

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ČERPÁNÍ KALU V TECHNOLOGII ČOV **SLUDGE PUMPING ON WWTP**

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Tomáš Fadrný

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Boráň, Ph.D.

BRNO 2011

Zadání

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vhodného návrhu kalové koncovky se zaměřením na vhodnou volbu čerpadel. Volba čerpadla závisí na typu čerpaného materiálu a charakteru potrubí. Bylo provedeno několik měření pro statistické vyhodnocení vlastností čerpaného media. Zpracované hodnoty byly použity pro výpočet tlakových ztrát. Výpočet tlakových ztrát a následná vhodná volba čerpadel je provedena pro ČOV v Prostějově. Diplomová práce se dělí na dvě části. V první části je uveden teoretický rozbor a v druhé jsou uvedeny výsledky a následné zhodnocení změny technologie ČOV z mezofilního na termofilní vyhnívání. Součástí diplomové práce jsou zpracované protokoly o měření jednotlivých vzorků čerpaného kalu.

Klíčová slova

Kal, ČOV, čerpání, čerpadla, tlaková ztráta, hustota, viskozita, smykové napětí, smyková rychlost.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the best solution design for a sludge fitting, especially focusing on the right choice of pumps for the waste water treatment plant in Prostějov. The pumps were selected for a circulation pipeline, which heats up the sludge. Several measurements were carried out in order to determine the statistical evaluation of the properties of the pumped medium. The figures gained were used to calculate pressure losses. The diploma thesis is divided into two parts. The first part provides a theoretical analysis of the problem and the second part presents the results and subsequently the reasoning for the new selection of pumps in order to change the WWTP technology from the mesophilic to the thermophilic sludge digestion. The test records describing the testing of the individual samples of the pumped sludge are attached.

Key words

Sludge, WWTP, pumping, pumps, pressure loss, density, viscosity, shear stress, shear rate.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FADRNÝ, Tomáš. *Název: Čerpaní kalu v technologii ČOV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 46s., 7 příloh. Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Boráň, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Čerpaní kalu v technologii ČOV* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne: 27. května 2011

.....
Tomáš Fadrný

Poděkování

Děkuji tímto *Ing. Jaroslavu Boráňovi, Ph.D. a Ing. Lucii Houdkové, Ph.D.* za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
1 Úvod	8
Teoretická část diplomové práce	
2 ČISTÍRNA ODPADNÍCH VOD.....	9
2.1 Mechanický (primární) stupeň čištění.....	10
2.2 Biologický (sekundární) stupeň čištění.....	11
2.3 Kalové hospodářství.....	11
2.4 Porovnání procesů vyhnívání uvažovaných v ČOV:.....	13
2.5 Typy kalů na ČOV.....	14
3 ČERPÁNÍ SUSPENZÍ SE ZAMĚŘENÍM NA ČERPÁNÍ KALŮ	16
3.1 Typy směsí.....	17
3.2 Teoretické poznatky o proudění suspenzí	18
3.3 Pohyb částic v tekutině	18
3.4 Ztráty v potrubí u kapalin	21
3.5 Ztráty v potrubí u suspenzí	23
4 Vliv hustoty a viskozity	24
4.1 Hustota	24
4.2 Viskozita	25
4.3 Obsah sušiny v kalu	26
5 Rozbor čerpadel používaných v technologii ČOV.....	27
Základní rozdělení čerpadel:.....	27
5.1 Čerpadla hydrostatická objemová.....	27
5.2 Pístová čerpadla	28
5.3 Plunžrová čerpadla	29
5.4 Membránová/vlnovcová čerpadla	29
5.5 Zubové čerpadlo	30
5.6 Vřetenová čerpadla.....	31
5.7 Šneková čerpadla	32
5.8 Hydrodynamická čerpadla	33
5.9 Mamutová čerpadla	35
Praktická část diplomové práce	
6 Měření hustoty a viskozity kalu.....	37
6.1 Měření hustoty.....	37
6.2 Měření viskozity.....	40
7 Výpočet tlakových ztrát v potrubí	43
8 Návrh nového osazení kalové koncovky čerpadly	47
8.1 Současný stav	47
8.2 Volba a nový návrh čerpadel.....	48
8.3 Srovnání energetické náročnosti čerpání a možné úspory.....	51
ZÁVĚR.....	52
Seznam použitých zdrojů	54
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	56
Seznam obrázků, Seznam použitých tabulek	57
Seznam příloh.....	58

1 ÚVOD

Především legislativou je kladen velký důraz na zvyšování požadavků pro lepší kvalitu vody. Čistírna odpadních vod (ČOV), jako celek, díky mechanickým, biologickým, někdy také chemickým procesům čistí a zbavuje vodu nebezpečných a znečišťujících látek. Odpadem ČOV je kal, což jsou nežádoucí látky odstraněné v jednotlivých krocích čištění. Kal vzniká v každé čistírně odpadních vod. Produkce kalu závisí na technologii čistírny a její velikosti. Hlavní otázkou je, co s ním a jak jej využít. V dnešní době, kdy se výrazně změnil přístup k ochraně životního prostředí, je snaha odpady maximálně materiálově nebo energeticky využít, pokud není možné jejich vzniku přímo zabránit.

Kal se musí různými způsoby upravovat jako vstupní surovina do výtěžného procesu. Podle charakteru a úpravy kalu jej můžeme využít pro výrobu elektrické energie, výrobu bioplynu nebo při jeho dobré stabilizaci i jako hnojivo. Velmi rozšířenou technologií v ČR je technologie vyhnívání kalu, která využívá kal jako hlavní zdroj pro výrobu bioplynu. Pro výrobu bioplynu se používají dvě hlavní metody, které jsou vysvětleny v této práci.

Právě pro následnou změnu metody vyhnívání kalu ve vyhnívací nádrži a tím i lepšímu dosažení výtěžnosti bioplynu byla směřována tato práce. Pro efektivní chod čistírny musí být optimálně zvoleny jednotlivé složky tohoto systému. Jednou z nich je správná volba čerpadel pro cirkulaci kalu. S návrhem čerpadel souvisí samozřejmě výpočty tlakových ztrát v potrubí. Pro výpočty tlakových ztrát musíme mít informace o proudící tekutině.

Informace o charakteru kapaliny byly zjišťovány u vzorků odebraných a následně proměřených v laboratoři pro zjištění základní fyzikálních charakteristik čerpané tekutiny.

Následně, dle poskytnutých a zjištěných informací, byla řešena vhodná volba čerpadel v oblasti kalové koncovky se zaměřením na optimální nastavení cirkulační větve pro ohřev kalu. K ohřátí kalu je používán tepelný výměník voda – kal. Na základě informací o čerpané kapalině a přehledu nejpoužívanějších čerpacích strojů byla stanovena úzká škála vhodných čerpadel a z nich vybrány nejvhodnější. Následně pak byla provedena krátká bilance energetické náročnosti čerpání pro současný a předpokládaný stav cirkulačního potrubí ohřívající kal.

Hlavní cíle diplomové práce:

- Experimentální stanovení teplotní závislosti hustoty a viskozity z vzorků kalů
- Návrh nového osazení cirkulační větve čerpadly.
- Porovnání tlakových ztrát z hlediska energetické náročnosti při daných modifikacích.

Teoretická část diplomové práce

2 ČISTÍRNA ODPADNÍCH VOD

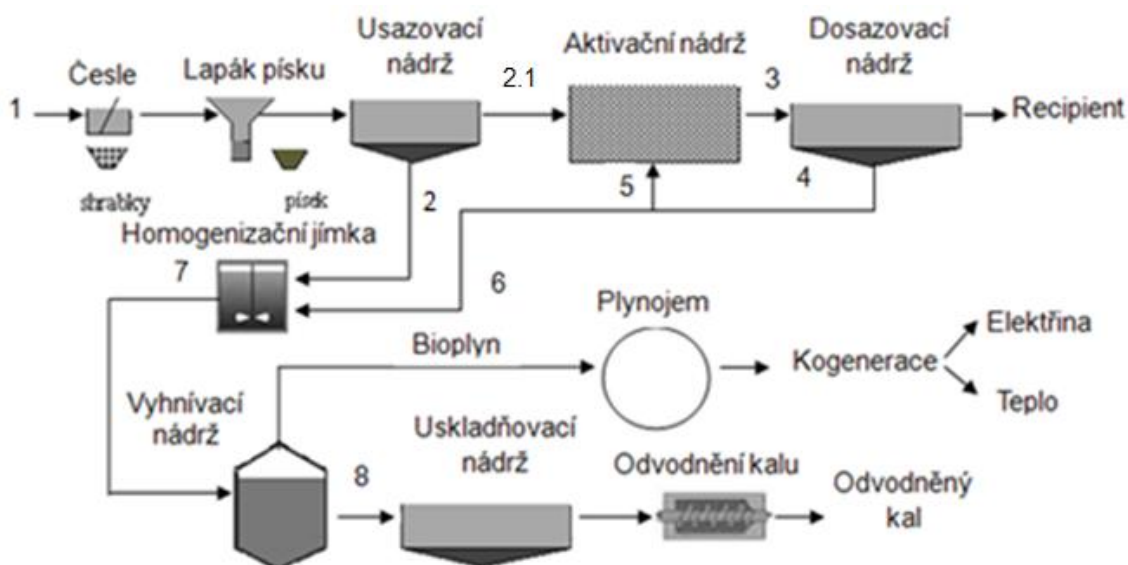
Čistírna odpadních vod (dále jen ČOV) je systém sloužící pro zbavování se znečišťujících a škodlivých látek obsažených ve vodě a dosažení její požadované jakosti. ČOV se rozdělují hlavně podle velikosti a typu. Při procesu čištění získáváme kal, který je odpadním produktem čistírny. Na čistotu vody mají vliv jednotlivé části čistírny a nároky na požadovanou kvalitu vody udává legislativa. Proces čištění má zpravidla dvě základní části a to mechanický (primární) a biologický (sekundární) stupeň čištění. Někdy je také zařazen terciární stupeň čištění.

Dále budou uvedeny jednotlivé části mechanického a biologického stupně čištění pro jejich rozšířené uplatnění. Terciární stupeň čištění se používá pouze u čistíren, kde čistota vody nebyla dostačující v předchozích stupních čištění. Slouží k dočištění odpadních vod, především k odstranění fosforu a dalších chemických škodlivých látek. Součástí ČOV je kalové hospodářství, kde dochází k finálnímu zpracování, úpravě a využití kalu. ^[2,3]

V současnosti je kladen důraz na:

[2]

- Dosažení vysoké účinnosti mechanicko-biologického čištění, především na odstranění biogenních prvků dusíku a fosforu.
- Minimalizaci negativních vlivů čistírny odpadních vod na životní prostředí.
- Snížení nároků na obsluhu, vyšší stupeň automatizace a řízení. Snížení energetické náročnosti procesu čištění.
- Minimalizaci provozních nákladů.



Obr. 1.1 Obecné schéma čistírny odpadních vod ^[9,2]

Legenda: 1-Surová odpadní voda, 2-Primární kal, 2.1-Odpadní voda zbavená jemných suspendovaných částic, 3-Směs vody a jemného kalu, 4- Aktivovaný kal, 5-Vratný kal, 6-Přebytečný aktivovaný kal, 7-Směsný surový kal, 8-Vyhnilý kal.

2.1 Mechanický (primární) stupeň čištění

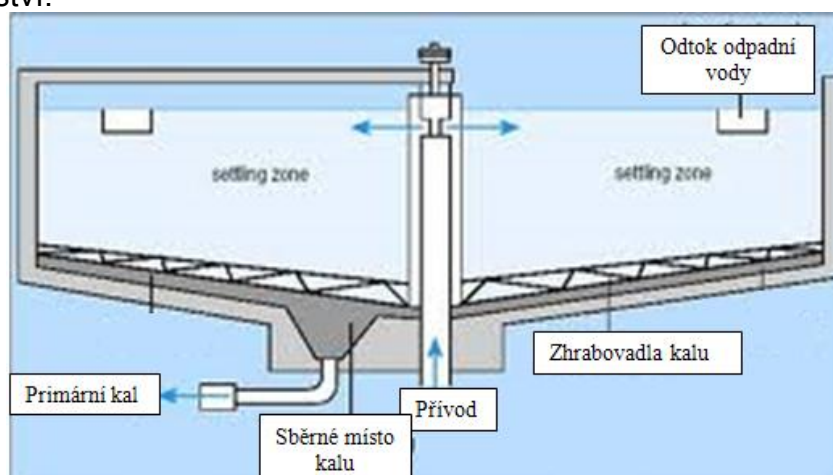
Slouží především jako ochranná část čistírny. Odstraňují se zde nejhrubší nečistoty z přivedené odpadní vody. Zabrání se tak poškození i zvýšenému opotřebení strojního zařízení čistírny (poškození čerpadel nebo ucpání potrubí, žlabů, otvorů, trysek atd.). V mechanické části se odstraňuje zpravidla 1/3 obsahu látek spotřebovávající kyslík. Nedochozí k odstranění látek, které obsahují fosfor a dusík, a proto je potřebný další stupeň čištění. V mechanickém čištění vzniká primární kal. Odstraňují se částice, které se usazují buď u dna, nebo vlivem menší měrné hmotnosti vyplouvají k hladině.

Mechanické čištění se obvykle provádí ve dvou stupních. Nejhrubší částice jsou zachyceny na česlích a v lapácích písku (štěrku).

Česle jsou jednak hrubé, obvykle tvořené řadou ocelových prutů (mříž nebo síto) v pevném rámu a jednak jemné. Jejich obvyklé řešení jsou hrabla na pohyblivých se pásech.

Lapáky písku slouží k zachycení hmot minerálního původu s větší měrnou hmotností než má odpadní voda. V lapáku písku jsou uzpůsobené podmínky pro takovou rychlost průtoku, aby se usazoval písek o průměru zrn nad 0,2 mm. V některých případech mohou být lapáky písku provzdušňovány za účelem zbavování se organických látek. Podle směru průtoku můžeme dělit lapáky písku na horizontálně nebo vertikálně protékané.

V dalším stupni předčištění se odstraňují usaditelné částice v sedimentačních nádržích, kterými znečištěná voda proudí určitou sníženou rychlostí, aby docházelo k dobré sedimentaci částic a odstranění usaditelných a plovoucích látek, včetně tuků a pěn. Plovoucích nečistoty z povrchu nádrže odstraňuje stírací, či shrabovací zařízení. Kal se odstraňuje do kalových jámek. V usazovacích nádržích se zpravidla nacházejí zrnité a vločkovité částice. Vločkovité částice se shlukují (koagulují), obvykle sedimentují s vyšší rychlostí. Částice sedimentují a tvoří primární kal. Při čištění odpadních vod městského charakteru vzniká vedle primárního kalu také přebytečný kal aktivovaný. Tyto kaly se přečerpávají na další zpracování do kalového hospodářství. ^[2,4,23]



Obr. 2.1 Kruhová usazovací nádrž ^[23]

2.2 Biologický (sekundární) stupeň čištění

Podstatou biologického čištění odpadních vod jsou biochemické procesy, které mohou být řešeny různými způsoby. Hlavním úkolem v tomto stupni je odstranění dusíku, fosforu a rozpuštěných organických sloučenin z vody. Procesy probíhají za působení aerobních mikroorganismů, které umožňují rozklad organických látek ve vodě. Tento proces čištění probíhá v aktivačních a dosazovacích nádržích. Výsledný produkt biologického čištění je vyčištěná voda a aktivovaný kal z velké části tvořený odumřelými mikroorganismy. Aktivovaný kal se tvoří v nitrifikačních, denitrifikačních a někdy také regeneračních procesech (tzv. zónách), které jsou charakteristické pro aktivační nádrže a pro právě zvolený způsob čištění.

V aktivačních nádržích je zabezpečen přívod kyslíku pomocí provzdušňovacích zařízení aerátorů, které nejenom dodávají kyslík, ale také neustále promíchávají obsah nádrže. Zde probíhají biochemické procesy podmíněné činností aerobních mikroorganismů.

V aktivační nádrži vzniká tzv. aktivační směs, což je směs aktivního kalu a čisté odpadní vody. Za optimálních podmínek získáme aktivovaný kal ve formě flokujících a sedimentujících vloček. Z aktivační nádrže odtéká aktivační směs do dosazovací nádrže, kde dochází k oddělení aktivovaného kalu od biologicky vyčištěné vody.

Vyčištěná voda odtéká do recipientu. Část zahuštěného aktivovaného kalu se z dosazovací nádrže vrací zpět do aktivace jako vratný kal k dosažení potřebné koncentrace mikroorganismů v aktivační nádrži a tím i ke zlepšení procesu aktivace. Přebytečnou biomasu z důvodu neustálého množení mikroorganismů, je nutné odstraňovat. Odstraněná biomasa se nazývá přebytečný sekundární biologický kal. ^[2,4,5]

2.3 Kalové hospodářství

Nakládání s kalem a jeho úprava je stanovena mnoha předpisy vztahujícími se k životnímu prostředí. Velikost a technologie kalového hospodářství závisí na množství vyprodukovaného kalu a tím i na velikosti čistírny. Hlavním úkolem kalového hospodářství je docílení výnosu ze zpracovávaného kalu, jeho hygienizace a úprava pro snadný transport. U ČOV o velikosti zhruba od 10 000 EO se používá technologie s homogenizačními jímkami a vyhnívacími nádržemi. ^[2]

Před vstupem do vyhnívací nádrže jsou kaly smíšeny v homogenizační jínce. Pokud kal nedosahuje potřebného obsahu sušiny, je zahuštěn ještě před smíšením. Zahuštění se týká zejména aktivovaného kalu, kde dochází ke zvýšení obsahu sušiny až na 6 %. Při dosažení požadovaného obsahu sušiny a promíchání kalů vzniká směsný surový kal obsahující zpravidla kolem 5-6 % sušiny. ^[2]

Zahušťování kalu se provádí nepřetržitě nebo po jednotlivých dávkách za použití gravitačních zahušťovačů, strojních zahušťovačů, např. rotačních filtrů, odstředivek nebo flotačních zařízení. Pro uskladnění vyhnílého kalu před odvodněním slouží uskladňovací nádrž. ^[5]

2.3.1 Vyhnívací nádrže

Ve vyhnívacích nádržích probíhá aerobní či anaerobní proces, při němž vzniká bioplyn. Nádrže jsou vybaveny mechanickým mícháním a zastřešené plynotěsným stropem. Kal je ve vyhnívacích nádržích stabilizován ohřevem na teplotu 22-45 °C v mezofilní a teplotu 45-60 °C u termofilní oblasti. Vyprodukovaný kal by měl být stabilizován. ^[2,4]

2.3.2 Aerobní stabilizace kalu

Aerobní stabilizace se v ČR využívá pouze v malé míře. Je obvykle využívána jako termofilní u malých čistíren. Provozuje se u zakrytých čistíren, kde je požadavek omezení vzniku zápachu na minimum. Reaktory pro aerobně-termofilní stabilizaci musí být uzavřené a tepelně izolované, aby se nemusel kal dodatečně ohřívat. ^[2]

Kal je dobře stabilizovaný a zahuštěný na 4-6 % sušiny a náklady na jeho odvoz jsou výrazně nižší než u ostatních způsobů. Energie obsažená v kalu se mění na teplo. Toto teplo je využito při biochemické oxidaci k ohřátí celého objemu nádrže a k udržování teploty mezi 50-60 °C. Při těchto teplotách je doba zdržení kolem 25 až 30 dní. Díky vysokým teplotám dochází k hygienizaci kalu. ^[14]

Samotná technologie se pak skládá obvykle nejméně ze dvou provzdušňovaných zateplených nádrží, vhodného provzdušňovacího a míchacího systému, čerpací techniky a zařízení na předčištění vzduchu. Důležitá je i regulace výšky pěny na hladině. ^[5]

2.3.3 Anaerobní stabilizace

Při anaerobní stabilizaci dochází k přeměně většiny rozložitelných organických látek na bioplyn bez přístupu vzduchu. Současné vlivem teploty dochází ke stabilizaci a hygienizaci kalu. Výslednými produkty tohoto rozkladu jsou bioplyn, který je tvořen převážně methanem (60-70 %) a oxidem uhličitým (30-40 %) a v menší míře pak sulfanem, dusíkem a vodíkem. Druhý produkt je stabilizovaný vyhníly kal, což je směs vzniklé anaerobní biomasy. Anaerobní stabilizace probíhá v anaerobních reaktorech (vyhnívacích nádržích). ^[4,5]

Stabilizovaný vyhníly kal, který obsahuje zbylé nerozložené organické, anorganické látky a podíl kapalné fáze - kalovou vodu. Pro další využití je nutné tento kal odvodnit na co nejvyšší obsah sušiny. ^[2]

2.4 Porovnání procesů vyhnívání uvažovaných v ČOV:

Samotný proces anaerobní stabilizace probíhá ve čtyřech fázích^[6]:

1. **Hydrolyza**
2. **Acidogeneze**
3. **Acetogeneze**
4. **Methanogeneze**

Nejčastěji používané metody u anaerobní stabilizace a jejich porovnání^[6]:

- Mezofilní stabilizace
- Termofilní stabilizace

Tab. 2.3 Stručné zhodnocení mezofilní a termofilní stabilizace kalu^[2,4,6]

Mezofilní stabilizace kalu	Termofilní stabilizace kalu
Stabilizace kalu probíhá při teplotách	
30-45 °C	45-55 °C
Doba zdržení	
20-30 dnů	10 až 15 dnů
Výhody	
Menší dodávky tepla do procesu	Dochází k hlubšímu rozkladu a ke snížení množství org. hmoty.
Méně náročná na změny teploty ve vyhnívací nádrži (2 až 3 °C).	→větší výtěžnosti bioplynu
	→účinnější hygienizaci kalu
	Snížená náročnost na promíchání kalu.
Nevýhody	
Menší výtěžnost bioplynu.	Vyžaduje větší dodávky tepla do procesu.
Menší hygienizace kalu.	Bakterie jsou více náchylné na změny teploty (méně jak 1 °C).

Kal je v nádrži udržován na požadované teplotě cirkulací přes externí výměník tepla. Vznikající bioplyn je využíván k výrobě tepla a případně elektrické energie. Vyhníly kal (anaerobně stabilizovaný kal) je odvodňován na sušinu 20–35 %. Je vhodný pro další způsoby zpracování, např. termické. Pro menší ČOV je vhodná chemická stabilizace vápnem nebo odvoz odvodněného kalu ke zpracování na jinou lokalitu (ke kompostování, anaerobní stabilizaci, spalování apod.).^[5]

V dalších operacích je kal odvodněn a hygienizován. Nejrozšířenějším zařízením pro odvodnění je pásový lis s malou šířkou pásu nebo dekantační odstředivka. Při strojním odvodňování se dávkuje do kalu chemická srážedla (koagulanty a flokulanty), které se podílejí na vytvoření vloček. Přispívají tak významnou měrou k odvodnění a zvyšují tím jeho účinnost.^[2,5]

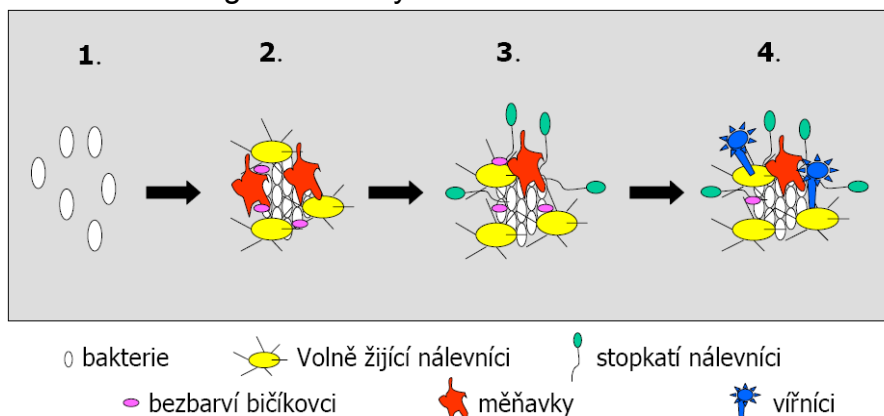
2.5 Typy kalů na ČOV

2.5.1 Primární kal

Tento druh kalu se odděluje nejčastěji sedimentací v usazovacích (sedimentačních) nádržích. Má zpravidla zrnitou strukturu a je tvořen nerozpuštěnými látkami, které prošly lapákem písku a česlemi. Organické látky obsažené v primárním kalu jsou velmi dobře a rychle rozložitelné. Množství kalu obsahuje od 2,5 až 50 g/l sušiny. Obsah tohoto kalu je závislý na účinnosti primární sedimentace. ^[7]

2.5.2 Aktivovaný kal

Jedná se převážně o nerozložené zbytky organických látek a odumřelou biomasu. Aktivovaný kal vzniká v provzdušněné aktivační nádrži. Má obvykle vločkovitou strukturu a jeho charakter je ovlivněn čistícím zařízením, v němž vznikl. Na velikost, tvar, strukturu a sedimentační vlastnosti vloček aktivovaného kalu mají vliv přítomné organismy (bakterie, houby, plísně a kvasinky), které tvoří kostru vločky, zatěžují ji, způsobují její rozpad a tím zvětšují její povrch. Vedle jednoduchých organismů ji tvoří i nerozpuštěné látky a nerozložitelné organické látky. ^[2,8]



Obr. 2.4 Schéma vzniku vločky aktivovaného kalu ^[13]

2.5.3 Vratný kal

Část aktivovaného kalu, která je zahuštěná a vrací zpět do biologického stupně čištění. ^[2]

2.5.4 Přebytečný aktivovaný kal

Je zbylou částí aktivovaného kalu odcházející k dalšímu zpracování do kalového hospodářství. Podstatný vliv na charakter přebytečného kalu z biologického čištění má složení a koncentrace odpadních vod. Odvádění přebytečného kalu by mělo odpovídat jeho tvorbě. Tento kal obsahuje 0,6–1,0 % sušiny. ^[8]

2.5.5 Zahuštěný kal

Kal bývá zahuštěn na obsah sušiny v kalu okolo 6 % gravitačním nebo strojním zahušťováním. Pro gravitační zahušťování se používá buď aktivovaný, nebo primární kal. Pro strojní zahušťování se aplikují zahušťovací odstředivky.^[13]

2.5.6 Surový kal

Je nestabilizovaný a nehygienizovaný kal, který je složen z primárního a případně zahuštěného aktivovaného kalu. Surový kal obsahuje okolo 70 % organických látek v sušině a vzhledem k možné přítomnosti patogenních mikroorganismů je podle zákona o odpadech klasifikován jako nebezpečný odpad s obsahem sušiny kolem 3,5–5,5 %. Technologie úpravy a zpracování kalu musí být zvolena tak, aby se z nebezpečného odpadu stal stabilizovaný materiál, který díky svým vlastnostem může být využit dále.^[2]

2.5.7 Chemický kal

Vzniká na čistírnách, kde je instalováno chemické srážení fosforu. K dosažení chemického srážení je nutno do odpadních vod přidávat kationické chemikálie. Většinou se používají soli hliníku nebo železa. Mezi nejpoužívanější chemikálií bývá síran železitý. Chemický kal je v tomto případě tvořen vločkami síranu fosforečného.^[14]

2.5.8 Stabilizovaný kal

Upravený kal do takové podoby, aby dopady na životní prostředí a lidské zdraví byly co nejmenší. Pro stabilizace kalu se využívá aerobní, nebo anaerobní technologie. Obsah sušiny ve stabilizovaném kalu bývá 2,5–3,5 % a je zbaven infekčních vlastností. Před odvozem z čistírny je stabilizovaný kal odvodněn na co největší obsah sušiny.^[2,8]

2.5.9 Odvodněný kal

Měl by být stabilizovaný a strojně odvodněn. Účinnost odvodnění se zvýší použitím vhodných flokulantů. Díky flokulantům lze dosáhnout kalu s obsahem na 20 - 30 % sušiny. Tento kal je základním odpadním produktem čistírny.^[5]

Pokud uváděné kaly nejsou zahuštěny, pohybuje se hmotnostní koncentrace nerozpuštěných látek (sušiny) v čistírnách komunálních odpadních vod zpravidla od 0,2 do 5 hm. %, po zahuštění od 4 do 8 hm. %, po stabilizaci od 3 do 6 hm. % a po strojním odvodnění od 20 do 35 % hm.^{[2] [8]}

3 ČERPÁNÍ SUSPENZÍ SE ZAMĚŘENÍM NA ČERPÁNÍ KALŮ

Jako nejvhodnější dopravu suspenzí volíme dopravu hydraulickou, kterou lze použít na krátkou i dlouhou vzdálenost v kontinuálním provozu. Další předností je velká kapacita dopravy.

Důležitým častým kritériem je, aby hydraulická doprava žádným způsobem neznehodnocovala přepravované medium. Vhodně zvolená doprava by měla vzít v potaz ekonomické, projekční a klimatické podmínky provozu.^[10]

Hydraulickou dopravu můžeme dělit dle tlakového spádu na^[10]:

- **Samospádnou** – Přepravuje materiál pomocí gravitačního působení z místa vyššího na místo nižší.
- **Tlakovou** – Kapalina se přemísťuje díky strojům, které jí dodávají potřebnou energii (např. čerpadla). Dopravu lze uskutečnit do všech směrů.

Zvolení vhodné dopravy ovlivňuje^[10]:

- Velikost a tvar dispergovaných částic pevné fáze
- Hustota pevné fáze, kapalné fáze a suspenze
- Tokové vlastnosti: viskozita kapalné fáze. Pokud jde o suspenzi s charakterem neneutonské kapaliny, měli bychom zjistit také zdánlivou viskozitu suspenze
- Nasákavost pevných částic

Výhody hydraulické dopravy^[10]:

- Použití v jakémkoliv prostředí
- Prakticky bezobslužný provoz
- Bezpečný a hygienický provoz

Nehody hydraulické dopravy^[10]:

- Jednoúčelovost
- Malý rozsah změn parametrů dopravované látky
- Někdy nutná předúprava částic na požadovanou velikost pro dopravu
- Separace částic od nosného media
- Úprava nosného media a jeho doplňování

3.1 Typy směsí

Proudění samotné kapaliny lze jednoznačně charakterizovat díky zjištění charakteru proudění (laminárního, nebo turbulentního) a to za pomoci základních fyzikálních vlastností kapaliny a průměru potrubí. Proudění suspenzí nelze jednoznačně definovat. Je třeba rozlišovat dva základní typy směsí chovajících se odlišným způsobem.

3.1.1 Směs kapalina–pevná fáze (nesedimentující) ^[10]

Pevné částice jsou v kapalně fázi rozděleny homogenně. Částice jsou v kapalině obsaženy ve velkém množství a jsou velmi jemné. Kapalná fáze se většinou vyznačuje neneutonským chováním. Charakter proudění je většinou laminární.

3.1.2 Směs kapalina–pevná fáze (sedimentující) ^[10]

Pevné částice v kapalině mají tendenci sedimentovat i při vyšších rychlostech proudění. Částice sedimentují v důsledku vzniku koncentračního gradientu. Tento gradient se vyskytuje i při vysokých dopravních rychlostech nosného média. Suspenze obsahuje částice větších rozměrů o nižších koncentracích. Pro každou velikostní skupinu v tab. 3.1 je typický jiný pohyb pevných částic a to z důvodu jiné sedimentační rychlosti. Tento pohyb u jednotlivých částic se projeví různým potřebným tlakovým spádem pro dopravu v potrubí.

Tab. 3.1 Rozdělení skupin dle velikosti dispergovaných ^[10]

Suspenze	Velikost částic	Typ směsy
Pravé roztoky	do 10^{-3} μm	Nesedimentující
Koloidní roztoky	od 10^{-3} μm do 1 μm	
Plastické roztoky	od 1 μm do 40 μm	
Jemné suspenze	od 40 μm do 150 μm	Sedimentující
Střední suspenze	od 0,15 mm do 1,5 mm	
Hrubé suspenze	nad 1,5 mm	

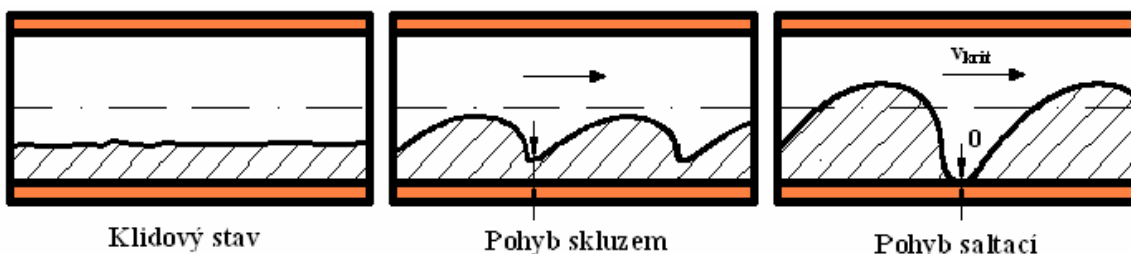
3.2 Teoretické poznatky o proudění suspenzí

Při pohybu suspenze v potrubí vznikají různé fáze pohybu pevných částic v závislosti na rychlosti proudění kapaliny. Při nulové rychlosti kapaliny jsou pevné částice usazeny na spodní stěně potrubí.

Pevné částice se začnou pohybovat až po dosažení určité rychlosti. Pohyb částic začíná pomalým převalováním po jiných, které byly doposud v klidu. Tomuto jevu se říká pohyb skluzem a vzniká tzv. pohyblivé lože, které se jako celek pohybuje pomaleji než nosná kapalina.

Při zvyšující se rychlosti je stále více částic nad stěnou potrubí ve vznosu a to až do okamžiku, kdy všechny částice se dostanou do vznosu. Takovou rychlost nosného média označíme jako rychlost kritickou.

Pohyb ve vznosu závislý na měrné hmotnosti obou skupenství a rychlosti pohybu. Popsaný charakter proudění se týká převážně strukturních a jemnozrnných suspenzí. ^[10,11,22]



Obr. 3.1 Schéma pohybu částic v potrubí ^[11]

3.3 Pohyb částic v tekutině

Základní hydrodynamické parametry jako je např. tlakový spád nebo kritická rychlost, je podmíněna znalostí proudění individuální částice. Výpočet sedimentační rychlosti pro částice obecného tvaru je úloha obtížná, a proto se využívá odvození vztahů stanovení rychlosti pro usazování hladké koule v neomezeném prostředí.

Usazování průmyslových suspenzí má tři podoby^[1]:

Prosté (nerušené) usazování: Částice si zachovávají svůj charakter, pro každou částici platí vztahy pro usazování částice individuálně.

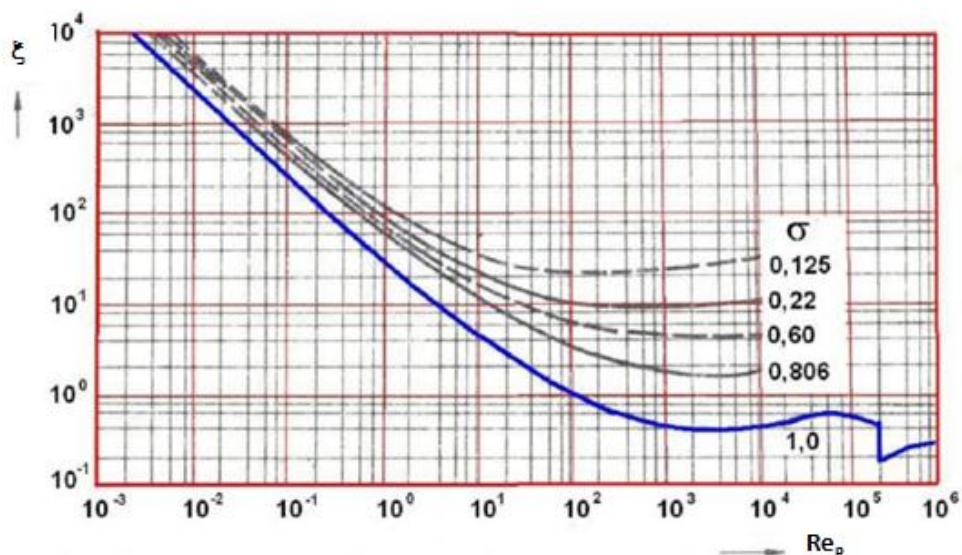
Rušené usazování: Nastává při dosažení vyšší objemové koncentrace $x_s > 0,5 \%$. Průběh usazování je ovlivněn (rušen) okolními částicemi. Suspenze může měnit fyzikální vlastnosti (hustotu, viskozitu) a tím může ovlivnit hodnotu pádové rychlosti.

Zahušťování suspenze: Při působení usazených částic je kapalina vytlačována z volného objemu vrstvy směrem vzhůru k hladině, za současného zvyšování koncentrace pevných částic ve spodních vrstvách. Pokud množství suspendovaných částic roste, začne se při určité koncentraci tvořit rozhraní mezi kapalnou fází a vrstvou kalu. Toto rozhraní klesá ke dnu a objem kalové vrstvy se zmenšuje a dochází k zahušťování. Tento jev bývá popsán zahušťovací křivkou, která popisuje závislost rozhraní na čase.

Hodnota odporového součinitele ξ je funkcí $\xi = f(Re_p)$ pro kulové částice. Pro nekulové částice se používá hodnota sféricity. Tvar částice ovlivňuje hodnotu Re_p . Při návrhu průmyslových zařízení, které vychází z hodnot pádové rychlosti částic, je výpočet skutečné pádové rychlosti velmi komplikovaný a ovlivňuje ho mnoho faktorů. [1, 11]

Sedimentace nekulové částice

Pro zjednodušení řešení se vypočtená sedimentační rychlost pro kulovité částice následně převádí na nekulovitý tvar částice. Sedimentační rychlost částice, která nemá kulový tvar, je dána v podstatě stejnými zákony, pouze s tím rozdílem, že její odpor v kapalině bude s ohledem na členitost povrchu větší než kulové částice a tedy sedimentační rychlost bude menší. Parametrem křivek bude hodnota sféricity σ . Nový odporový součinitel ξ odečteme z obrázku 3.2



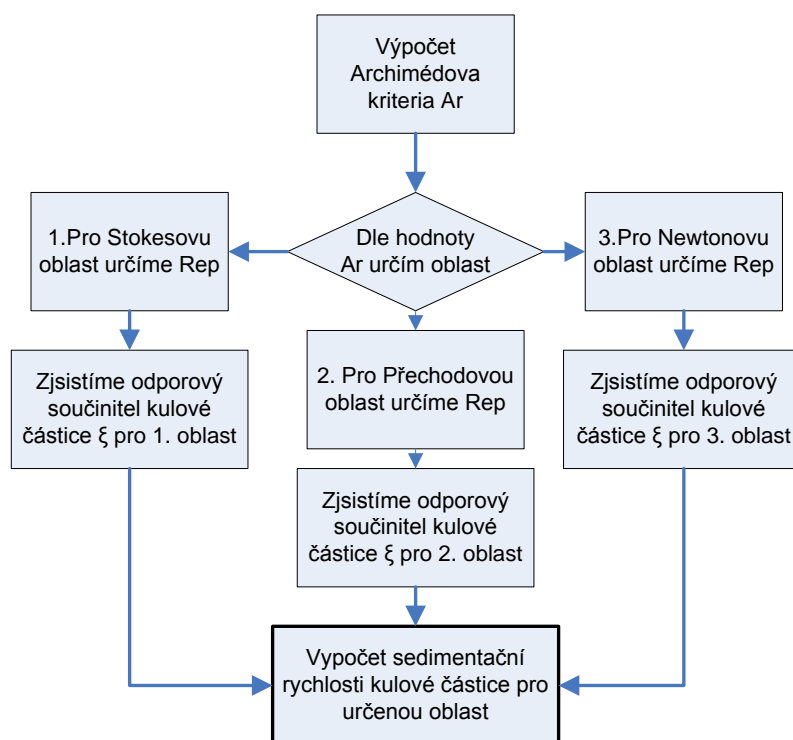
Obr. 3.2 Závislost odporového součinitele ξ na sféricitě σ a Re_p [11]

Tvar částice se projeví, při výpočtu Re_p . Za rozměr částice se dosadí ekvivalentní průměr částice podle jejího objemu.

Výpočet střední usazovací rychlosti částice:

Pro Stokesovo proudění, u kterého byla zanedbána setrvačná síla se používá postup výpočtu pomocí Archimédova kritéria.

Postup výpočtu pomocí Archimédova kritéria ^[1]:



Tab. 3.4 Přehled rovnic pro výpočet pádové rychlosti kulové částice ^[1]

Oblast	Rozsah Re_p	Rozsah Ar	$\xi = Re_p$	$Re_p = f(Ar)$
1. Stokesova	$Re_p < 0,5$	$Ar \leq 3,6$	$\xi = 24 / Re_p$	$Re_p = Ar/18$
2. Přechodová	$0,5 \leq Re_p \leq 500$	$3,6 \leq Ar \leq 6,4 \cdot 10^4$	$\xi = 18,5 \cdot Re_p^{-0,6}$	$Re_p^{0,7} = (Ar/13,9)^{0,5}$
3. Newtonova	$500 \leq Re_p \leq 1,5 \cdot 10^5$	$6,4 \cdot 10^4 \leq Ar \leq 7,4 \cdot 10^9$	$\xi = 0,44$	$Re_p = 1,73(Ar)^{0,5}$

1. Oblast - platí Stokesův zákon, jedná se o plouživé proudění, proudové pole je prakticky identické s obtékáním koule ideální tekutinou. Tento režim platí pro koulové částice o velmi malých průměrech. ^[1,22]

2. Oblast - jedná se o přechodnou oblast, odporový součinitel s rostoucím Re rychle klesá, převládá třecí odpor, pro $Re = (5-25)$ se za koulí vytvářejí víry, tyto se však od koule neodtrhávají, stále převládá třecí odpor nad tlakovým. ^[1]

3. Oblast - pro $100 < Re < 4,103$ - je možné pro $Re = (25-350)$ pozorovat odtrhávání vírů za koulí, tyto přecházejí pro $Re > 350$ v pravidelné a nepřetržité odtrhávání vírů, vzniká karmánova vírová cesta. Odtrhávání vírů v zadní části koule má za následek pokles součinitele odporu ξ . Postupně začíná převažovat odpor tlakový nad odporem třecím. ^[1]

3.4 Ztráty v potrubí u kapalin

Téměř u každého vedeného potrubí sloužícího k dopravě se nevyhne změnam, např. průměru, směru, umístění armatur, a měřicích zařízení atd. V těchto částech dochází ke změně velikosti a směru profilu rychlosti proudění, které vyvolává víření, případně odtržení proudu kapaliny od stěny. Pro ustálení proudu se většinou předpokládá minimální délka rovného úseku potrubí v délce $L = 10 \cdot d$, kde d je průměr potrubí.^[1]

Hydraulické odpory se dělí na odpory třecí a místní. Tlaková ztráta je rozdíl tlaků na délce potrubí (u třecího odporu), nebo rozdíl před místním odporem a za ním. Fyzikálně představuje tlaková ztráta rozptýlenou energii objemové jednotky proudící tekutiny.^[1]

3.4.1 Tlaková ztráta místní odpory

Zdrojem místních odporů jsou např. armatury vřazené do potrubí (ventily, šoupátka, klapky, kolena, oblouky), nebo místní změny směru a velikosti toku. Hodnota součinitele místního odporu ξ se stanovuje experimentálně a závisí na geometrii uvažovaného místa. Výrobci uvádějí pro bezpečnost vyšší hodnoty součinitelů místních odporů.^[1,11]

Tlaková ztráta při průtoku místním odporem:

$$P_{\xi} = \xi \cdot \frac{c^2}{2} \cdot \rho \quad (3.1)$$

Místní odpory mohou být také vyjádřeny pomocí tzv. ekvivalentní délky potrubí l_e , kde je místní ztráta vyjádřena jako ztráta třením přímého úseku o stejném průřezu a drsnosti.^[1]

3.4.2 Tlaková ztráta třením

Je závislá na velikosti ztrátového součinitele λ . Ztrátový součinitel závisí na Reynoldsově čísle Re a relativní drsnosti ξ . Relativní drsnost je v literatuře udávána na základě experimentálních výsledků. Přesnost výpočtu ztrátové výšky je ovlivněna správným určením absolutní drsnosti potrubí.^[11]

Charakter toku určíme pomocí Reynoldsova kritéria:

$$Re = \frac{c \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad (3.2)$$

Pro součinitel tření platí (pro případ kruhového průřezu) ^[1]:

Pro $Re < 2320$ je charakter toku laminární:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3.3)$$

Pro analytické vyjádření součinitele tření v přechodové a turbulentní oblasti se doporučuje použít Churchillův vztah ($Re > 2320$) [30]:

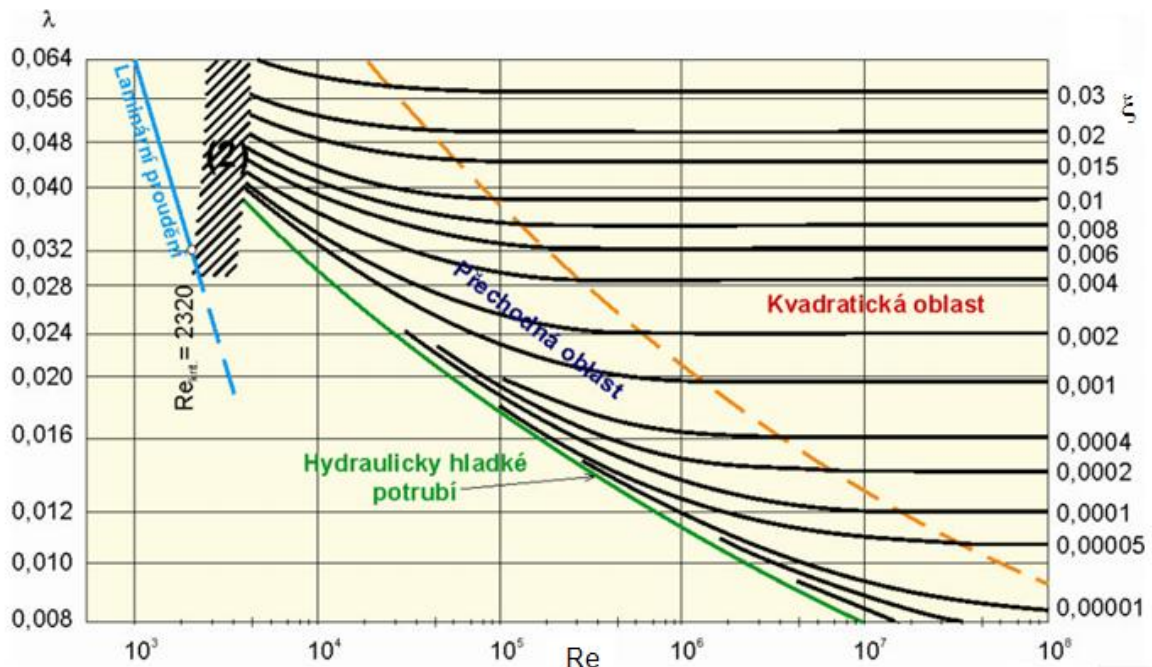
$$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \cdot \log \left[\left(\frac{6,81}{Re} \right)^{0,9} + \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} \right]} \right)^2 \quad (3.4)$$

Při turbulentním průtoku tekutiny lze použít Darcy-Weisbachovu rovnici [1]:

$$P = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{c^2}{2} \cdot \rho \quad (3.5)$$

Při turbulentním proudění je větší intenzita přenosu hybnosti, tepla a hmoty, ale větší ztráta třením.

Moodyho diagram se používá pro řešení výpočtu tlakových ztrát a představuje grafické zpracování závislosti $\lambda = f(Re, \varepsilon/d)$ v logaritmických souřadnicích. Moody jako první zavedl skutečnou drsnost průmyslových potrubí na základě experimentů. Nalezené hodnoty drsnosti potrubí zavedl pomocí poměru ε/d . [1]



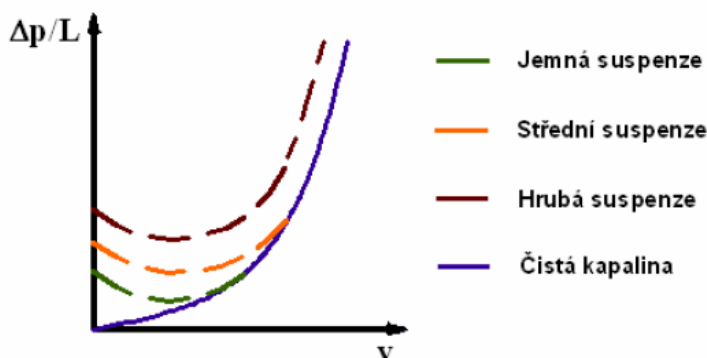
Obr. 3.2 Moodyho diagram vyjadřující závislost $\lambda = f(Re, \varepsilon/d)$ [28]

3.5 Ztráty v potrubí u suspenzí

Tlaková ztráta proudění suspenzí v potrubí je závislá na mnoha hydraulických a fyzikálních parametrech: rychlost proudění suspenze, vnitřní průměr potrubí, průměr tuhé částice, hustota tuhé fáze, hustota kapaliny, součinitel odporu tuhé částice v kapalině a absolutní drsnost potrubí.

V současné době nebyla ještě stanovena rovnice, která by obecně vystihovala vliv jednotlivých veličin na tlakovou ztrátu u suspenzí. Pro praxi se jeví jako nejvýhodnější výpočet ztrát průtoku směsi potrubím pomocí ztrát vypočítaných pro průtok vody a zvýšených pomocí opravných koeficientů podle typu a koncentrace tuhých látek.^[10]

Heterogenní směsi (jemné, střední, hrubé suspenze) jsou charakterizovány rozdílným tlakovým spádem v závislosti na velikosti jednotlivých částic. Tato skutečnost se dá vyjádřit experimentálním srovnáním závislosti jednotkového tlakového spádu čisté kapaliny (vody) a heterogenních směsí.^[10]



Obr. 3.3 Závislost tlakového spádu na velikosti částic ^[11]

Pro čistou kapalinu vychází průběh křivky vždy z počátku a má typický průběh kvadratické paraboly. U jemnozrnné suspenze má křivka odlišný počátek oproti vodě a až po dosažení určité rychlosti se průběh ztotožní. U středních suspenzí nastává shoda průběhu s čistou kapalinou pro podstatně vyšší rychlosti než u předešlé skupiny. U hrubých suspenzí ke ztotožnění závislostí vůbec nedojde ani při vysokých rychlostech.^[10]

4 VLIV HUSTOTY A VISKOZITY

Znalost fyzikálních veličin pracovních kapalin je v praxi velmi důležitá, např. zjišťování tlakových ztrát. Jako nejvýznamnější fyzikální vlastnosti u kapalin můžeme uvést vliv hustoty, viskozity a jejich závislosti na teplotě.

Cílem bylo získat hodnoty hustoty v závislosti na teplotě, viskozity kalu a obsahu sušiny laboratorním měřením. Zjištěné hodnoty byly dosazeny do výpočtů pro tlakové ztráty. Výsledkem bude také zjištění ovlivnění charakteru tlakových ztrát v potrubí.

4.1 Hustota

Hustota kapaliny je definovaná jako hmotnost m vztažená na jednotku objemu V .

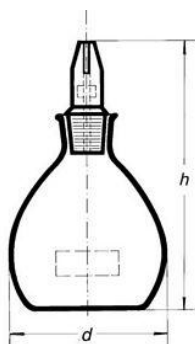
Hustota suspenze bude závislá jak na hustotě spojitě fáze M_k , tak i dispergované fáze M_t .^[1]

Při rovnoměrném rozložení platí:

$$\rho = \frac{M_t + M_k}{V_s} \quad (4.1)$$

Hustota kalů závisí především na typu kalu, původu kalu a také na složení odpadních vod. Hustota kapaliny nemá výrazný vliv na charakteristiku vyjadřující závislost dopravní výšky H na průtočném množství Q .^[11]

Ovlivňuje příkon čerpadla, který je úměrný hmotnostnímu průtoku kapaliny a tedy i hustotě. Změna příkonu bude úměrná změně hustoty dopravované kapaliny.



Obr. 4.1 Názorný obrázek pyknometru^[17]

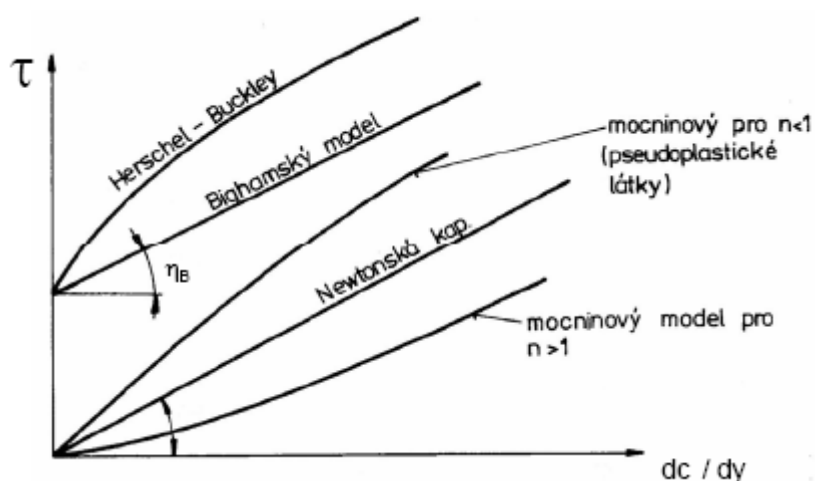
4.2 Viskozita

Viskozita tekutiny je mírou vnitřního tření kapalin a charakterizuje jejich tekutost. Kapaliny, pro které platí Newtonova rovnice, se nazývají newtonovské. Poměr tečného napětí a smykové rychlosti je u newtonovských kapalin konstantní. Vztah 4.2 platí pouze pro laminární proudění kapalin. ^[11]

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{dc}{dy}} \quad (4.2)$$

Kapaliny, pro které je různá funkční závislost popsána vztahem 4.2, se nazývají nenewtonské. Chování nenewtonských látek lze popsat modely, které neukazují závislost viskozity na smykové rychlosti, ale závislost smykového napětí na smykové rychlosti. Nejběžněji používané modely jsou Binghamův, Herschel-Bulkley, Ostwaldův a model Sisko.

Výstupem měření grafická závislost smykového napětí na smykové rychlosti. Taková grafická znázornění se nazývají tokové křivky, někdy také reogramy. Některé typické průběhy lze s dostatečnou přesností popsat matematickými modely. ^{[1][15]}



Obr.4.2 Reogramy ^[16]

Viskozita suspenzí

Viskozita většiny suspenzí je větší než viskozita čisté kapaliny. Podle toho musí být tedy viskozita suspenzí závislá na viskozitě čisté kapaliny, na koncentraci pevné fáze, na tvaru a velikosti pevných částic. ^[11]

Viskozita kalu

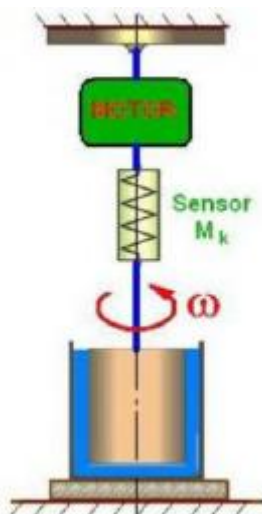
Čistírenský kal se od určité hodnoty obsahu sušiny (přibližně 2 hm. %) chová jako nenewtonská kapalina. V této práci byl měřen zahuštěný kal, který obsahoval více jak 2 hm. % sušiny, a proto bylo provedeno měření několika vzorků kalu, pro zjištění charakteru měřené kapaliny.

Závislost viskozity na teplotě a tlaku

Viskozita je silně závislá na změnu teploty. Při zahřátí kapaliny její viskozita klesá. S klesající viskozitou klesají tlakové ztráty (kapalina klade menší odpor proti proudění). U některých kapalin je viskozita závislá i na tlaku. S rostoucím tlakem se zvyšuje viskozita. Jedná se však o vysoké hodnoty tlaku, které v ČOV neuvažujeme.^[11]

Měření viskozity kalu rotačním viskozimetrem

Rotační viskozimetr pracuje na principu souosých válců, kde jeden z nich se otáčí kolem společné osy. Přímou měřenou veličinou je úhlová rychlost, nebo počet otáček válce a údaje o odporu kapaliny proti smykovému namáhání v důsledku vzniku gradientu rychlosti. Tento odpor se projevuje jako kroutící moment, kterým se jeden z válců přístroje brání proti pohybu přenášeného kapalinou z druhého válce. U systému viskozimetru s vnitřním válcem nastává při otáčení pístu Couettovo proudění.^[11]



Obr. 4.3 Rotační viskozimetr^[16]

4.3 Obsah sušiny v kalu

Pokud je suspenze složena z kapaliny a různých druhů tuhé fáze, která je v kapalině rozptýlena, můžeme s pomocí odpaření kapalné fáze stanovit zbytkový podíl tuhé fáze, což je v technické praxi označováno jako obsah sušiny. Hodnoty obsahu sušiny se udávají v hmotnostních procentech a vyjadřují poměr hmotnosti tuhé fáze po odpaření ku celkovému množství suspenze. Obsah sušiny ovlivňuje vlastnosti suspenze (tím i kalu). Se změnou obsahu sušiny se mění tokové vlastnosti suspenze.

5 ROZBOR ČERPADEL POUŽÍVANÝCH V TECHNOLOGII ČOV

Základní rozdělení čerpadel:

Hydrostatická čerpadla s kmitavým přímočarým pohybem:

- pístová
- plunžrová
- membránová
- vlnovcová
- křídlová
- radiální
- axiální

Hydrostatická čerpadla rotační:

- zubová
- vřetenová
- lamelová
- hadicová

5.1 Čerpadla hydrostatická objemová

Pracovní cyklus hydrostatických čerpadel je periodicky se opakující s velkou účinností. Vyznačují se uzavřeným činným prostorem, který se opakovaně plní a vyprazdňuje. Mechanická energie se mění na tlakovou. Tlaková energie pohyblivého členu se zvyšuje a zvyšuje se tím i potenciální energie kapaliny. Skupina hydrostatických čerpadel se používá v oblasti vysokých tlaků a u čerpání viskózních kapalin.^[1]

Z důvodu ochrany a funkce ČOV musí mít čerpadla 100% zálohu v případě poruchy. Jedno z doporučení je čerpadla opatřit frekvenčním měniči pro regulaci otáček motoru čerpadla.^[2]

Funkce spočívá v postupném zmenšování pracovního objemu vyplněného čerpanou kapalinou. Požadovaný směr kapaliny při výtlaku, nebo její naplnění pracovního objemu určuje výtlakové ústrojí.

Dopraví množství kapaliny je dáno geometrickými rozměry pracovního objemu (reálné množství je vždy o něco menší). Čím větší dopravované množství kapaliny budeme chtít, tím větší musíme mít stroj.

Dopravní výška H je úměrná tlaku, který je schopen vyvinout element čerpadla (píst, plunžr, membrána atd.)

5.2 Pístová čerpadla

Vyrábí se v mnoha variantách a často se dělí podle způsobu práce:

- **Jednočinná** (Nasává a vytlačuje jen jedna strana pístu).
- **Dvojčinná** (Nasává a vytlačují obě strany pístu).
- **Diferenciální a zdvižná** (Jedno nebo víceválcová).

Základní konstrukci čerpadla tvoří klikový mechanismus a píst, který se pohybuje přímočaře vratně. Což způsobuje nerovnoměrné zásobování kapaliny. Vstup a výstup kapaliny je řízen ventily, které jsou samočinně řízeny pomocí přetlaku/podtlaku.

Při pohybu pístu nahoru se otevře sací ventil a kapalina se nasaje do pracovního prostoru.

Při klesání pístu se vlivem přetlaku uzavře sací ventil a otevře se výtlačný ventil → nasátý objem kapaliny je vytlačován do vzdušníku. Kapalina teče k výtlačnému hrdlu do výtlačného potrubí.

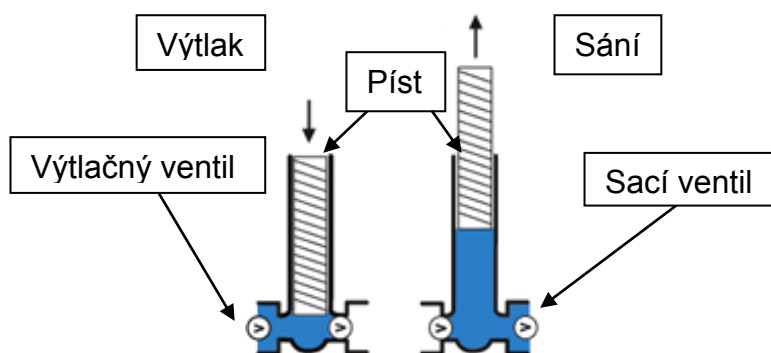
U víceválcových čerpadel jednotlivé válce ústí do společné sběrné nádrže. Tím je zajištěna, víceméně, plynulost dodávání čerpané kapaliny.

U těchto čerpadel se mění mechanická energie na hydrostatickou. Oproti hydrodynamickým čerpadlům pracují s nižšími otáčkami. ^[1, 20, 22]

Použití: Pro čerpání suspenzí s průměrem částic $d < 0,1$ mm, pro tlaky 10 MPa, ale i vyšší. ^[22]

Výhody: Velká mechanická účinnost (95-98 %). ^[22]

Nevýhody: Při pohonu elektromotorem vyžadují převodovku, což zvyšuje investiční náklady. Jsou větší oproti odstředivým čerpadlům → vyšší náklady. ^[20]



Obr. 5.1 Čerpání pístovým čerpadlem ^[21]

5.3 Plunžrová čerpadla

Mají stejný princip funkce jako předešlý typ. Konstrukce se zásadně liší tím, že píst je nahrazen tzv. plunžrem, u kterého délka převládá nad průměrem a při pohybu se dotýká ucpávek, které mají těsnící funkci. Pro znečištěné kapaliny se používají pogumované kulové ventily. Po skončení čerpání je potřeba propláchnutí pracovního objemu čerpadla čistou kapalinou pro odstranění mechanických částic. ^[1]

Použití: Vysokotlaké čerpání vody, čerpání znečištěných kapalin i pro čerpání suspenzí. ^[1]

Nevýhody: Opotřebení plunžru ^[1]

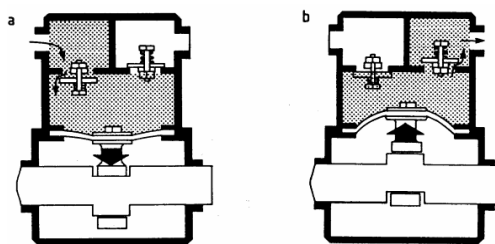
5.4 Membránová/vlnovcová čerpadla

U těchto čerpadel je píst nahrazen pružnou membránou nebo vlnovcem. Pohyb pružných členů je obstaráván tlakem hydraulické kapaliny, na kterou působí píst, plunžr, nebo může být pohyb membrány vyvolán magneticky. ^[1]

Použití: Tam, kde je potřeba dokonalá těsnost kapaliny. Pro jedovatá, agresivní, nebo drahá media.

Výhody: Dokonalé oddělení čerpané kapaliny od vnějšího prostředí

Nevýhody: Omezená životnost pružných členů



A) Sání kapaliny

B) Vytlačení kapaliny

Obr. 5.2 Princip membránového čerpadla ^[25]

Hydrostatická čerpadla s rotačním pohybem

Rozvod kapaliny je zajištěn přímo rotačním pohybem rotoru, tudíž neobsahují ve své konstrukci rozvodové ventily.

Dělí se dle typu hlavního rotačního členu:

- Zubová čerpadla
- Šneková čerpadla
- Vřetenová čerpadla

Výhody: Rovnoměrné dodávání kapaliny. Nepotřebují převodovku, mohou být poháněny pouze elektromotorem.

Nevýhody: Pracovní prostory musí být dostatečně těsněny. Dopravní výška je závislá na těsnosti rotačních ploch.

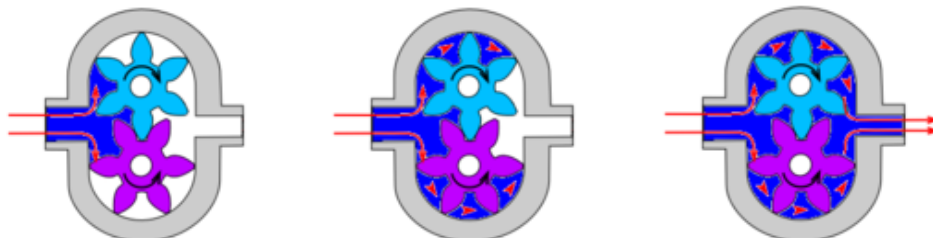
5.5 Zubové čerpadlo

Je tvořeno dvojicí ozubených kol. Dopravování kapaliny probíhá mezi zuby a obvodem skříně. Rotace ozubených kol (hnací ozubené kolo zobrazeno modře, hnané ozubené kolo fialově) způsobí podtlak na vstupní straně čerpadla, čímž dojde k nasátí kapaliny do skříně čerpadla. Před sáním je většinou umístěn filtr zabraňující prostupu pevných částic, které mohou poškodit zuby kol.^{[1] [26]}

Použití: K čerpání olejů, nebo viskózních kapalin a pro menší množství a vyššími tlaky kapalin.^[26]

Výhody: Lze předem definovat přepravované množství. Rovnoměrné dodávání kapaliny. Nepotřebují převodovku, mohou být poháněny elektromotorem.^[26]

Nevýhody: V okamžiku bodu záběru dochází k namáhání čepů a ložisek a opotřebením zubů.^[26]



Obr. 5.3 Kroky čerpání kapaliny: 1. Nasátí kapaliny do skříně čerpadla
2. Unášení kapaliny ozubenými koly 3. Výstup kapaliny ze skříně čerpadla^[25]

5.6 Vřetenová čerpadla

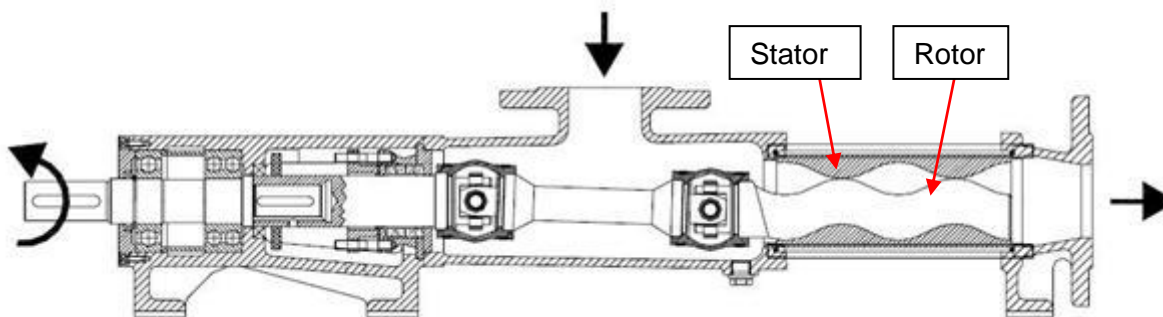
5.6.1 Jednovřetenové čerpadlo (typ MONO)

Skládá se ze statorové a rotorové části. Rotorová část je tvořena závitovým vřetenem s oblým a hlubokým závitem s vysokým stoupáním a malým poloměrem. Závitové vřeteno je spojeno s hnací hřídelí s dvěma klouby, které umožňují krouživý pohyb pracovního vřetene. Rotor se odvaluje po statoru a tím vytváří těsnící místa, která způsobují čerpání kapaliny. ^[1, 22]

Použití: Pro vazké kapaliny s pevnými příměsemi (Splaškové vody, malta, různé emulze, barvy). Slouží pro dopravu velkého množství při malé výtlačné výšce a malých nákladech na čerpání. Pro čerpání primárních a před zahuštěných kalů. ^[22, 24]

Výhody: Velká výtlačná výška u kapalin s vysokou viskozitou (6-8 % obsahu sušiny).

Nevýhody: Jsou náchylná na vydírání vnitřní výstelky i vlastního vřetene abrazivními částicemi → ovlivnění životnosti stroje. Malá objemová účinnost (cca 80%) a složitá výroba. Životnost závisí na účinnosti mechanického předčištění.



Obr. 5.4 Řez vřetenovým čerpadlem ^[24]

5.6.2 Vícevřetenová čerpadla

Konstrukce tohoto druhu čerpadla může být od dvou, tří a čtyřvřetenové. Pohyb vřeten je synchronizován ozubenými koly, aby se zmenšilo opotřebení šroubových závitů. Činnou částí je vřeteno šroubovitého tvaru, které umožňuje axiální pohyb kapaliny. Závit vřetena mají obdélníkový, nebo lichoběžníkový profil. ^[1, 22]

Použití: Možnost použít i pro vyšší tlaky (pro vyšší tlakové spády)

Výhody: Vysoká účinnost (cca 90%). Malá hlučnost. Rovnoměrné dodávání kapaliny i při vysokých otáčkách. Dlouhá životnost a malé rozměry. ^[1, 22]

Nevýhody: Složitá konstrukce a tím i vyšší cena.

5.7 Šneková čerpadla

Hlavním principem je pohyb Archimedova vodního šroubu. Základními prvky je nakloněná hřídel, těsně přiléhající ke stěně pláště, upevněná mezi ložisky. Při otáčení se nabírá kapalina šroubovou plochou. Dopravní výška musí být vhodně zvolena. Používají se jen pro malé dopravní výšky. Šneková čerpadla mohou být konstruována jako otevřená (šnek není na hřídeli zcela uzavřen) a také uzavřená.

Použití: U čerpání splašků, hustých kalů v ČOV. Jsou vhodná pro čerpání velkého množství kapaliny do malé výtlačné výšky (cca 10m). Jsou používány v oblasti mechanického předčištění, především vstupního čerpání. Pro velké průtoky (100 až 1000 l/s)

Výhody: Spolehlivá a nenáročná technologie a minimální údržba

Nevýhody: Použití jen pro malé výšky. Vyžadují velký zastavěný prostor. Vyšší náklady na stavbu. Mezi nevýhody patří hlučnost a nízká účinnost.



Obr. 5.5 Šneková čerpadla na vstupu do ČOV ^[27]

Srovnání hydrostatických a hydrodynamických čerpadel^[28]:

Výhodami hydrostatických čerpadel ve srovnání s čerpadly hydrodynamickými:

- větší účinnost, protože je zde transformace energie jednodušší
- samonasávací schopnost
- možnost čerpat i kapaliny o vyšší viskozitě.

Nevýhodami hydrostatických čerpadel ve srovnání s čerpadly hydrodynamickými:

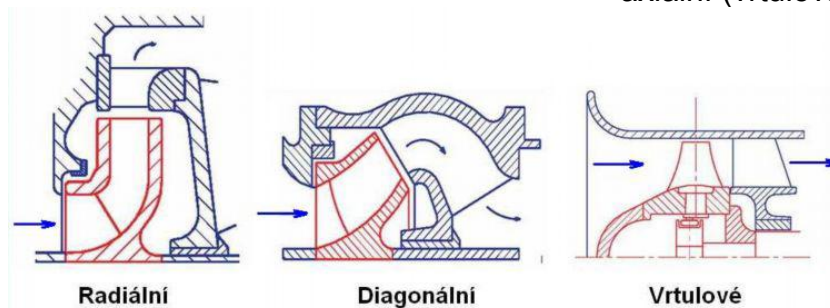
- vyšší cena
- větší rozměry

5.8 Hydrodynamická čerpadla

Rozdělení dle směru proudění kapaliny ^[29]:

A) Lopatková

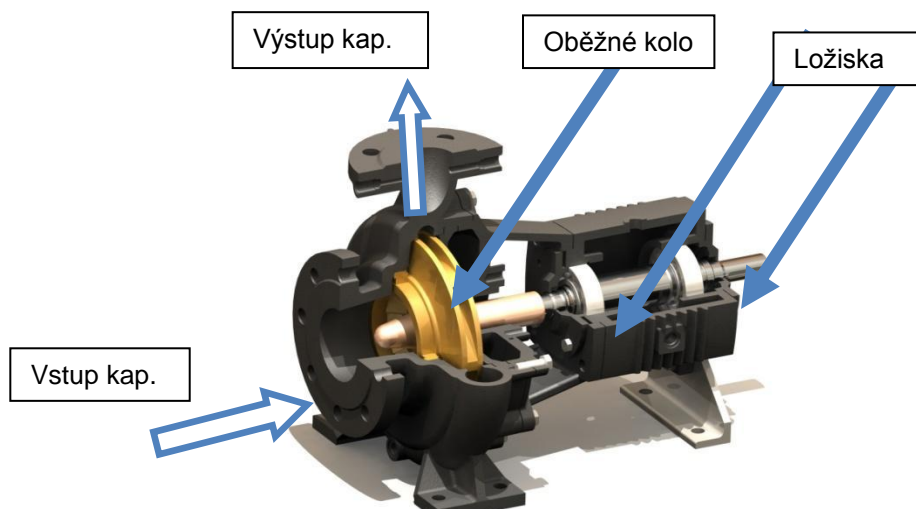
- radiální (odstředivá)
- diagonální (šroubová)
- axiální (vrtulová)



Obr. 5.6 Provedení lopatek podle směru proudění ^[29]

b) Proudová

Dopravovaná kapalina je strhávána proudem vody, plynu nebo páry, vytékající vysokou rychlostí z trysky



Obr. 5.7 Provedení lopatek podle směru proudění ^[29]

Na rozdíl od hydrostatických čerpadel se u hydrodynamických čerpadel využívá dynamických vlastností proudící kapaliny. Mechanická energie se v oběžném kole čerpadla mění na kinetickou energii, která v rozšiřující se výstupní části skříně čerpadla mění na energii tlakovou. Vícenásobná změna energie způsobuje větší ztráty a tím nižší účinnost než u hydrostatických čerpadel. ^[1]

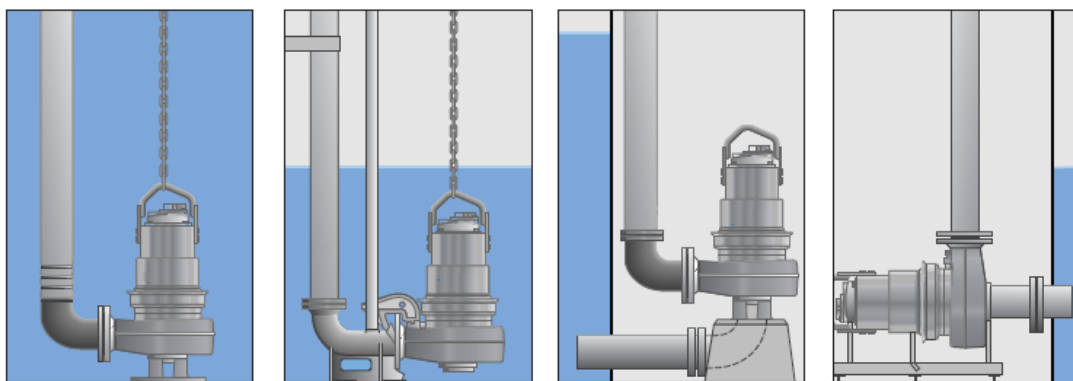
Kapalina je přiváděna do čerpadla vstupním hrdlem, které je umístěno ve středu víka skříňe, odtud vstupuje do rotoru - rotujícího lopatkového kola, ve kterém jsou pomocí lopatek vytvořeny kanály směrem k vnějšímu obvodu. Při průtoku kapaliny kanálem získá kapalina tlakovou a kinetickou energii. Spirálová skříň je upravena tak, aby při průtoku kapaliny směrem k výtlačnému hrdlu došlo ke snížení rychlosti a tím i ke zvětšení tlaku vlivem přeměny kinetické energie na tlakovou.^[1]

5.8.1 Možnosti použití:

Čerpací stanice s mokrou jímkou (ponorná čerpadla)

Čerpací stanice se suchou jímkou:

- Vertikální instalace
- Horizontální instalace



Obr. 5.8 Provedení s mokrou jímkou a vertikální horizontální provedení suché jímky^[19]

Použití: Pro velké průtoky. Užívají se i pro čerpání kalů, ale pouze s omezeným množstvím nečistot v kapalině. Jsou určena k čerpání odpadních vod, fekálií a surových kalů s celkovým podílem sušiny maximálně 10 hm. % sušiny. Uvedený druh kapaliny by neměl obsahovat pevné částice, které by způsobily vydírání funkčních částí čerpadla.^[29]

Výhody: Rovnoměrné dodávání kapaliny, jednoduchost zařízení, snadná instalace, životnost, bezporuchovost i nenáročná obsluha.^[29]

Nevýhody: Náchylnost na vydírání vnitřních aktivních částí abrazivními částicemi. Životnost závisí na účinnosti mechanického předčištění v ČOV.

Čerpadla pracující na jiném principu

1. Vodní trkače, využívající energetického rázu a dodávají kapalinu přerušovaně

2. Elektromagnetická pro dopravu vodivých kapalin vlivem elektromagnetického pole

3. Mamutová, ve kterých je kapalina vynášena přiváděným vzduchem.

5.9 Mamutová čerpadla

Do čerpací trubky se tryskou přivádí vzduch, který v čerpané kapalině vytváří bubliny. Vytvořená směs vzduchu a čerpané kapaliny má menší hustotu než je hustota samotné čerpané kapaliny a způsobuje, že médium stoupá vzhůru potrubím. Tlak používaného vzduchu je 0,1 až 0,2 MPa. Na vyčerpání jednoho litru kapaliny je třeba dvou až tří litrů vzduchu.^[1, 20, 22]

Použití: pro čerpání kalných kapalin, také k dopravě ropných řízků v cukrovarech. Mechanické nečistoty mohou dosahovat velikosti do 8 mm.

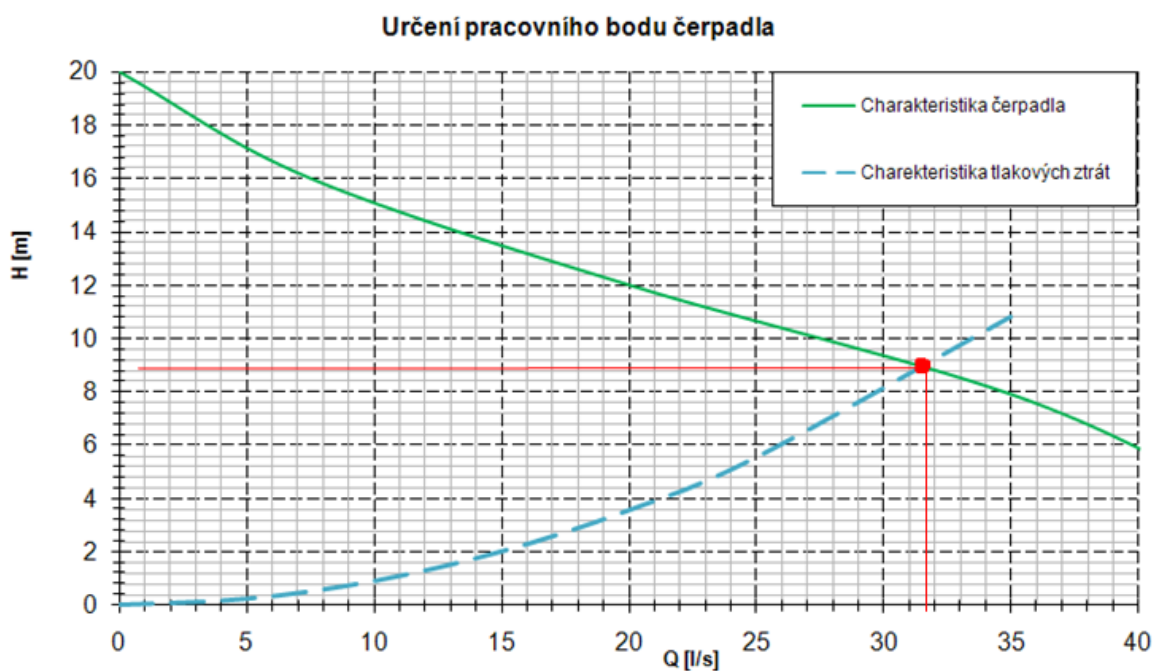
Výhody: nemají žádné pohyblivé části, které by se při provozu opotřebovávaly, je jejich hlavní výhodou jednoduchost, spolehlivost a bezporuchový provoz. Vysoká odolnost proti abrazi.

Nevýhody: malá účinnost malá, výtlačná výška. Vyšší spotřeba energie a problematické čištění

Pracovní bod čerpacího systému

Pracovní bod čerpadla leží v průsečíku charakteristiky čerpadla a charakteristiky potrubí. Pracovní bod určuje veškerou energii, kterou čerpadlo dodá kapalině. Energie čerpadla je využita na dopravu kapaliny a pokrytí ztrát potrubí, systém je tak ve stabilním stavu. Grafické řešení spočívá ve vykreslení obou charakteristik do jednoho grafu ve stejném měřítku, a následné odečtení souřadnic průsečíku. Volené čerpadlo by mělo dosahovat maximální účinnost v okolí pracovního bodu. Pokud známe hodnotu průtoku a měrné energie v pracovním bodě, je možné vypočítat hydraulický výkon. Charakteristika se sestavuje vždy pro určité konstantní otáčky.^[1]

Čerpá-li se suspenze, mění se charakteristika čerpadla i charakteristika potrubí v závislosti na změně objemové koncentrace čerpané suspenze. Tím nastává i změna provozního bodu čerpadla, to znamená, že se hlavně mění objemový průtok směsi.^[1]



Obr. 5.9 Určení pracovního bodu čerpadla

Praktická část diplomové práce

6 MĚŘENÍ HUSTOTY A VISKOZITY KALU

Úkolem bylo zjištění fyzikálních vlastností čerpaného kalu (hustoty a viskozity) a následná aplikace měřených hodnot pro výpočet tlakových ztrát potrubí. Byly měřeny čtyři vzorky kalu odebrané z ČOV v Prostějově. Každý vzorek byl měřen třikrát ve stejné teplotě. U každého vzorku byl stanoven obsah sušiny, který je uveden v protokolu o měření. Protokol o měření byl vytvořen po každém měření vzorků a obsahuje výsledné hodnoty a informace o měření specifického vzorku.

6.1 Měření hustoty

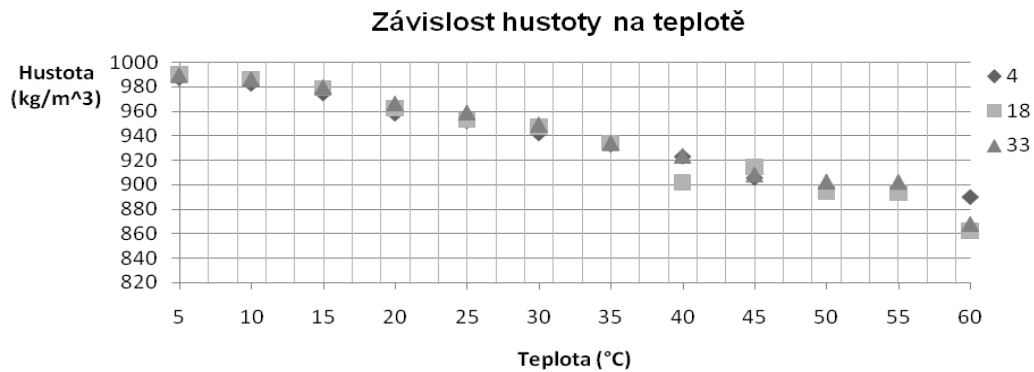
Měření hustoty kalu bylo provedeno pyknometrickou metodou. Pyknometr je skleněná nádoba se zabroušeným uzávěrem. Uzávěrem je vedena tenká kapilára, kterou může unikat při zavírání přebytečné množství kapaliny.

Prázdné pyknometry byly zváženy před každým měřením nového vzorku kalu. Po naplnění pyknometrů kalem a následném měření teploty kalu byly pyknometry zváženy. Poté byly vloženy do vodní lázně s termostatem určujícím teplotu vodní lázně a byly ohřívány od teploty 20 °C do 60 °C v intervalech po 5 °C. Po dostatečné době ohřívání ve vodní lázni byly pyknometry vyndány, osušeny a zváženy. Odečtení hmotnosti prázdného pyknometru od zvážené hmotnosti pyknometru s kalem byla hustota kalu určena z rovnic (4.1).

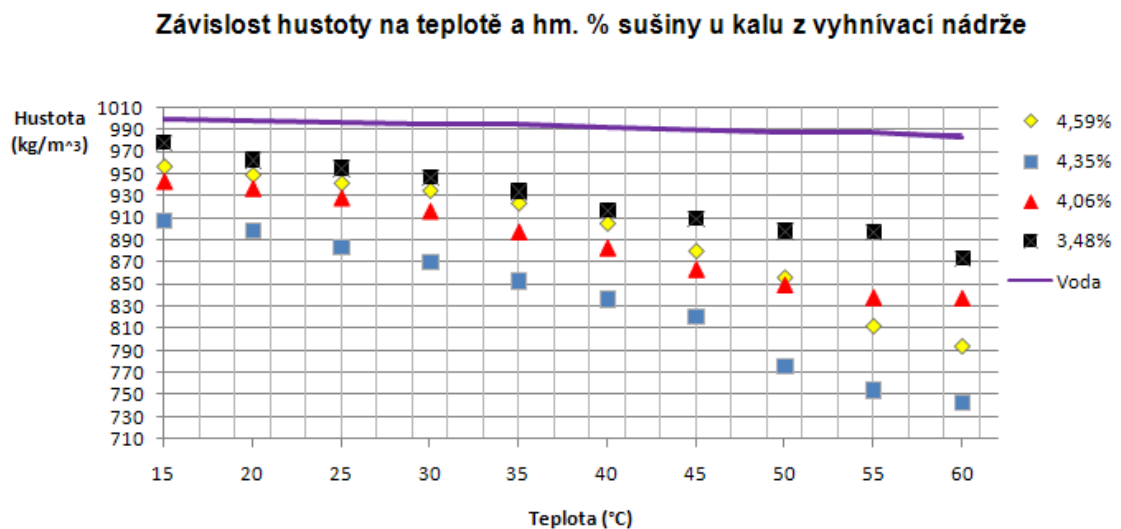


Obr. 6.1 Vodní lázeň s ohříváčem a pyknometry

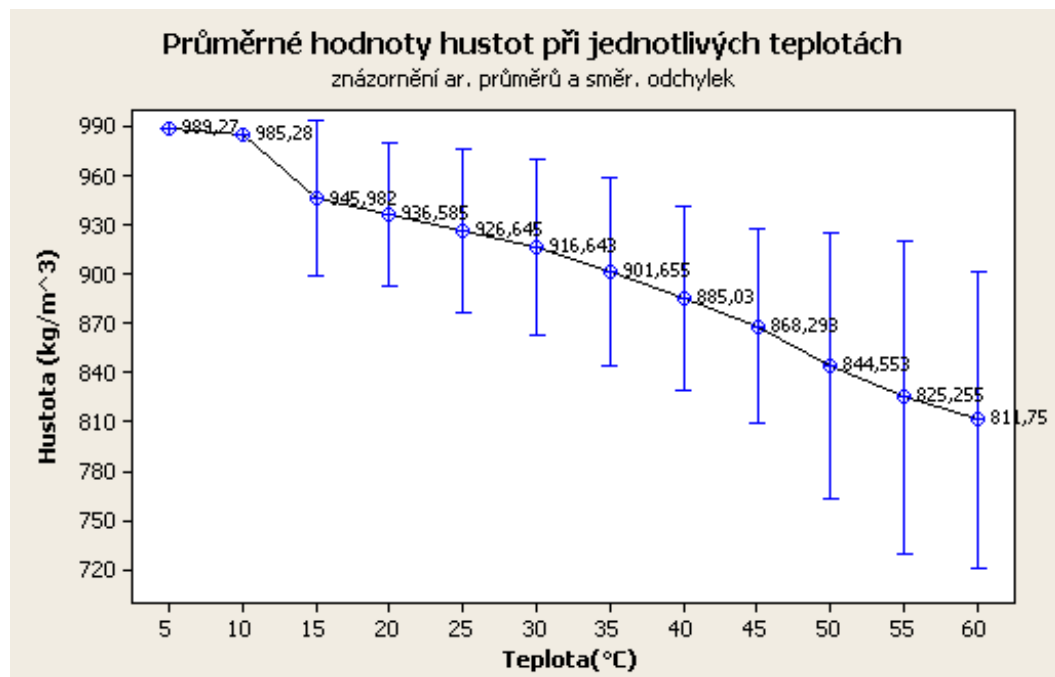
6.1.1 . Výsledky měření hustoty kalu:



Obr. 6.2 Výsledky měření hustoty kalu z 16. 3. 2011 (viz. protokol o měření)



Obr. 6.3 Naměřené hodnoty hustoty pro různé hmotnostní % sušiny v kalu



Obr. 6.4 Střední hodnoty hustoty ze všech měřených vzorků

6.1.2 Zhodnocení výsledků měření hustoty kalu

Z každého grafu měření hustoty je zřetelný klesající trend hustoty kalu se zvyšující se teplotou. Obr. 6.3 obsahuje průměrné hodnoty hustoty kalu. Ze stejného obrázku je vidět velká směrodatná odchylka, která může být způsobena malým počtem měření. Rozptyl hodnot hustoty kalu byl způsoben i tím, že vzorky byly měřeny cíleně v různém časovém období. Měření o teplotě 5 a 10 °C bylo provedeno pouze jednou pro informativní charakter.

V rozsahu nižších teplot 20-30 °C kal obsahoval ve svém objemu drobné bublinky plynu, což může vést ke zkresleným výsledkům. U měřených vzorků kalu se obsah sušiny vždy lišil a nikdy nepřesáhl 5 %. Zjištěný hmotnostní obsah sušiny se pohybuje od 3,48 – 4,59 % sušiny v kalu. Z toho vyplývá, že nejsme schopni zjistit přesné, ale jen přibližné hodnoty hustoty kalu. Výsledky měření však použijeme k výpočtu tlakových ztrát. Hustota kalu je menší ve srovnání s hustotou vody. Měření společně s výsledky včetně grafického znázornění bylo zpracováno do protokolů o měření, které jsou součástí příloh.

6.2 Měření viskozity

Měření dynamické viskozity kalu bylo provedeno u každého vzorku, vždy od 10 °C–60 °C pro zvyšující se smykovou rychlost. Teplota, stejně jako u měření hustoty, byla zvyšována po pěti stupňových intervalech. Měření vzorků kalu bylo provedeno rotačním viskozimetrem Rheolab QC s jednotkou pro možnost ohřevu/chlazení měřené kapaliny.

Volený rozsah otáček byl 1 až 800 s⁻¹. Při otáčení válce kapalina klade odpor. Tento odpor se projevuje jako krouticí moment, kterým se jeden z válců přístroje brání proti pohybu přenášeného kapalinou z druhého válce. U systému viskozimetru s vnitřním válcem nastává při otáčení pístu Couettovo proudění.^[11]



Obr. 6.5 Rotační viskozimetr s jednotkou pro ohřev/chlazení kapaliny

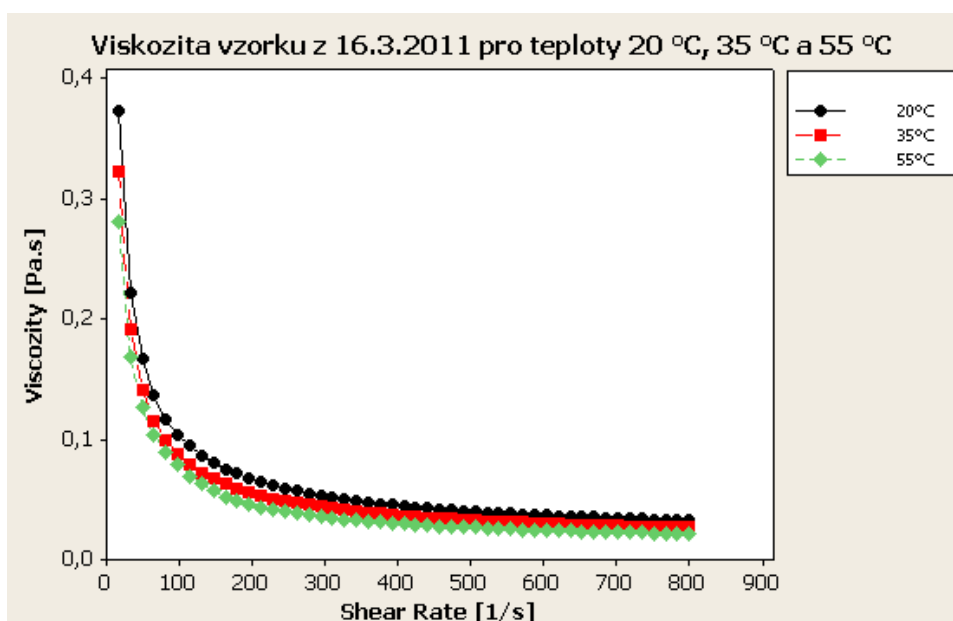
6.2.1 Výsledky měření viskozity kalu:

Tab. 6.1 Průměrné hodnoty dynamické viskozity kalu ve dvou intervalech a celkový průměr

Teplota	Počet hodnot	Smyk. Rychlost [1/s]	η [Pa.s]				Průměrné hodnoty
			Vzorek 1.	Vzorek 2.	Vzorek 3.	Vzorek 4.	
Sušiny ve vzorku [hm. %]			4,59	4,35	4,09	3,59	4,155
20 °C	8	0-130	0,277	0,206	0,189	0,163	0,209
	41	146-800	0,068	0,054	0,051	0,046	0,054
35 °C	8	0-130	0,234	0,172	0,156	0,138	0,175
	41	147-800	0,055	0,043	0,041	0,038	0,044
40 °C	8	0-130	0,220	0,162	0,154	0,129	0,166
	41	147-800	0,051	0,041	0,039	0,035	0,041
55 °C	8	0-130	0,195	0,142	0,134	0,123	0,148
	41	146-800	0,045	0,035	0,033	0,031	0,036
60 °C	8	0-130	0,186	0,135	0,131	0,114	0,141
	41	147-800	0,043	0,033	0,0318	0,029	0,034

Tabulka č. 6.1 obsahuje již průměrné hodnoty dynamické viskozity stanovené ve dvou intervalech smykové rychlosti. Hodnoty jsou rozděleny do intervalů právě z důvodu velmi proměnlivé závislosti viskozity na smykové rychlosti. První interval z 8 hodnot vykazuje velmi vysokou viskozitu. Hodnoty viskozity se pohybují kolem 0,28-0,19 Pa.s. Od hodnoty smykové rychlosti přibližně 130 s^{-1} viskozita kalu výrazně klesne a ustálí se na velikosti 0,07-0,03 Pa.s. Průměrné hodnoty v intervalech byly statisticky zpracovány ze všech měřených vzorků kalu. Jednotlivá měření jsou uvedena graficky v protokolech o měření.

Ve srovnání s vodou je viskozita kalu několikanásobně vyšší. Do protokolu o měření byly vždy uvedeny dva grafy závislosti zdánlivé viskozity na smykové rychlosti při teplotách od 5-30 °C a 35-60°C. Součástí přílohy protokolu je graf závislosti smykovém napětí na smykové rychlosti.

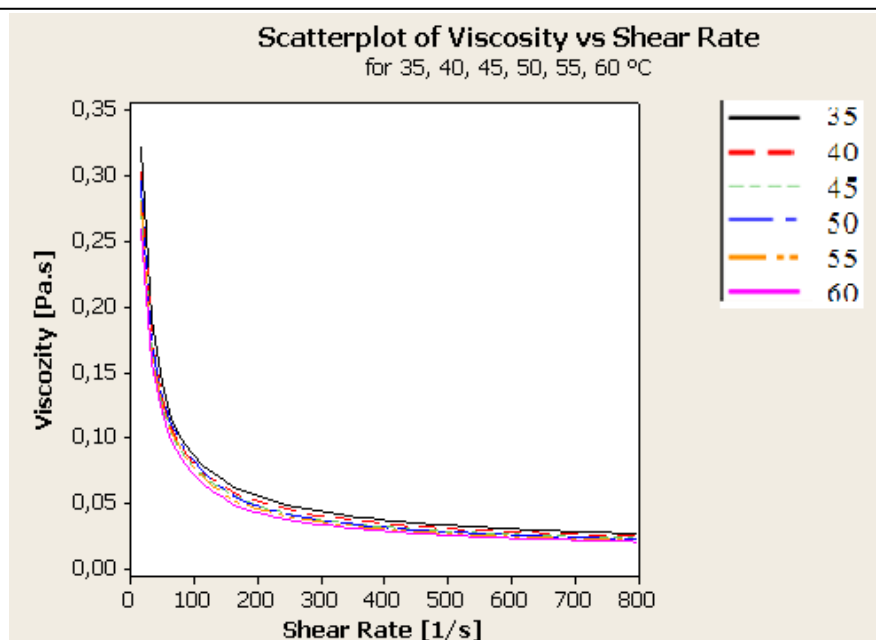


Obr. 6.6 Přehled hodnot zdánlivé viskozity závislé na smykové rychlosti

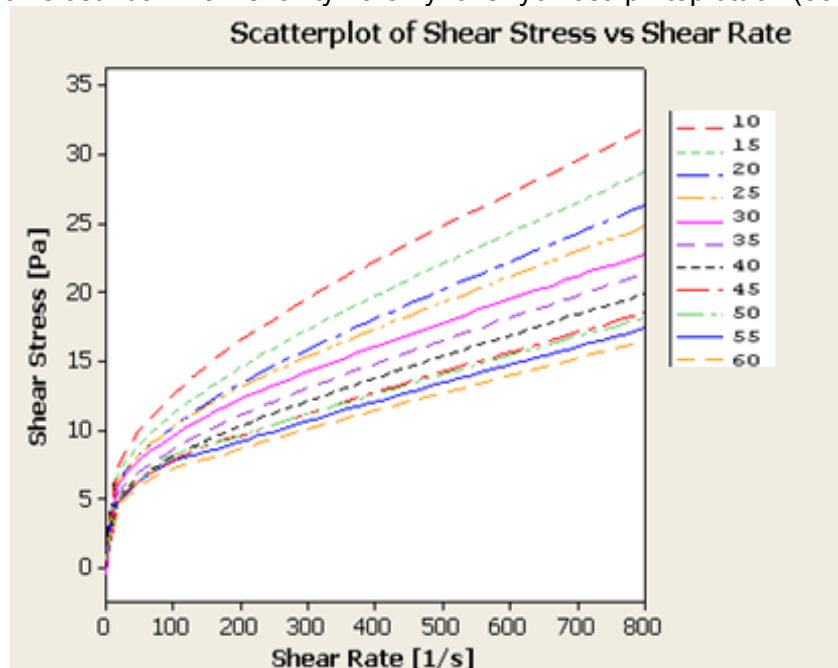
Tab. 6.2 Zvolené hodnoty dynamické viskozity kalu pro výpočty

Zvolená dynamická viskozita kalu pro výpočty			
Teplota [°C]	20	35-40	55-60
dynamická viskozita [Pa.s]	0,12	0,11	0,1

Zvolené hodnoty dynamické viskozity byly určeny z grafů pro závislost viskozity na smykové rychlosti. Protože první 4 hodnoty jsou vysoké a následně se pak postupně další hodnoty viskozity ustálí pod hodnotu kolem 0,05 Pa.s byly zvolené hodnoty určeny v místě těsně nad ohybem křivky.



Obr. 6.7 Závislost zdánlivé viskozity na smykové rychlosti při teplotách (35-60 °C)



Obr. 6.8 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti při teplotách (10-60°C)

6.2.2 Zhodnocení výsledků měření viskozity kalu

Z reogramů plyne, že měřený kal má charakteristické vlastnosti neneutonské kapaliny. Pokud porovnáme výsledky měření s matematickými modely, nejvíce podobný model je pro řidnoucí pseudoplastické kapaliny. Zdánlivá viskozita všech měřených vzorků kalu je výrazně vyšší než viskozita vody. Důležité informace poskytuje tabulka 6.1, která ukazuje velikost viskozity kalu v závislosti na % sušiny. S klesajícím obsahem sušiny, klesá viskozita kalu. Obrázek 6.6 ukazuje vysoké zaznamenané hodnoty viskozit při začátku měření a následné ustálení viskozity s malým rozptylem hodnot. Zvolené hodnoty dynamické viskozity kalu pro výpočet tlakových ztrát jsou v tab. 6.2.

7 VÝPOČET TLAKOVÝCH ZTRÁT V POTRUBÍ

Výpočet se týká cirkulačního potrubí vyhnivací nádrže pro ČOV v Prostějově. Potrubí slouží pro cirkulaci kalu. Cirkulaci zajišťují dvě čerpadla (jedno připojené do provozu a druhé sloužící jako záložní). Čerpadla přečerpávají kal z dolní cirkulační větve přes výměník tepla do horní cirkulační větve, kterou se ohřátý kal vrací zpět do středu vyhnivací nádrže. Cirkulace kalu může probíhat oběma směry. Výpočet tlakových ztrát v potrubí však byl proveden pro cirkulaci kalu ze spodní části do střední části vyhnivací nádrže (což je běžný stav provozu). Pro cirkulaci kalu se používá nerezové potrubí a z téhož materiálu jsou také i potrubní dílce (oblouky, redukce, odbočky).

Pro výpočet tlakových ztrát byl použit výpočet pro newtonské kapaliny s tím, že hodnoty hustoty a viskozity, byly dosazeny ze zjištěných měření kalů. Hodnoty tlakové ztráty jsou uváděny v metrech jako ztrátová výška.

Účel výpočtu poskytne informace o velikosti tlakové ztráty v závislosti na zvyšující se teplotě kalu. V příloze je uveden náhled na obě cirkulační větve. Tlakové ztráty byly pro vnesení charakteristiky přepočteny z kPa na metry.

Zvolené hodnoty: absolutní drsnost potrubí 0,3

Uvažované hodnoty: vnitřní průměr potrubí 0,15 m

Hustota a viskozita kalu určena měřením pro teploty 20°, 35-40°C a 55-60°C

Tab. 7.1 Přehled stanovených místních odporů ^[30]

Přehled místních odporů pro levou část potrubí		Hodnota součinitele místního odporu ξ	
Popis místních ztrát	Počet kusů	ξ pro 1 kus	
		ξ	ξ
Oblouk 90°, r/d = 1,5	7	0,25	1,75
Ostrohranný výtok	1	0,25	0,25
Nátok s ostrou hranou	1	0,5	0,5
T-kus (hlavní proud - rovně)	3	0,1	0,3
T-kus (hlavní proud - pod úhlem 90°)	1	1,5	1,5
Nožové šoupátko	6	0,25	1,5
Spojení potrubí přírubovým spojem	8	0,05	0,4
Kónické zúžení průřezu	1	0,25	0,25
Kónické rozšíření průřezu	1	0,8	0,8
Oblouk 45°	2	0,2	0,4
Zpětná klapka	1	6	6
Oblouk segmentový 45°, r/d = 4	5	0,15	0,75
$\Sigma \xi$			14,40
Délka rovného potrubí [m]			29,17

V tab 7.1 je uveden příklad uvažované levé cirkulační větve. Pro levou větev jsou vypsány součinitele místních odporů, jejich celkový součet $\Sigma \xi$ a délka rovného potrubí. Stejný postup výpočtu byl definovaný po pravou cirkulační větev. Pro obě varianty cirkulačních větví (levá a pravá strana) byl do výpočtu uvažován i výměník tepla s typovým označením TVVK12. Tlaková ztráta výměníku byla vypočtena separátně pomocí výpočtu poskytnutého firmou KH Kinetic^[18].

7.1.1 . Výsledky výpočtu tlakových ztrát metrech:

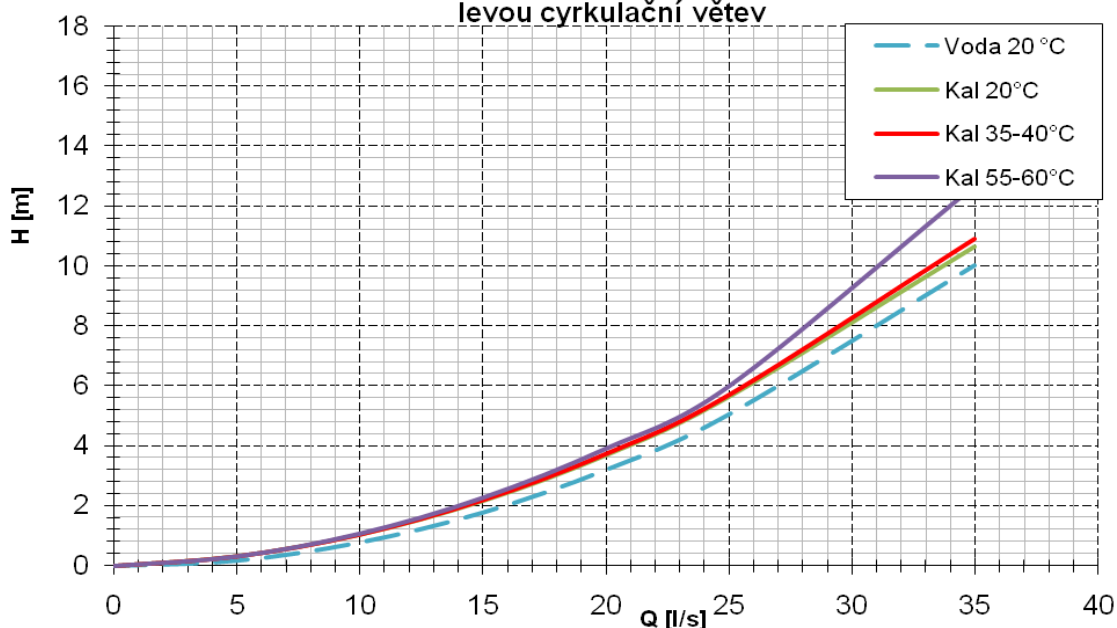
Tab. 7.2 Uvažovaná ztrátová výška výměníku tepla v metrech (typ TVVK12) ^[18]

Výpočet tlakových ztrát výměníku (m)			
Q	Teplota		
l/s	20°C	35-40°C	55-60°C
0	0	0	0
5	0,099	0,104	0,114
10	0,481	0,504	0,550
15	1,144	1,199	1,309
20	2,090	2,191	2,391
25	3,318	3,478	3,796
35	6,619	6,939	7,573

Tab. 7.3 Přehled výpočtů tlakové ztráty při různých teplotách

Q	Cirkulační větev (levá)		
	Teplota 20°C	Teplota 35-40 °C	Teplota 55-60 °C
l/s	Ztrátová výška		
	[m]		
0	0	0	0
5	0,324	0,318	0,319
10	1,048	1,05	1,078
15	2,172	2,195	2,277
20	3,696	3,736	3,917
25	5,648	5,698	5,997
35	10,664	10,909	12,702

Současný stav ztrátové výšky H na objemovém průtoku Q pro levou cirkulační větev



Obr. 7.1 Závislost charakteristik tlakových ztrát na teplotě pro levou cirkulační větev

7.1.2 Uvedený příklad výpočtu:

Příklad výpočtu je proveden pro teplotu kalu 20 °C. Ve výpočtu jsou už přímo přepočteny tlakové ztráty na ztrátovou výšku, která byla vynášena do Q-H diagramu.

Výpočet rychlosti proudění:

Q - objemový průtok byl zvolen 20 l/s = 0,02 m/s

d - vnitřní průměr d=150 mm

$$c = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,02}{\pi \cdot 0,0225} = 1,132 \text{ m/s} \quad (7.1)$$

Výpočet Reynoldsova čísla:

Hustota kalu byla naměřena při 20°C $\rho = 936,6 \text{ kg/m}^3$

Dynamická viskozita kalu $\eta = 0,13 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

$$\text{Re} = \frac{c \cdot d \cdot \rho}{\eta} = \frac{1,132 \cdot 0,15 \cdot 936,6}{0,12} = 1223,7 \quad (7.2)$$

Velikost Re odpovídá laminárnímu charakteru proudění.

Výpočet součinitele tření:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{1362,5} = 0,052 \quad (7.3)$$

Přídavek délky místními odpory:

Pro sání čerpadla:

$$l_{\xi s} = \sum \xi \cdot \frac{d}{\lambda} = 4,15 \cdot \frac{0,15}{0,052} = 11,903 \text{ m} \quad (7.4)$$

Pro výtlač čerpadla:

$$l_{\xi v} = \sum \xi \cdot \frac{d}{\lambda} = 10,25 \cdot \frac{0,15}{0,052} = 29,398 \text{ m} \quad (7.5)$$

Tlaková ztráta pro sání:

$$p_s = \lambda \cdot \frac{(l_{\xi s} + l_{\xi v}) \cdot c^2}{d} \cdot \rho = 0,052 \cdot \frac{(6,15 + 11,903) \cdot 1,132^2}{0,15} \cdot 936,6 = 5871,2 \text{ Pa} \quad (7.6)$$

Ztrátová výška pro sání:

$$H_s = P_s / g \cdot \rho = 5871,2 / 9,81 \cdot 936,6 = 0,639 \text{ m} \quad (7.7)$$

Tlaková ztráta pro výtlač:

$$P_v = \lambda \cdot \frac{(l_{\xi s} + l_{\xi v}) \cdot c^2}{d} \cdot \rho = 0,052 \cdot \frac{(3,015 + 29,398) \cdot 1,132^2}{0,15} \cdot 936,6 = 8875,7 \text{ Pa} \quad (7.8)$$

Ztrátová výška pro výtlač:

$$P_v = P_s / g \cdot \rho = 8875,7 / 9,81 \cdot 936,6 = 0,966 \text{ m} \quad (7.9)$$

Tlaková ztráta výměníku tepla v metrech ^[18]:

$$H_{vt} = 2,09 \text{ m}$$

Celkové tlakové ztráty přepočtené na ztrátovou výšku:

$$H_c = H_v + H_s + H_{vt} = 0,639 + 0,966 + 2,09 = 3,696m \quad (7.10)$$

Obr. 7.2 Ukázka šroubovicového výměníku tepla ^[18]

Jestliže se v průběhu provozu zvyšuje tlaková ztráta a stoupá výstupní teplota kalu či výstupní teplota topné vody, je to známka zanášení kalového kanálu a snižování průtoku kalu. V takovém případě je nutné provést vyčištění kalového kanálu. Výrobce doporučuje provést kontrolu do 1 měsíce od zahájení provozu.

7.1.3 Zhodnocení výsledků pro výpočet tlakových ztrát:

Pro stanovené mezofilní (35-40°C) a termofilní (55-60°C) teploty a teplotu 20°C byly vypočteny tlakové ztráty v potrubí. Provedením výpočtů při různých teplotách bylo zjištěno, že hodnoty tlakových ztrát kalu v potrubí na se téměř neliší. Výraznější změna tlakových ztrát je způsobena změnou charakteru proudění kalu z laminární do přechodové oblasti proudění. Pro technické využití se tato oblast $Re <2000;3000>$ nedoporučuje používat z důvodů nestability. ^[1].

Zvyšující se ztráty nejvíce ovlivňuje rychlost proudění kapaliny a také viskozity. V tab. 7.2 je přechodová oblast proudění kalu označena ve žluté barvě. Stejný výpočet tlakových ztrát byl proveden také pro vodu při 20°C a pravou část cirkulační větve. Charakter takových ztrát kalu ve srovnání s vodou je velmi podobný. Odchylna nastává po překročení průtoku 25 l/s a zvětšuje se. Jako nejvyšší faktor zvyšující tlakové ztráty v cirkulační větvi je výměník tepla. Z doporučení od výrobce a samotné dokumentace výměníku by neměla rychlost proudění kalu v potrubí klesnout pod 1 m/s, což odpovídá přibližnému průtoku 19 l/s a ztráty ve výměníku by se měly pohybovat kolem 25kPa^[18].

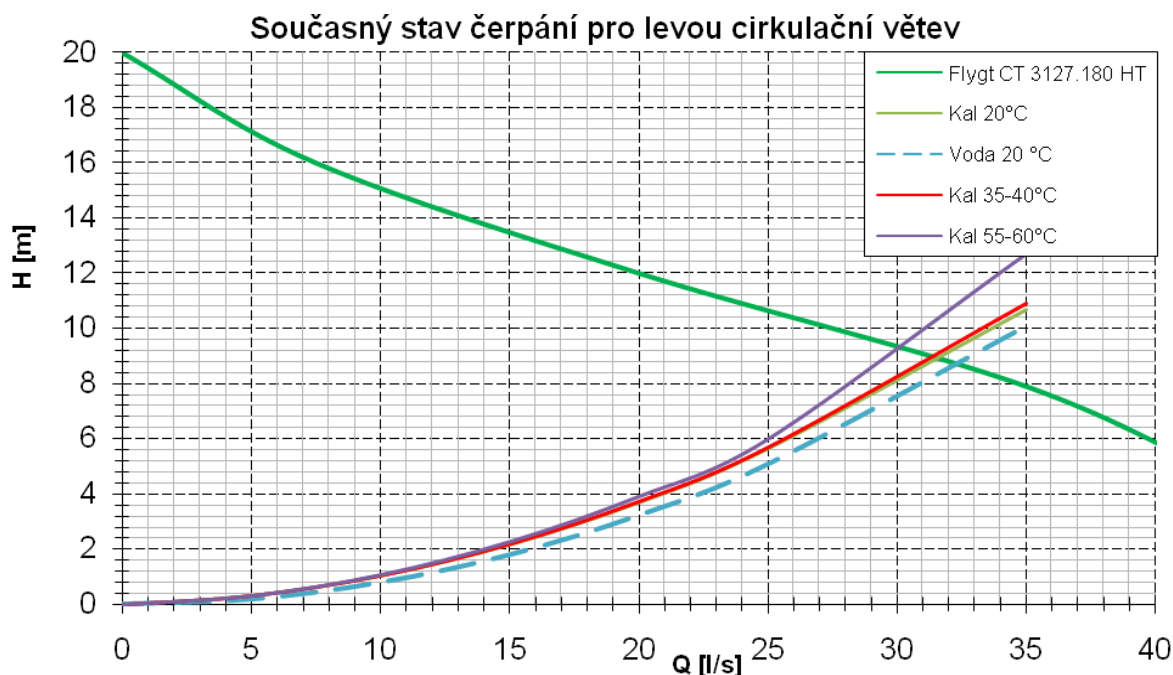
8 NÁVRH NOVÉHO OSAZENÍ KALOVÉ KONCOVKY ČERPADLY

8.1 Současný stav

Zjištění vypočtených hodnot tlakových ztrát může být použito pro stanovení závislosti pracovního bodu čerpadla a následné informace o současném stavu cirkulačních větví. Z poskytnuté dokumentace byly zjištěny technické parametry stávajících čerpadel. Provoz cirkulační větve je kontinuální (výjimkou jsou odstávky, údržba či havarijní stav).

Tab. 8.1 Parametry současných čerpadel

Technické parametry stávajících čerpadel							
Počet ks.	Označení typu čerpadla	Možnost použití	Max. teplota čerpání [°C]	Průtok [l/s]	Výtlačná výška [m]	Otáčky [ot/min]	Výkon [kW]
2	Flygt CT 3127.180 HT	Mokrý/Suchá jímka	40	20	12	1450	4,7



Obr. 8.1 Závislost tlakových ztrát a křivky současného čerpadla Flygt

8.1.1 Zhodnocení současného stavu

Z obr. č. 8.1 můžeme zjistit z vynesené křivky tlakových ztrát a doplněné charakteristiky čerpadla provozní bod pro současně používaná čerpadla. Dle provedených výpočtů a určeného provozního bodu současná čerpadla pracují za neoptimálních parametrů. Průtok kalu se pohybuje kolem 31 l/s tomu odpovídá rychlost proudění 1,75 m/s a ztrátová výška se nachází na hranici 9 m. Čerpadlo musí překonávat vzhledem k vysokému průtoku velké tlakové ztráty způsobené velkou rychlostí proudění kalu. Z toho lze usoudit, že čerpadla jsou předimenzovaná.

8.2 Volba a nový návrh čerpadel

Z měření vzorků kalů můžeme předpokládat hodnoty sušiny pohybující se od 3,5 od max. 5 hm. %. Uvažované použití čerpadla bude pro suchou jímku. Rychlost proudění by měla být vyšší jak 1m/s. Zohlednit také přečerpané množství kalu vzhledem objemu vyhnívací nádrže ($V = 2163\text{m}^3$).

Z teoretického přehledu čerpadel v podkapitole 5. se nabízí dvě možnosti pro čerpání vyhnílého kalu:

- Vřetenová čerpadla
- Odstředivá čerpadla

Vřetenová čerpadla: Jsou používána pro dopravu přebytečného kalu do vyhnívacích nádrží, nebo pro dopravu kalu z vyhnívací nádrže do usazovacích nádrží. Používají se pro kaly s vyšším obsahem sušiny (6% a výše). Cena vřetenového čerpadla je ve srovnání s odstředivými čerpadly vysoká. Výměna vřetena při náhlém poškození je také velmi nákladná.

Odstředivá čerpadla: Používají se pro menší obsah sušiny cca do 6 hm. % v kalu a mohou být použita i pro cirkulace kalu ve vyhnívací nádrži, kde čerpadla pokrývají pouze ztráty v potrubí a výměníku tepla. Ve srovnání s vřetenovými čerpadly jsou levnější. Případná výměna oběžného kola je spojená s malými náklady.

8.2.1 Volba druhu čerpadla a jeho parametrů:

Z výše uvedených výhod porovnání uvažovaných čerpadel bylo vybráno odstředivé čerpadlo. Pro nový návrh čerpadel byla vytvořena poptávka vycházející z předpokladů výpočtu. Dle výpočtu by optimální varianta zvoleného čerpadla byla vztažena k oblasti provozního bodu čerpadla odpovídající průtoku v rozmezí 20-25 l/s a překonání výtlačné výšky 4,5-6m. Předpokládaná rychlost proudění by měla být v rozmezí 1,1-1,4 m/s. Při průtoku 25l/s by čerpadlo přečerpalo za den maximální uvažované množství kalu ve vyhnívací nádrži. Objem pro maximální množství kalu vyhnívací nádrže dle dokumentace odpovídá 2160m^3 .

8.2.2 Nové návrhy čerpadel:

Po oslovení několika dodavatelů zaměřených na čerpání kalů byly vybrány dvě možné varianty:

1. Varianta:

Čerpadlo od společnosti Hidrostral Bohemia se šroubovým odstředivým kolem do suché jímký v blokovém provedení kompletní s elektromotorem 400V/50Hz se zabudovanou tepelnou ochranou statoru (formou bimetalů). Čerpadlo je určeno k čerpání viskózních kapalin a kalů. Čerpadlo je uloženo v horizontální poloze na rámu. Rám je součástí dodávky.

Parametry nového čerpadla od společnosti Hidrostral Bohemia :

Typ: C080-L03R+CDM1X-G132S2

Čerpaná výška H: cca. 5.75 m

Čerpané množství: cca. 24,5 l/s

Čerpané médium: vyhnílý kal, sušina 4-5%

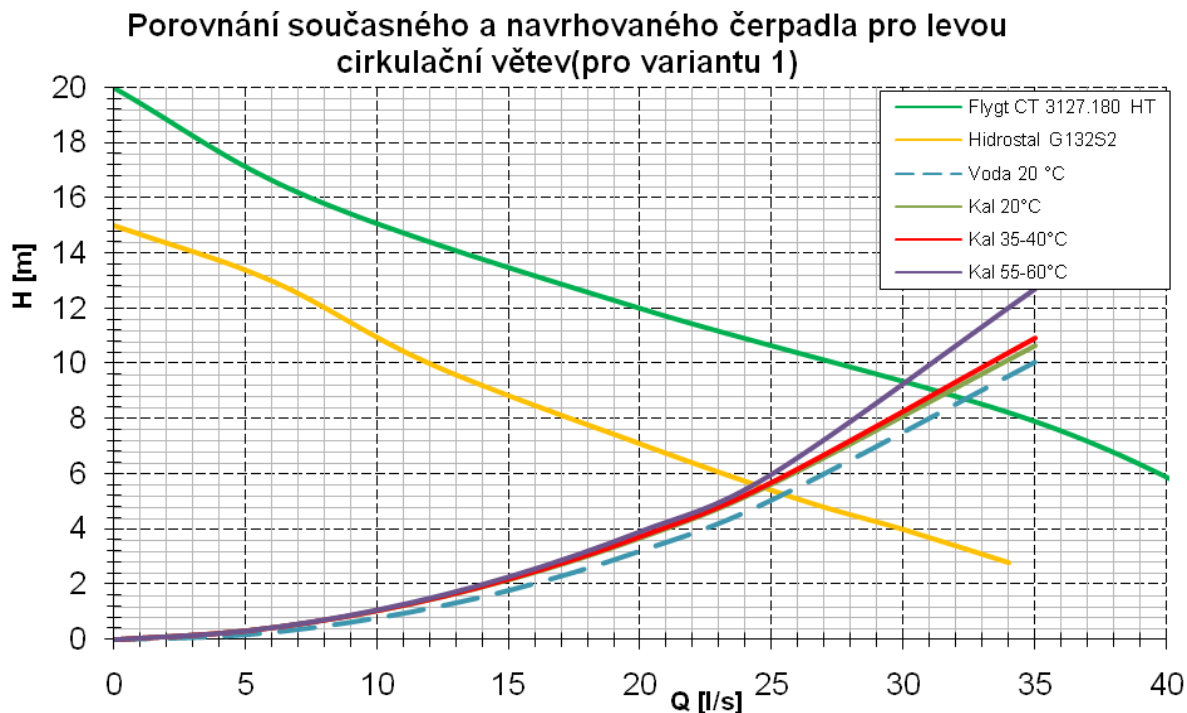
Příkon v pracovním bodě: 1,92 kW

Sací hrdlo: DN 100

Výtlačné hrdlo: DN 80

Hmotnost: cca. 120 kg (včetně elektromotoru a rámu)

Celková cena: 114 000 Kč



Obr. 8.2 Srovnání současného a navrhovaného čerpadla od společnosti Hidrostral G132S2

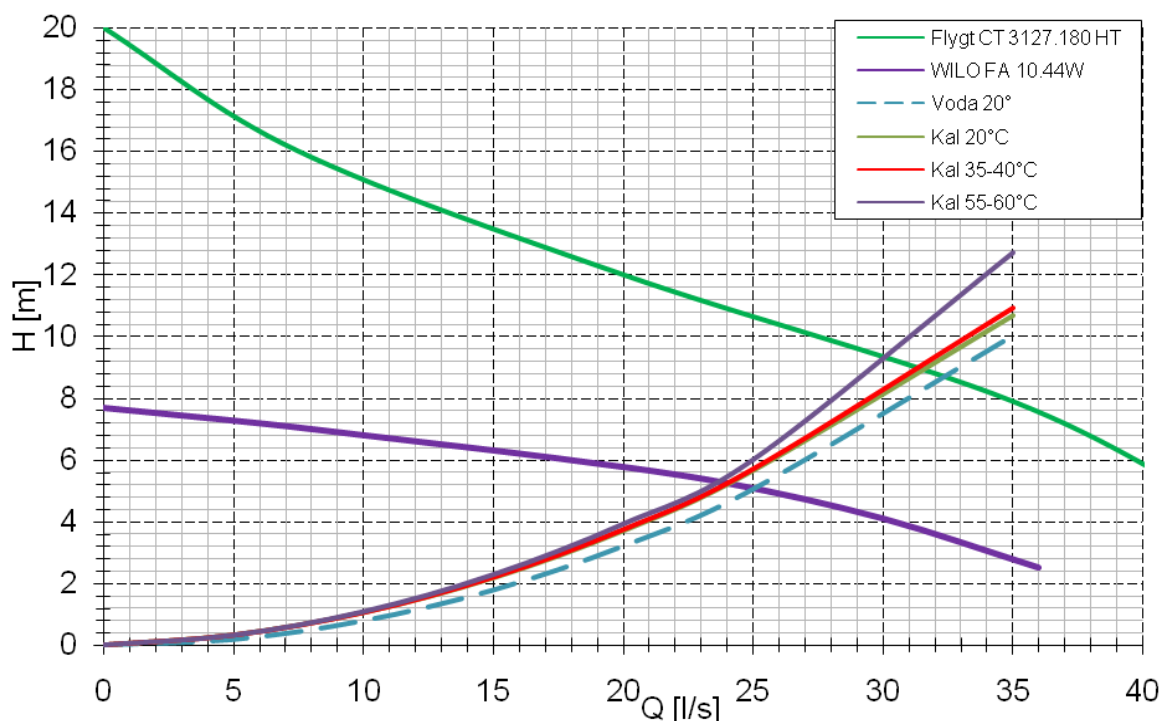
2. Varianta:

Čerpadlo od společnosti WILO Praha s vířivým kolem do suché, nebo mokré jímky s elektromotorem 400V/50Hz se zabudovanou tepelnou ochranou statoru (formou bimetalů).

Parametry nového čerpadla od společnosti WILO Praha :

Čerpadlo typ: FA 10.44W
 Dopravní výška: 5.2 m
 Čerpané množství: 23,8 l/s
 Čerpané médium: vyhnilý kal, sušina kolem 4%
 Příkon v pracovním bodě: 2,35 kW
 Účinnost: 49,5 %
 Sací hrdlo: DN 100
 Výtlačné hrdlo: DN100
 max. teplota čerpané kapaliny: 60 °C
 Hmotnost: cca. 173 kg (včetně elektromotoru a rámu)
 Celková cena: 138 000 Kč

Porovnání současného a navrhovaného čerpadla pro levou cirkulační větev (pro variantu 2)



Obr. 8.3 Srovnání současného a navrženého čerpadla od společnosti WILO

8.3 Srovnání energetické náročnosti čerpání a možné úspory

Tab. 8.2 Srovnání hodnot provozních bodů u čerpadel z hlediska příkonu P

Výkon čerpadla Flygt CT 3127.180 HT						
Teplota [°C]	Q [m ³ /s]	g [m/s ²]	h [m]	ρ[kg/m ³]	η [%]	P [kW]
20	0,031	9,81	9	936,6	62	4,21
35-40	0,031	9,81	9	893,5	62	4,02
55-60	0,031	9,81	9	818,7	62	3,68
Výkon čerpadla Hidrostral G132S2						
20	0,0242	9,81	5,75	936,6	60	2,17
35-40	0,0242	9,81	5,75	893,5	60	2,07
55-60	0,0242	9,81	5,75	818,7	60	1,90
Výkon čerpadla WILO FA 10.44W						
20	0,0238	9,81	5,2	936,6	49,5	2,34
35-40	0,0238	9,81	5,2	893,5	49,5	2,23
55-60	0,0238	9,81	5,2	818,7	49,5	2,05

Z hodnot příkonů vidíme, že vhodně zvolené čerpadlo může ovlivnit příkon až z 50 % při mezofilních teplotách a téměř identické výsledky příkonu jsou i pro uvažovanou změnu technologie vyhnívání pro termofilní teploty.

Tab. 8.3 Srovnání uspořené energie při použití nových čerpadel

Uvažovaná cena za kWh [3,5 Kč]	
Hidrostral G132S2	WILO FA 10.44W
Uspořená energie [kW]	
1,79	1,64
za den	
42,85	39,29
150 Kč	138 Kč
za rok*	
52 492 Kč	48 135 Kč

Legenda: * Pro úspory za rok bylo uvažováno 350 dní, z důvodů uvažovaných odstavků čištění výměníku tepla a provedení údržby.

Čerpadla používaná v současné době pro cirkulaci kalu jsou silně předimenzovaná. Dle výpočtů a charakteristik na obr. 8.2 a 3 by bylo možné zvolit lepší řešení. Změna technologie vyhnívání z mezofilních teplot na termofilní se neprojeví na tlakových ztrátách. Stávající čerpadla pro uvažovanou změnu technologie vyhnívání na teploty kolem 55°C limituje právě oblast teplotního použití. V technických parametrech se uvádí oblast použití čerpadel Flygt do 40°C. Nová volba čerpadel by znamenala investici 240 000 Kč (pro provozní a záložní čerpadlo). Čerpadla by však pracovala s polovičním výkonem kolem 2 kW. Roční provoz nového čerpadla by znamenal úsporu na energii přibližně 50 000 Kč. Doba návratnosti investic pro nákup čerpadel by představovala přibližně 5 let, pouze při uvažované uspořené energii. Další pozitiva by představovala samotná změna teplot vyhnívání. Vyhnívání kalu při uvažovaných teplotách kolem 55°C by přineslo lepší výtěžnost bioplynu a tím i metanu pro výrobu elektrické energie.

ZÁVĚR

Pro experimentální stanovení teplotní závislosti hustoty a viskozity kalů byla provedena měření poskytnutých vzorků a následné shrnutí a záznam výsledků. Z provedených měření hustoty pyknometrickou metodou všech kalů byl zjištěn výrazný pokles hustoty se zvyšující se teplotou. Z grafu pro zhodnocení průměrných hodnot hustoty kalu (obr. 6.3). Při teplotě 5°C a 60 °C byly stanoveny průměrné hodnoty hustoty pohybující se od 990 do 811 kg/m³. Tento rozdíl je velmi výrazný. Výrazný rozdíl hodnot hustoty kalů je způsoben odlišným množstvím hmotnostních % sušiny a časovým intervalem odběru vzorků. Hodnoty hustoty kalu jsou výrazně odlišné ve srovnání s hustotou vody. Měřený kal je totožný svými závislostmi pseudoplastické řidnoucí kapalině a jedná se tedy o neneutonskou kapalinu. Měření viskozity potvrdilo chování kalu jako řidnoucí kapaliny. Hodnoty viskozity byly pro početní část zvoleny a jejich rozptyl byl od 0,12 do 0,1 Pa.s. Zjištěná viskozita kalu je mnohonásobně (řádově) vyšší než u viskozity vody.

Návrh uspořádání kalové koncovky čerpadly byl řešen výpočty, do kterých byly zahrnuty hodnoty hustoty a viskozity kalu stanovené měřením. Dle poskytnuté výkresové dokumentace byla stanovena délka potrubí a charakter místních odporů pro výpočet tlakové ztráty v potrubí při uvažovaných teplotách 20°C a intervalech 35-40 °C a 55-60 °C.

Teplota 20 °C byla zvolena pro uvažování najetí do provozu po odstávce, či údržbě. První interval teplot 35-40 °C definoval současný stav ČOV při uvažovaném mezofilním vyhnívání. Druhý interval teplot 55-60 °C byl uvažován pro možnou budoucí modifikaci ČOV (pro oblast termofilního vyhnívání) pro lepší dosažení výtěžnosti bioplynu při procesu vyhnívání.

Z přehledu výsledků tlakových ztrát pro cirkulační větve (levou i pravou) bylo zjištěno, že ztráty mezi uvažovaným mezofilním a termofilním vyhníváním jsou velmi podobné do průtoku 25 l/s, od této hodnoty průtoku díky změně charakteru proudění u termofilních teplot vzrůstá tlaková ztráta. Hodnoty tlakových ztrát pro kal a pro vodu jsou se u jednotlivých průtoku liší přibližně o 0,5 kPa. Z uvedených grafů lze usoudit, že odlišné hodnoty hustoty a viskozity kalu, které byly naměřeny a použity pro výpočty, nemají výrazný vliv na charakteristiku tlakových ztrát v potrubí pokud proudění kalu má proudí laminární charakter.

Návrh nového osazení kalové koncovky čerpadly vycházel z předchozích cílů práce. Jako první krok bylo provedeno zhodnocení současného stavu navržených čerpadel. Výsledkem bylo zjištění předimenzovaného návrhu čerpadel. Čerpadla dle výpočtů dopravovala kal ve vysokých rychlostech, to se projevilo na velké hodnotě tlakových ztrát a také ve velké spotřebě energie. Pro uvažovanou změnu technologie vyhnívání na teploty kolem 55°C stávající čerpadla limituje právě oblast teplotního použití. V technických parametrech se uvádí oblast použití čerpadel Flygt do 40°C.

Jako nové řešení, které uvažovalo i změnu zvýšených teplot kalu pro termofilní vyhnívání, byly vybrány a doporučeny možnosti volby čerpadel.

Nová čerpadla byla vybrána pro splnění technických požadavků určených z výpočtu tlakových ztrát. Součástí práce je porovnání současných a navrhovaných čerpadel a jednoduché informace o možné návratnosti investic do koupě nových čerpadel (viz kap. 8.2). Jako optimální variantu z hlediska ceny, návratnosti investic, a lepšího průtoku při uvažovaných tlakových ztrátách v potrubí, bych volil čerpadlo od společnosti Hidrostral Bohemia. Dle určených parametru by za den čerpadlo přečerpalo přibližně celý objem vyhnívací nádrže. Nabídky čerpadel jsou součástí práce jako přílohy. Pro vhodnost použití svědčí i úspora energie v tab. 8.3. Při zvýšení teploty na hranici nad 50 °C by se urychlili reakce pro vyhnívání kalu, zvýšila by se výtěžnost bioplynu a tím i následná výroba energie a tepla v kogenerační jednotce. Provoz by vyžadoval větší dodávky tepla a proces vyhnívání by měl být ustálený z hlediska teploty (viz tab. 2.3). Změna technologie by ještě zvýšila důležitost tepelného výměníku pro ohřev a cirkulaci kalu. Nebezpečí představuje zanášení tepelného výměníku. Zanášení by způsobilo změnu průtoku kalu a tím i jeho ohřev.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MEDEK, J.: *Hydraulické pochody*, Akademické nakladatelství CERN, s. r. o. Brno, 2007
- [2] PYTL, V. a kol.: *Příručka provozovatele čistírny odpadních vod*. 1. vyd. Praha: Medium, spol. s. r. o., 2004. s. 34-38. ISBN 80-239-2528-8.
- [3] Kalové hospodářství čistíren odpadních vod, [online]. Praha: VŠCHT Praha. Zveřejněno dne: 2.10.2007. Dostupné z www: <http://web.vscht.cz/starad/COV_Skripta_Kal_hosp.doc>
- [4] MAZEL, L., POKORNÝ, M. *Vodárny a čistírny*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1992. 149 s. ISBN 80-214-0473-6.
- [5] *Zpracování kalu – multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalu*. Dostupné z WWW: <<http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy2005/Bara/postupy.html>>
- [6] DOHÁNYOS, M. a kol.: *Anaerobní čistírenské technologie*. 1. vyd. Brno: NOEL 2000, 1998. 341 s. ISBN 80-86020-19-3.
- [7] DOHÁNYOS, M. *Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů*. Biom.cz [online]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>>.
- [8] ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, J. *Vločky aktivovaného kalu*. Encyklopedie hydrobiologie: výkladový slovník [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2007. Dostupné z WWW: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-006/ebook.html?p=V007>.
- [9] HOUDKOVÁ, L.: *Efektivní využití čistírenských kalů*. Disertační práce. Brno, 2009. 106 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [10] MEDEK, J.: *Mechanické pochody, třetí přepracované vydání*, PC-DIR Real, s.r.o. Brno, 1998. ISBN 80-214-1264-X
- [11] JANALÍK, J., ŠTÁVA P.: *MECHANIKA TEKUTIN*, VŠB-TU Ostrava [online]. 123 s. Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>
- [12] JANALÍK, J.: *Vybrané kapitoly z mechaniky tekutin*, VŠB-TU Ostrava, 2008. [Online]. 179 s. Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>
- [13] *APLIKOVANÁ HYDROBIOLOGIE: ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD* [online]. 11-3-2008. Dostupné z WWW: <http://ekologie.upol.cz/ku/ahdo/Cistení_odpadnich_vod.pdf>.
- [14] PLOTĚNÝ K. *AEROBNÍ TERMOFILNÍ STABILIZACE KALŮ* [Online]. 3 s. Dostupné z WWW: <<http://www.asio.cz/images/jaro200519.pdf>>
- [15] ELSÄSSER, T., HOUDKOVÁ, L., BORÁŇ, J., SPONAR, J., STEHLIK, P.: *Thermal dependences of physical aspects of sewage sludge*. Process Engineering Publisher, článek ve sborníku akce: 17th International Congress of Chemical and Process Engineering. CD-ROM of Full Texts. Praha ,2006. pp.P5.66-7. ISBN 80-86059-45-6.
- [16] MEDEK, J.: *Experimentální práce*. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1993, 180 s. ISBN 80-214-0552-X
- [17] HELAGO, *Pyknometr podle Gay – Lussaca*, [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.helago-cz.cz/product/pyknometr-podle-gay-lussaca-25-ml-dle-iso-3507-din-12-801/>>
- [18] KH-KINETIC, *Výpočet výměníku* [online]. Dostupné z WWW: < <http://www.kh-kinetic.cz/home/Test/vypocet-vymen.html>
- [19] *DIRECT INDUSTRIAL Catalog Search, ITT Water & Wastewater*. [online]. 8 s. Dostupné z WWW: <http://pdf.directindustry.com/pdf/itt-water-wastewater/n-pumps-3085-3102-3127/5698-129858-_2.html>
- [20] *Informační web pro žáky SOŠ a SOU Podbořany* [online]. 9s. Dostupné z WWW: <http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-str-08.02_cerpadlaobjemova.pdf>

[21] Cole-Parmer Technical Library-Piston Pumps,[online].202 s.

Dostupné z WWW:

<<http://www.coleparmer.in/techinfo/techinfo.asp?htmlfile=meteringpumps.htm&ID=409>>

[22] JANALÍK J.: Potrubní hydraulická a pneumatická doprava - Rozšířené a upravené vydání, VŠB-TU Ostrava, 2010. [online]. 202 s. Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>

[23] Typical sedimentation tanks.[online].

Dostupné z WWW:

<http://open.jorum.ac.uk/xmlui/bitstream/handle/123456789/1015/Items/T210_1_section24.html>

[24] Flowservice: Varisco - vřetenová čerpadla (excentrická šneková čerpadla, Mono pumpy) [online].

Dostupné z WWW:<<http://www.flowservice.cz/produkty/varisco-vretenova-cerpadla-mono-pumpy>>

[25]DRÁBKOVÁ, S.: Doprava kapalin, VŠB-TU Ostrava, 2010. [Online]

Dostupné z WWW: <http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>

[26] Portál Wikipedie. Zubové čerpadlo.[online].

Dostupné z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Zubov%C3%A9_%C4%8Derpadlo

[27] Ústav procesní a zpracovatelské techniky. ČVUT Praha. [online].

Dostupné z WWW:

<<http://www.fsid.cvut.cz/cz/U218/peoples/hoffman/PREDMETY/COVP/COV/COV%20Troja/covtroja1.htm>>

[28] Hydraulika potrubí. ČVUT Praha. [online].

Dostupné z WWW:

<http://hydraulika.fsv.cvut.cz/users/matousek/downloads/web_HYA_04_Potrubí_vm.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Význam	Jednotka
dc/dy	Smyková rychlost	$[m.s^{-1}]$
η	Dynamická viskozita	$[Pa.s]$
ρ	Hustota	$[kg.m^{-3}]$
λ	Ztrátový součinitel	$[-]$
ξ	Součinitel tření	$[-]$
k	Relativní drsnost stěny	$[N]$
T	Teplota	$[^{\circ}C]$
g	Gravitační zrychlení	$[m.s^{-2}]$
h	Výška sloupce kapaliny	$[m]$
L	Celková délka	$[m]$
M_k	Kroutící moment	$[N.m]$
ω	Úhlová rychlost	$[rad.s^{-1}]$
Q	Průtok	$[l/s, m^3/s]$
d	průměr	$[m]$
t	Čas	$[s]$
V	Objem	$[m^3]$
x_v	Objemová koncentrace	$[%]$
p_{ξ}	Místní tlaková ztráta	$[Pa]$
k	Absolutní drsnost stěny	$[m]$
t	Tečné napětí	$[Pa, N.m^{-2}]$
ν	Kinematická viskozita	$[m^2.s]$
le	Ekvivalentní délka	$[m]$
Ar	Archimédovo kritérium	$[-]$
δ	Sfericita	$[-]$
$Re (Rep)$	Reynoldsovo číslo	$[-]$
M_t	Hustota spojitě fáze	$[kg.m^{-3}]$
M_k	Hustota kapalné fáze	$[kg.m^{-3}]$
l_v, l_s	Délka potrubí pro výtlač, sání	$[-]$
p_s, p_v	Tlaková ztráta pro výtlač, sání	$[Pa]$
η	Účinnost	$[%]$
ČOV	Čistírna odpadních vod	$[-]$
ω	Úhlová rychlost	$[rad.s^{-1}]$
τ	Smykové napětí	$[Pa]$
$\% \text{ sušiny}$	Hmotnostní obsah sušiny	$[\% \text{ hm.}]$

SEZNAM OBRÁZKŮ:

- Obr. 1.1 Obecné schéma čistírny odpadních vod
Obr. 2.1 Kruhová usazovací nádrž
Obr. 2.4 Schéma vzniku vločky aktivovaného kalu
Obr. 3.1 Schéma pohybu částic v potrubí
Obr. 3.2 Moodyho diagram vyjadřující závislost $\lambda = f(Re, \varepsilon/d)$
Obr. 3.3 Závislost tlakového spádu na velikosti částic
Obr. 3.4 Závislost odporového součinitele ξ na sféricitě σ a Re_p
Obr. 4.1 Rotační viskozimetr
Obr. 4.2 Reogramy
Obr. 4.3 Názorný obrázek pyknometru
Obr. 5.1 Čerpání pístovým čerpadlem
Obr. 5.2 Princip membránového čerpadla
Obr. 5.3 Kroky čerpání kapaliny u zubového čerpadla
Obr. 5.4 Řez vřetenovým čerpadlem
Obr. 5.5 Šneková čerpadla na vstupu do ČOV
Obr. 5.6 Provedení lopatek podle směru proudění
Obr. 5.7 Provedení lopatek podle směru proudění
Obr. 5.8 Provedení s mokrou jímkou a vertikální horizontální provedení suché jímky
Obr. 5.8 Určení pracovního bodu čerpadla
Obr. 6.1 Vodní lázeň s ohřívacem a pyknometry
Obr. 6.2 Výsledky měření hustoty kalu z 16.3.2011 (viz. protokol o měření)
Obr. 6.3 Naměřené hodnoty hustoty pro různé hmotnostní % sušiny v kalu
Obr. 6.4 Střední hodnoty hustoty ze všech měřených vzorků
Obr. 6.5 Rotační viskozimetr s jednotkou pro ohřev/chlazení kapaliny
Obr. 6.6 Přehled hodnot zdánlivé viskozity na smykové rychlosti
Obr. 6.7 Závislost zdánlivé viskozity na smykové rychlosti při teplotách (35-60 °C)
Obr. 6.8 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti při teplotách (10-60 °C)
Obr. 7.1 Závislost charakteristik tlakových ztrát na teplotě pro levou cirkulační větev
Obr. 7.2 Ukázka šroubovicového výměníku tepla
Obr. 6.4 Závislost smykového napětí na smykové rychlosti při teplotách (10-60 °C)
Obr. 8.1 Závislost tlakových ztrát a křivky současného čerpadla Flygt
Obr. 8.2 Srovnání současného a navrženého čerpadla od společnosti Hidrostat
Obr. 8.3 Srovnání současného a navrženého čerpadla od společnosti WILO

SEZNAM TABULEK:

- Tab. 2.3 Stručné zhodnocení mezofilní a termofilní stabilizace kalu
Tab. 3.1 Rozdělení skupin dle velikosti dispergovaných
Tab. 3.2 Přehled rovnic pro výpočet pádové rychlosti kulové částice
Tab. 6.1 Průměrné hodnoty dynamické viskozity kalu ve dvou intervalech
Tab. 6.2 Přehled hodnot zdánlivé viskozity závislé na smykové rychlosti
Tab. 7.1 Přehled stanovených místních odporů
Tab. 7.2 Uvažované tlakové ztráty výměníku tepla v metrech (typ TVVK12)
Tab. 7.3 Přehled výpočtů ztrátové výšky při různých teplotách
Tab. 8.1 Parametry současných čerpadel
Tab. 8.1 Srovnání hodnot provozních bodů u čerpadel z hlediska příkonu
Tab. 8.2 Srovnání uspořené výkonu při použití nových čerpadel
Tab. 8.3 Srovnání uspořené energie při použití nových čerpadel

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Protokoly o měření hustoty a viskozity kalu

Příloha 2 Schéma potrubí pro cirkulaci kalu

Příloha 3 Přehled výpočtů tlakových ztrát pro kal a vodu

Příloha 4 Parametry nových čerpadel a tepelného výměníku

Příloha 5 Charakteristiky nových čerpadel a tlakových ztrát pro pravou cirkulační větev

CD – Diplomová práce ve formátu „pdf“