné fáze	ρ_s	kg/m ³	1300
Hustota oleje	ρ	kg/m ³	950
Dynamická viskozita oleje	μ	mPa s	27
Objemová koncentrace částic	c_s^v	-	0,03
Porozita úsady	ε	-	0,25

Tabulka 12 - Návrhové parametry a výsledky výpočtů

Parametr	Značka	Jednotka	Varianta 1	Varianta 2
Otáčky	N	ot/min	3000	3000
Vnitřní poloměr bubnu	R_2	mm	350	400
Poloměr přepadu	R_1	mm	240	270
Výška bubnu	L	mm	350	500
Maximální tloušťka úsady	h_{max}	mm	50	50
Střední poloměr s úsadou	$\overline{R_u}$	mm	325	375
Užitný objem bubnu	V	l	52,8	106,4
Úhlová rychlost	ω	1/s	314,2	314,2
Doba usazování = doba zdržení	t	s	42,66	46,22
Objemový průtok	\dot{V}	l/s	1,24	2,30
Objem vrstvy úsady	V_u	l	35,7	58,9
Objem zpracovaného UCO	V_L	l	893	1473
Doba odstředování	t_o	s	722	640
Střední objemový průtok	$\dot{V}_{střední}$	l/s	0,676	1,188
Výkonnost na jednu směnu	$\dot{V}_{směna}$	m ³ /8 hod	19,5	34,2
Výkonnost za jeden rok	\dot{V}_{rok}	m ³ /rok	4867	8552

Posledním krokem byl výběr elektromotoru, podle komerčně dostupných zařízení se srovnatelnými rozměry bubnu a provozními parametry. Pro variantu 1 byl vybrán motor o instalovaném výkonu 7,5 kW a pro variantu 2 byl vybrán motor o instalovaném výkonu 15 kW.

První odstředivka o průměru bubnu 700 mm a výšce 350 mm má výkonnost 4867 m³/rok zpracovaného UCO. Druhá odstředivka s průměrem bubnu 800 mm a výškou 500 mm má výkonnost 8552 m³/rok. Důležitou roli při výpočtech, zejména pak času odstředování, sehrála uvažovaná koncentrace pevných částic v UCO, přičemž bylo počítáno s tříprocentním podílem objemu. To je určitě méně než běžný UCO obsahuje. Kdyby ale bylo počítáno s reálným podílem, docházelo by k mnohem rychlejšímu zanášení a nutnosti častější regenerace. Proto by bylo vhodné, kdyby byl UCO po přijmutí na linku nashromážděn ve skladovacích nádobách, které by fungovaly jako primární usazováky. Ideální by bylo, aby byl dodržován jednosměnný provoz chodu linky a během provozní směny by byl připraven k naskladnění nového UCO na příští den. Po skončení provozu by byl přesunut do skladovacích nádrží, kde by po zbývajících 16 hodin sedimentoval, čímž by se oddělil značný podíl částic.

8 Závěr

Upotřebený kuchyňský olej má jakožto energeticky bohatá látka produkovaná ve velkých množstvích po celém světě široký potenciál využití. Protože se jedná o značně heterogenní materiál, musí být nejprve předupraven pomocí adekvátních technologií. V této diplomové práci byly rešeršně shrnuty vlastnosti UCO, nežádoucí látky, jež UCO obsahuje, možné využití a od něj se odvíjející požadavky na čistotu, a především existující technologie čištění a předúpravy UCO. Na základě získaných poznatků byl vytvořen koncepční návrh automatizované linky na čištění UCO, ze které byl vybrán jeden technologický krok, konkrétně separace primárních nečistot pomocí odstředování, pro provedení modelových experimentů. Experimenty ověřovaly odlučivost částic pro dvě modelové směsi a pro reálný UCO za různých kombinací teploty směsi, otáček a průtoku. Na základě jejich výsledků byl proveden návrh scale-up bubnové odstředivky pro průmyslové aplikace.

Pro provedení experimentů byla navržena a sestavena speciální aparatura sestávající z bubnové odstředivky o průměru bubnu 300 mm, užitém objemu 5,5 l, s maximálními otáčkami 3500 ot/min, dále dvou zásobních nádrží, odstředivého čerpadla, a termostatu vyvedeného v topnou spirálu a axiálního míchadla v první nádrži. Jednotlivé prvky trati byly propojeny hadicemi a kulovými kohouty, pomocí nichž byly ovládány režimy a nastavován průtok.

První část experimentů byla měřena s modelovou směsí čerstvého oleje a čerstvé strouhanky o 1, respektive 3 obj. % strouhanky. Pro obě modelové látky byly změřeny fyzikální vlastnosti. Měření na směsi s nižším podílem strouhanky přinesla výsledky teoretické velikosti nejmenší odloučené částice, jejichž hodnoty byly 7 až 15,7 μm . Tyto hodnoty byly potvrzeny vizuální kontrolou odebraných vzorků. Měření s tříprocentní směsí ukázala, že je důležité při návrhu odstředivek počítat s kapacitou pro sediment, dále byl na vzorcích vizuálně zhodnocen rozsah aerace, ke které dochází v odstředivce zejména při vysokých otáčkách.

Experimenty s UCO ukázaly, že při kombinaci velkého průtoku a nízkých otáček není dosaženo dostatečné odlučivosti, při použití vhodnějších procesních podmínek bylo dosaženo stejné odlučivosti, jako u modelových experimentů a podle teoretických předpokladů. Pro UCO byly změřeny hustota a viskozita, tyto hodnoty byly použity při výpočtu odlučivosti částic s požadovanou velikostí částice 10 μm , který určil za vhodné podmínky pro odstředování teplotu směsi 60 °C, otáčky 3000 ot/min a dobu zdržení přibližně 45 s. Právě pro tento parametr byl proveden návrh odstředivky pro průmyslové aplikace.

Výsledky modelových experimentů byly využity při návrhových výpočtech scale-up odstředivky, kdy byly navrženy varianta 1: průměr bubnu 700 mm, užitný objem 52,8 l, výkonnost 4867 m³/rok a instalovaný výkon motoru 7,5 kW a varianta 2: průměr bubnu 800 mm, užitný objem 106,4 l, výkonnost 8552 m³/rok a instalovaný výkon motoru 15 kW.

Seznamy

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

C_D	Součinitel odporu při obtékání tělesa	[1]
c^m	Hmotnostní koncentrace	[1]
c^v	Objemová koncentrace	[1]
D	Průměr částice	[m]
D_B	Průměr bubnu odstředivky	[m]
F	Síla	[N]
Fr	Froudovo číslo	[1]
G	Gravitační síla	[N]
g	Gravitační zrychlení	[m/s ²]
h	Tloušťka úsady	[m]
L	Výška bubnu odstředivky	[m]
m	Hmotnost	[kg]
N	Otáčky	[1/min]
R	Poloměr	[m]
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
$\overline{R_u}$	Střední poloměr úsady	[m]
r	Radiální souřadnice	[m]
S_p	Povrch částice	[m ²]
s	Tloušťka stěny	[m]
T	Teplota	[°C]
t	Čas, doba	[s]
u	Rychlost	[m/s]
V	Objem	[m ³]
\dot{V}	Objemový průtok	[m ³ /s]
$\dot{\gamma}$	Smyková rychlost	[1/s]
ε	Porozita	[1]
μ	Dynamická viskozita	[Pa s]
ρ	Hustota kapaliny	[kg/m ³]
ρ_s	Hustota pevné fáze	[kg/m ³]
ω	Úhlová rychlost	[1/s]

Dolní indexy:

<i>l</i>	Poloměr přepadu odstředivky
<i>2</i>	Vnitřní poloměr bubnu odstředivky
<i>L</i>	Zpracované množství (objem)
<i>m</i>	Manipulační (čas)
<i>max</i>	Maximální
<i>o</i>	Odstředivá (síla), odstředování
<i>r</i>	Radiální směr
<i>s</i>	Pevná fáze
<i>u</i>	Úsada
<i>v</i>	Vztlaková (síla)
<i>z</i>	(Doba) zdržení
<i>φ</i>	Tangenciální směr

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] International day of awareness of food loss and waste: We Can All Help Reduce Food Loss and Waste. *United Nations: UN Chronicle* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://www.un.org/en/un-chronicle/we-can-all-help-reduce-food-loss-and-waste>
- [2] HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, H., A.-S. NIZAMI, S. A. KALOGIROU, et al. Environmental life cycle assessment of biodiesel production from waste cooking oil: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. June 2022, 161 [cit. 2023-08-10]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112411>
- [3] CÁRDENAS, J., A. ORJUELA, D. L. SÁNCHEZ, P. C. NARVÁEZ, B. KATRYNIOK a J. CLARK. Pre-treatment of used cooking oils for the production of green chemicals: A review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 20 March 2021n. 1., 289 [cit. 2023-08-10]. ISSN 1879-1786. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125129>
- [4] AWOGBEMI, O., D. V. VON KALLON, V. S. AIGBODION a S. PANDA. Advances in biotechnological applications of waste cooking oil. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* [online]. December 2021, 4 [cit. 2023-08-10]. ISSN 2666-0164. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100158>
- [5] Lipidy. *Wikipedie* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Lipidy>
- [6] Consumption of vegetable oils worldwide from 2013/14 to 2022/2023, by oil type. *Statista* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/263937/vegetable-oils-global-consumption/>
- [7] ESTEBAN, B., J.-R. RIBA, G. BAQUERO, A. RIUS a R. PUIG. Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils. *Biomass and Bioenergy* [online]. July 2012, 42, pp. 164-171 [cit. 2023-08-10]. ISSN 0961-9534. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.007>
- [8] Recyklace a výkup rostlinných olejů - fritovací oleje, oleje z restaurací. *Ecoservis* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://ecoservis.eu/recyklace-a-vykup-rostlinnych-oleju-fritovaci-oleje-oleje-z-restauraci/>
- [9] ZHANG, Y., M. A. DUBÉ, D. D. MCLEAN a M. KATES. Biodiesel production from wastecooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology* [online]. August 2003, 89, pp. 1-16 [cit. 2023-08-10]. ISSN 0960-8524. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00040-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00040-3)

- [10] Biodiesel from Used Cooking Oil - Future Potential Gold. *Semantic Scholar* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Biodiesel-from-Used-Cooking-Oil-Future-Potential-Mukherjee/06deed0c5a751777401b8e545648beb73d8e41ac#extracted>
- [11] MENDECKA, B., L. LOMBARDI a J. KOZIOL. Probabilistic multi-criteria analysis for evaluation of biodiesel production technologies from used cooking oil. *Renewable Energy* [online]. March 2020, 147, pp. 2542-2553 [cit. 2023-08-10]. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.037>
- [12] ORJUELA, A. a J. CLARK. Green chemicals from used cooking oils: Trends, challenges, and opportunities. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* [online]. December 2020, 26 [cit. 2023-08-10]. ISSN 2452-2236. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100369>
- [13] BLAŽEK, Josef. Zpracování ropy. In: *Docplayer* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/2767413-Zpracovani-ropy-doc-ing-josef-blazek-csc-3-prednaska.html>
- [14] EL-SAWY, M. S., S. A. HANAFI, F. ASHOUR a T. M. ABOUL-FOTOUH. Co-hydroprocessing and hydrocracking of alternative feed mixture (vacuum gas oil/waste lubricating oil/waste cooking oil) with the aim of producing high quality fuels. *Fuel* [online]. 1 June 2020n. I., 269 [cit. 2023-08-10]. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117437>
- [15] BOUZOUITA, D., A. LELEVIC, C. LORENTZ, R. VENDERBOSCH, T. H. PEDERSEN, C. GEANTET a Y. SCHUURMAN. Co-processing bio-liquids with vacuum gasoil through hydrocracking. *Applied Catalysis B: Environmental* [online]. May 2022, 304 [cit. 2023-08-10]. ISSN 0926-3373. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120911>
- [16] BEZERGIANNI, S. a A. DIMITRIADIS. Temperature effect on co-hydroprocessing of heavy gas oil–waste cooking oil mixtures for hybrid diesel production. *Fuel* [online]. January 2013, 103, pp. 579-584 [cit. 2023-08-10]. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.08.006>
- [17] BEZERGIANNI, S. a A. KALOGIANNI. Hydrocracking of used cooking oil for biofuels production. *Bioresource Technology* [online]. September 2009, 47(17), pp. 3927-3932 [cit. 2023-08-10]. ISSN 0960-8524. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.039>
- [18] HIDALGO, J. M., J. HORAČEK, L. MATOUŠEK, A. VRÁBLÍK, Z. TIŠLER a R. ČERNÝ. Catalytic hydrocracking of vacuum residue and waste cooking oil mixtures. *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly* [online]. 2018, 149(6), pp. 1167-1177 [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s00706-018-2171-5>

- [19] Sběr použitého kuchyňského oleje: O projektu. *ORLEN Unipetrol* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: https://www.ornunipetrol.cz/cs/zodpovedna_firma/sber-pouziteho-kuchynskeho-oleje/Stranky/O-projektu.aspx
- [20] *Bilit* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://bilit.cz/vykup-rostlinnych-oleju/>
- [21] *Viking group* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://www.vikinggroup.cz/o-spolocnosti>
- [22] *Trafin oil* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://www.trafinoil.cz/o-nas/>
- [23] *Neste: Who we are* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://www.neste.com/about-neste/who-we-are/business>
- [24] Journey to Zero: The ABC of UCOs – what are used cooking oils and how can they be used in a more circular economy? *Neste* [online]. 5 May 2023n. I. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://journeytozerostories.neste.com/used-cooking-oils>
- [25] *Flottweg* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://www.flottweg.com/>
- [26] Processing used cooking oil. *Flottweg* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://www.flottweg.com/applications/edible-fats-and-oils-biofuels/used-cooking-oil/>
- [27] UCO - Used Cooking Oil. *Farmet* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://www.farmet.cz/cs/uco-used-cooking-oil#tab-CustomContent>
- [28] *Waste cooking oil refining system*. 2022. Korejská republika. KR102378685B1. Uděleno 23.12.2020. Zapsáno 24.3.2022. Dostupné také z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/080935879/publication/KR102378685B1?q=KR102378685B1>
- [29] *Oil purification apparatus for waste cooking oil*. 14.6. 2007n. I. Japonsko. JP2007145974A. Uděleno 28.11. 2005. Zapsáno 14.6. 2007. Dostupné také z: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/038207773/publication/JP2007145974A?q=pn%3DJP2007145974A>
- [30] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy II*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03302-9.
- [31] Hustota. *Wikipedie* [online]. 10.5. 2023n. I. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hustota>
- [32] Objem koule výpočet. *Dřevostavitel* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/nastroj/objem-koule>
- [33] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy I*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03286-2.

[34] Hustota destilované vody. *Converter* [online]. [cit. 2023-08-10]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-vody.htm>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Porovnání olejů	10
Obrázek 2 - Spotřeba rostlinných olejů celkem [6]	11
Obrázek 3 - Příklad molekuly triacylglycerolu [5]	12
Obrázek 4 - Přehled separačních metod a odstraňovaných nečistot	15
Obrázek 5 - Ukázka vzorků ze tří stupňů výroby biodieselu z UCO [10]	16
Obrázek 6 - Schéma jednostupňového hydrokrakování [13]	17
Obrázek 7 - Řez tricanterem [26]	20
Obrázek 8 - Zapojení tricanteru do části linky na čištění UCO [26]	20
Obrázek 9 - Blokové schéma linky na čištění UCO	21
Obrázek 10 - Tvar směsi v odstředivce, vlevo při malých Fr, vpravo při velkých Fr [30]	24
Obrázek 11 - Závislost odporového součinitele na Reynoldsově čísle [33]	25
Obrázek 12 - Diferenciace polohy částice [30]	26
Obrázek 13 – PID schéma experimentální aparatury	29
Obrázek 14 - Fotografie aparatury (zleva termostat, míchadlo, zásobní nádrže, čerpadlo, odstředivka)	30
Obrázek 15 - Závislost hustoty demineralizované vody na teplotě [34]	32
Obrázek 16 - Distribuce velikosti částic	34
Obrázek 17 - Výsledky měření distribuce velikosti částic	34
Obrázek 18 - Závislost hustoty oleje na teplotě	35
Obrázek 19 - Graf závislosti dynamické viskozity oleje na smykové rychlosti	35
Obrázek 20 - Závislost dynamické viskozity oleje na teplotě	36
Obrázek 21 - Referenční vzorek modelové směsi 1 % obj.	41
Obrázek 22 - Odstředěný sediment po prvních pěti experimentech	42
Obrázek 23 - Odstředěný sediment po experimentech 6, 7 a 8	42
Obrázek 24 - Vzorky odstředěného oleje (experimenty 1 až 8)	44
Obrázek 25 - Referenční vzorek modelové směsi 3 % obj.	45
Obrázek 26 - Odstředěný sediment po experimentech 9 až 12	46
Obrázek 27 - Vzorky odstředěného oleje (experimenty 9 až 12)	46
Obrázek 28 - Vzorky experimentů 9 až 12 po vyprchání vzduchu	47
Obrázek 29 - Referenční vzorek UCO	48
Obrázek 30 - Odstředěný sediment po experimentech 13 a 14	49
Obrázek 31 - Vzorky odstředěného UCO, vpravo referenční vzorek	49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Parametry odstředivky	31
Tabulka 2 - Hodnoty pro výpočet hustoty strouhanky	32
Tabulka 3 - Hodnoty kritéria $C_D Re^2$	38
Tabulka 4 - Teoretická velikost odloučené částice pro malý průtok.....	39
Tabulka 5 - Teoretická velikost odloučené částice pro velký průtok	39
Tabulka 6 - Výběr experimentálních podmínek	40
Tabulka 7 - Naměřené hodnoty experimentů 1 až 8	43
Tabulka 8 - Výsledky experimentů 1 až 8	44
Tabulka 9 - Naměřené hodnoty průtoku pro experimenty 9 až 12	47
Tabulka 10 - Naměřené hodnoty a výsledky experimentů 13, 14 a 15	50
Tabulka 11 - Výchozí parametry UCO	52
Tabulka 12 - Návrhové parametry a výsledky výpočtů	52