VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

VLIV TERMICKÉ DEZINTEGRACE KALU NA JEHO DALŠÍ ZPRACOVÁNÍ

DEPENDENCE OF SLUDGE THERMAL PRE-TREATMENT ON ITS DEWATERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — BC. ZDENĚK ŽERAVA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — ING. JAROSLAV BORÁŇ, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2010

Zadaní

ABSTRAKT

První část diplomové práce je věnována problematice produkce kalů, přehledně hodnotí nakládání s kaly z čistíren odpadních vod. Jsou zde uvedeny faktory ovlivňující výběr způsobů nakládání s kaly a porovnání nakládání s kaly v ČR a v ostatních zemích EU. Dále je popsána kompletní čistírenská linka a nastíněn popis zpracování kalu z oblasti kalového hospodářství. Podrobně je zpracována dezintegrace kalu a popsány nejúčinnější způsoby dezintegrace.

Druhá část popisuje experimentální část dezintegrace čistírenských kalů. Experiment byl proveden ve školní laboratoři způsobem termické dezintegrace v dvouplášťové tlakové nádobě. Dezintegrace byla prováděna za teploty 60, 90, 120, 150 a 180 °C. Byla sledována závislost obsahu sušiny na teplotě dezintegrace a obsah nerozpuštěných látek ve fugátu. Podle zpracovaných výsledků je možné zvolit optimální teplotu dezintegrace.

KLÍČOVÁ SLOVA

čistírna odpadních vod, nakládání s kaly, dezintegrace, obsah sušiny, filtrace, centrifuga, nerozpuštěné látky, fugát

ABSTRACT

The first part of the thesis is focused on the problems related to sludge and evaluates sludge disposal from waste treatment plants. The thesis mentions factors influencing method selection of sludge disposal as well as it compares sludge disposal in the Czech Republic and in the other states of the EU. It describes a complete waste treatment line and sludge disposal in the area of sludge treatment and disposal. It deals with sludge disintegration and describes the most effective methods of disintegration.

The second part of the thesis describes an experimental part of disintegration of waste treatment sludge. An experiment was conducted in the school laboratory in a way of thermal disintegration in the double-surface pressure tank. The disintegration was conducted to temperatures of 60 °C, 90 °C, 120 °C, 150 °C, and 180 °C. We monitored dependence of the sludge dry residue content on disintegration temperature as well as content of suspended solids in liquid fraction. It was possible to choose optimal temperature of disintegration in accordance with processed results.

KEYWORDS

Waste treatment plant, sludge disposal, disintegration, sludge dry residue content, filtration, suspended solids, liquid fraction.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Žerava, Z.: *Vliv termické dezintegrace kalu na jeho další zpracování.* Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2010. 76 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Boráň, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval.

……

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jaroslavu Boráňovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Thomasu Elsäßerovi za odborné vedení a podporu při vypracování této diplomové práce.

Obsah

Seznam obrázků 9
Seznam tabulek 10
Seznam grafů 10
Přehled zkratek a symbolů 11
Seznam zkratek 11

1. Úvod 14
2. Zjednodušený popis ČOV 15
2.1. Mechanické čistění 15
2.1.1 Hlavní nátokový objekt 15
2.1.2 Hrubé předčištění 16
2.1.3 Usazovací nádrže 17
2.2 Biologické čistění 17
2.2.1 Aktivační nádrže 17
2.2.2 Dosazovací nádrže 18
2.3 Kalové a plynové hospodářství 18
2.3.1 Zahušťování kalu 19
2.3.2 Vyhnívací nádrže 19
2.3.3 Uskladňovací nádrž 20
2.3.4 Odvodnění kalu, sušení kalu 20
2.3.5 Hygienizace kalu 23
2.3.6 Plynojemy 23
2.3.7 Kogenerace 24
3. Legislativa nakládání s kaly 25
3.1 Použití kalů v zemědělství 26
3.2 Kompostování kalů 27
3.3 Legislativa v EU 27
4. Způsoby nakládání s kalem 28
4.1 Kompostování 29
4.2 Přímá aplikace do půdy v zemědělství 29
4.3 Rekultivace 30
4.4 Skládkování 30
4.5 Termické zpracování kalů 30
4.6 Alternativní a méně používané způsoby nakládání s kalem 32
4.7 Způsoby nakládání s kalem v zemích EU 32

5. Dezintegrace kalu 34
5.1 Dezintegrace 34
5.2 Metody dezintegrace 35
5.3 Mechanické metody 36
5.4 Fyzikální metody 38
5.5 Chemické metody 39
5.6 Biologické metody 40
5.7 Zhodnocení dezintegrace 40
6. Experimentální část 41
6.1 Základní údaje o zahuštěném nestabilizovaném kalu 42
6.2 Popis měření dezintegrace kalu 43
6.3 Diskuze teploty dezintegrace 47
6.4 Výsledky měření a jejich vyhodnocení 47
6.4.1 Vliv dezintegrace na obsah sušiny 48
6.4.4 Vliv dezintegrace na CST 48
6.4.3 Vliv dezintegrace na odstředitelnost kalu 49
6.4.4 Vliv dezintegrace na obsah NL ve fugátu získaném odstředěním 52
6.4.5 Vliv dezintegrace na obsah sušiny v koláči po filtraci 54
7. Návrh míchání tlakové nádoby 56
7.1 Varianty řešení 57
7.2 Míchací ústrojí 58
7.2.1 Pohon 58
7.2.2 Uložení hřídele 58
7.2.3 Ucpávka 59
7.2.4 Míchadlo 61
7.3 Nádoba 65
7.4 Finální verze míchacího zařízení 67
8. Závěr 68
Použitá literatura 69

Seznam obrázků

Obr. 1 Zjednodušené technologické schéma ČOV 15
Obr. 2 Česle strojně stírané 16
Obr. 3 Aktivační nádrž (ČOV Šumperk) 18
Obr. 4 Dosazovací nádrž (ČOV Modřice) 18
Obr. 5 Materiálová bilance odvodnění 21
Obr. 6 Dekantační odstředivka (ČOV Šumperk) 22
Obr. 7 Plynojemy (ČOV Modřice) 24
Obr. 8 Kompostárna 29
Obr. 9 Rekultivace 30
Obr. 10 Cementárenská pec 31
Obr. 11 Možnosti uplatnění dezintegrace v čistírenském procesu [11] 35
Obr. 12 Kal před dezintegrací: je patrná neporušená struktura buněk [21] 37
Obr. 13 Kal po dezintegraci: struktura vloček velmi otevřená, směs má nyní stejnosměrnou kašovitou soudržnost [19] 37
Obr. 14 Lyzátovací zahušťovací centrifuga – schéma rozrušení 38
Obr. 15 Zařízení pro dezintegraci kalu 41
Obr. 16 Triton Elektronics TYPE 304M CST 42
Obr. 17 Sušící váha KERN 43
Obr. 18 Centrifuga MPW-340 43
Obr. 19 Tlaková nádoba a manometry teploty a tlaku 44
Obr. 20 Filtrace kalu 45
Obr. 21 Nedezintegrovaný (vlevo) a dezintegrovaný (vpravo) ZNK 45
Obr. 22 Filtrace NL u dezintegrovaného kalu a Petriho miska + filtrační papírky 46
Obr. 23 Zjednodušené schéma průběhu měření 47
Obr. 24 Schéma první varianty 57
Obr. 25 Schéma finální varianty 57
Obr. 26 Uložení hřídele 58
Obr. 27 Schéma mechanické ucpávky 60
Obr. 28 Kotvové míchadlo 62
Obr. 29 Znázornění minimálního a maximálního napětí – horní detail 65
Obr. 30 Znázornění minimálního a maximálního napětí – řez tlakové nádoby 66
Obr. 31 Znázornění minimálního a maximálního zatížení – celkový pohled 66

Seznam tabulek

Tab.1 Hodnoty obsahu sušiny dle zvoleného odvodňovacího zařízení [11] 21
Tab.2 Sazba základního poplatku za ukládání kalů Kč/t [17] 23
Tab.3 Ceny zpracování čistírenského kalu 23
Tab.4 Limitní hodnoty koncentrace těžkých kovů v kalech pro přímou aplikaci do zemědělské půdy[7] 26
Tab.5 Mikrobiologická kritéria pro použití kalů na zemědělské půdě [8].....26
Tab.6 Limitní hodnoty koncentrace těžkých kovů v kalech určených pro kompostování[7] 27
Tab.7 Způsoby nakládání s čistírenskými kaly za rok 2004 až 2006 [14].....28
Tab.8 Možnosti dezintegrace kalu [12] 35
Tab.9 Účinnost anaerobní stabilizace kalů dezintegrací [11] 40
Tab.10 Teploty dezintegrace ZNK 47
Tab.11 Obsah sušiny u ZNK před a po dezintegraci 48
Tab.12 Výsledky CST 49

Seznam grafů

Graf. 1 Způsoby nakládání s kalem v ČR za rok 2006 [14] 28
Graf. 2 Způsoby nakládání s kalem ve vybraných zemích EU za rok 2002 [7].....33
Graf. 3 Závislost obsahu sušiny ZNK I na teplotě dezintegrace 51
Graf. 4 Závislost obsahu sušiny ZNK II na teplotě dezintegrace 51
Graf. 5 Závislost obsahu NL ve fugátu ned. kalu na teplotě dezintegrace.....53
Graf. 6 Závislost obsahu NL ve fugátu dez. kalu na teplotě dezintegrace 53
Graf. 7 Závislost obsahu sušiny ve filtračním koláči na teplotě dezintegrace 55

Přehled zkratek a symbolů

Seznam zkratek

ČOV	Čistírna odpadních vod
EO	Ekvivalentní obyvatel
EU	Evropská unie
ČR	Česká republika
ZNK	Zahuštěný nestabilizovaný kal
NL	Nerozpuštěné látky
CST	Odvoditelnost kalu
NED	Nedezintegrovaný kal
DEZ	Dezintegrovaný kal

Seznam symbolů

symbol	význam	jednotka
d	průměr míchadla	mm
D_{hr}	průměr hřídele	mm
D_{MU}	průměr mechanické ucpávky	mm
D_{ZNK}	obsah sušiny v kolači	%
C	základní dynamická únosnost	N
F	síla v ose šroubu	N
F	síla na ložisko	N
F_a	axiální zatížení ložiska	N
F_e	dynamické ekvivalentní zatížení	N
F_{MU}	síla na mechanickou ucpávku	N
F_r	radiální zatížení ložiska	N
i	počet šroubů	-
L_h	základní hodinová trvanlivost	hod
m_{FK}	hmotnost filtrovaného kalu + miska + mokrý filtr	g

$m_{fugátu}$	hmotnost fugátu	kg
m_{KV}	hmotnost kalu po vysušení + miska + filtr	g
m_{M}	hmotnost misky	g
m_{M+F}	hmotnost misky + filtru	g
m_{M+MF}	hmotnost misky + mokrý filtr	g
m_{OK}	hmotnost odstředěného kalu	g
$m_{OK,M}$	hmotnost odstředěného kalu + miska	g
m_{VK}	hmotnost kalu po vysušení	g
$m_{VOK,M}$	hmotnost vysušeného odstředěného kalu + miska	g
m_{VSK}	hmotnost vysušeného odstředěného kalu	g
$m_{zachycených\ částic}$	hmotnost zachycených částic na filtru	mg
n	otáčky míchadla	s^{-1}
n	otáčky ložiska	s^{-1}
n_V	otáčky vypočtené	s^{-1}
NL	obsah NL ve fugátu	mg/l
P	max. výkon míchadla na hřídeli	W
p	maximální tlak v nádobě	MPa
p	mocnitel dle druhu ložiska	-
P_O	příkonové kritérium	-
Re	Reynoldsovo číslo	-
S	plocha hřídele	mm^2
S, As	výpočtový průřez	mm^2
$V_{fugátu}$	objem fugátu	m^3
$V_{NL\ fugátu}$	objem fugátu	l
v	rychlost míchadla	m/s
X, Y	součinitel podle poměru	-
η	dynamická viskozita	Pa/s
ν	kinetická viskozita	m^2/s
ρ	hustota kalu	kg/m^3

ρ_{H_2O}	hustota vody při 18 °C	kg/m^3
σ_k	mez kluzu	MPa
σ_{Dt}	dovolené napětí v tahu	MPa

1. Úvod

V dnešní době se závažným problémem stává otázka likvidace čistírenských kalů. Vzhledem ke členství ČR v EU se tato oblast stává čím dál častěji diskutovanou a tím si říká o co nejrychlejší řešení. Při pohledu na rychlost rozvoje lidské společnosti je jasné, že produkce kalů se bude neustále navyšovat a nebudou stačit metody na nakládání s kaly, které se do dnešních dnů používají. Nesmíme však opomenout, že vývoj dalších metod je do značné míry ovlivňován ekonomickými a legislativními faktory. Naším vstupem do EU došlo k zpřísnění podmínek používání kalů v zemědělství i při jejich skládkování. Zásadní požadavky pro ČR plynou ze směrnice komise EU 91/71/EEC. Na jejímž základě by měly mít obce s více než 2000 ekvivalentních obyvatel (EO) mechanicko - biologickou (dvoustupňovou) čistírnu odpadních vod (ČOV). Tento požadavek měl být splněn do roku 2005. Při podrobnějším pohledu na počty vybudovaných ČOV zjistíme, že počet vybudovaných ČOV na základě směrnice EU do konce roku 2005 je přibližně 180. Směrnice se také zásadně staví proti ukládání kalů na skládkách. Požadavek zní tak, že množství biodegradabilních odpadů (do této skupiny odpadů řadíme i čistírenské kaly) uložených do roku 2010 má odpovídat 75% produkce těchto odpadů v roce 1995. Tímto vzniká prostor pro hledání nových alternativních možností využití čistírenských kalů. Příkladem by nám mohly být zkušenosti ze zahraničí, kde se jako možné ukazuje energetické využití kalů. V podmínkách ČR jsou tyto zkušenosti v dnešní době na velmi nízké úrovni. A to jak v oblasti spaloven čistírenských kalů, tak se spolu-spalováním. To vše poukazuje na důležitost vytvoření adekvátních studií, doplněných provozními zkouškami, které by se staly odrazovým můstkem pro další práci.

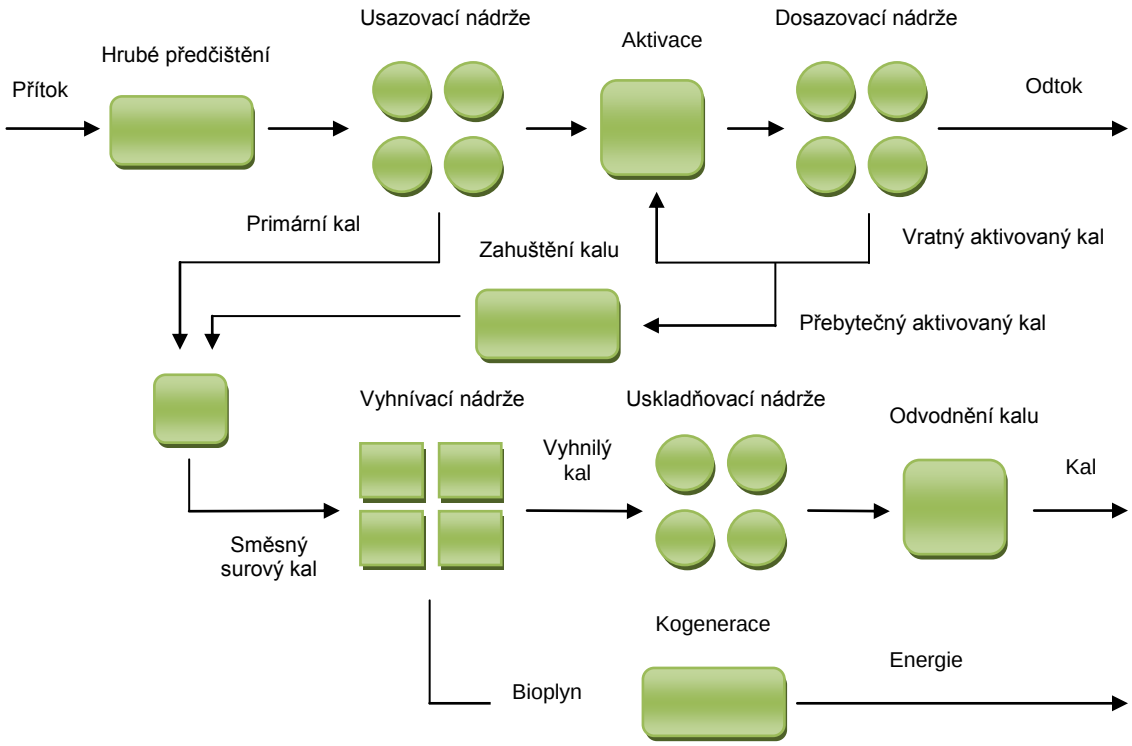
Vzhledem k různým typovým provedením čistíren odpadních vod je nutné individuálně řešit nejvhodnější způsob nakládání s kaly. Úkolem je při minimálních nákladech dodržet požadavky kladené na ochranu životního prostředí a zdraví osob nakládajících s kaly.

Kaly, které mají vhodná chemické složení, lze využít jako náhradu průmyslových a statkových hnojiv. Potom je přijímáme jako alternativní zdroj minerálních a organických látek. Tímto způsobem můžeme vyrovnat půdní deficit těchto látek v půdě. Pro využití čistírenských kalů v zemědělství byla přijata směrnice Rady EU 86/278/EEC o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod, která určuje podmínky pro jejich využití, aplikaci, evidenci a kontrolu.

Legislativní požadavky nutí provozovatele ČOV k nalezení lepších způsobů zpracování kalu. Různé alternativy zpracování kalu představuje kalové hospodářství, kde se nachází široké rozmezí využití nových metod. Zde se požaduje dosažení vysokého obsahu sušiny v kalu, proto jsou hledány nové metody předúpravy kalu. Zde se nabízí metoda dezintegrace kalu, která umožňuje uvolnění buněčného obsahu mikroorganismů obsažených v kalech prostřednictvím narušení jejich buněčných stěn. Nastíněným způsobem lze dosáhnout lepšího odvodnění kalu a dosažení obsahu sušiny v kalu až 40 %.

2. Zjednodušený popis ČOV

Čistírna odpadních vod je soubor zařízení, ve kterém dochází k čištění odpadních vod. Setkáváme se s nimi jednak v blízkosti různých provozů, kde slouží k čištění průmyslových vod a odpadních vod ze zemědělské výroby, dále u měst a obcí, kde čistí vody komunální a smíšené. Čistírny mohou být mnoha typů. Rozdělují se hlavně podle velikosti a typu čistírenského procesu. Nejčastěji používané procesy jsou mechanické, biologické a chemické. Zjednodušené technologické schéma ČOV je znázorněno na obr. 1. Tato kapitola byla zpracována s použitím literatury [1], [12], [14] a [15].



Obr. 1 Zjednodušené technologické schéma ČOV

2.1. Mechanické čistění

Mechanické čištění slouží pro odstranění nerozpuštěných látek, které tvoří podstatnou část znečištění odpadních vod. Mezi mechanické čištění se řadí usazování a zahušťování suspenzí. K usazování dochází při hrubém předčištění odpadních vod, v lapáku písku a v usazovacích, kde současně probíhá i zahuštění suspenzí.

2.1.1 Hlavní nátokový objekt

Odpadní voda přitéká do hlavního nátokového objektu, který se skládá z hlavní stavidlové komory regulující přítok do ČOV a odlehčovací komory s hrubým předčištěním dešťových vod.

Dešťová zdrž je odlehčovací objekt sloužící k zachycení přívalových dešťů a tím zamezí velkému přítoku do ČOV.

2.1.2 Hrubé předčištění

Cílem hrubého předčištění, které je též nazýváno ochrannou částí čistírny, je odstranění velkých plovoucích nebo vodou plavitelných předmětů. Tyto látky by mohly narušovat pracovní procesy vlastního čištění odpadních vod, ale zejména mohou způsobovat poruchy strojního zařízení. Hrubé předčištění se skládá z lapáku štěrku, česlovny a lapáku písku.

Lapák štěrku

V lapáku štěrku dochází k zachycení velkých a těžkých předmětů, které se mohu dostat do ČOV zejména přívalovými dešti a poškodit čistírnu. Lapák štěrku je jímka umístěná před čistírnou. Rozšířením průtočného průměru a snížením dna v lapáku štěrku dojde k zachycení těžkých předmětů, čistírna je tím chráněna od úlomků cihel, štěrku nebo kamenů. Odstranění předmětů se provádí ručně nebo strojně pomocí drapáku.

Česlovna

Česle slouží k odseparování hrubých plovoucích nečistot. Je to mříž, která je tvořena rámem a pruty (česlicemi), skloněnými ve směru toku. Česle mají obvykle obdélníkový, kruhový i trojúhelníkový průřez. Jsou umístěny tak, aby protékající vodě kladly co nejmenší odpor. Podle šířky průlin dělíme česle na hrubé, polohrubé a jemné [1]:

Hrubé česle - šířka průlin 80 - 100 mm.

Polohrubé česle - šířka průlin 10 - 25 mm.

Jemné česle - šířka průlin do 10 mm.

Obr. 2 Česle strojně stírané

Česle jsou obvykle stírány pomocí shrabováků, které svými zuby zasahují do průlin a stírají zachycené nečistoty (shrabky). Stírání může být prováděno ručně nebo strojně.

Lapák písku

Lapák písku je často v kombinaci s lapákem tuků. Jeho úkolem je oddělení minerálních suspenzí od organických nerozpuštěných látek. Lapák písku využívá gravitační síly a rozdílu hustot, průtočná rychlost 0,3 m/s se uplatňuje u většiny lapáků a tím dosáhneme, že se písek usazuje do průměru zrn 0,2 mm [1]. Odstraněním písku se zamezí jeho usazovaní na nežádoucích místech a sníží se abraze případných následujících zařízení. Lapáky jsou většinou pravoúhlé nebo kruhové nádrže, vybaveny zařízením na stírání dna i hladiny.

2.1.3 Usazovací nádrže

V usazovací nádrži probíhá usazování jemných nerozpuštěných látek a stírání plovoucích nečistot z povrchu nádrže. Vzniklý kal se nazývá primární a je energeticky cennou surovinou. Usazovací nádrže jsou nejčastěji, pravoúhlé nebo kruhové s horizontálním nebo vertikálním průtokem [1] a [5].

2.2 Biologické čistění

Podstatou biologického čištění odpadních vod jsou biochemické procesy za působení aerobních mikroorganismů. Mikroorganismy umožňují rozklad organických látek ve vodě oxidačními procesy. Výsledný produkt biologického čištění je oxid uhličitý a voda. Biologický stupeň čištění probíhá v aktivačních nádržích, u dosazovacích nádržích je pak oddělen tzv. aktivovaný kal (zbytky mikroorganismů) od vyčištěné vody.

2.2.1 Aktivační nádrže

Aktivační proces je nejrozšířenější způsob čištění odpadních vod v aerobních podmínkách. Do aktivační nádrže přitéká aktivační směs, která vzniká smísením odpadní vody a vratného aktivovaného kalu. Aktivovaný kal je tvořen mikroorganismy a nižšími organismy. Aktivace se skládá z nitrifikace, denitrifikace a regenerace.

V aktivační nádrži se nachází mikroorganismy, pomocí kterých dochází k odstranění organických látek. Organismy potřebují k životu kyslík, a proto musí být aktivační nádrž dobře provzdušňována. Směs vyčištěné vody a aktivovaného kalu je čerpána z aktivační nádrže do dosazovací nádrže. Aktivační nádrž je na obr. 3.

Obr. 3 Aktivační nádrž (ČOV Šumperk)

2.2.2 Dosazovací nádrže

V dosazovací nádrži je separován aktivovaný kal od vyčištěné vody. Cílem procesu je dosažení dobře vyčištěného a stabilizovaného odtoku z čistírny. Separace aktivovaného kalu je poslední stupeň biologického čištění. Usazený kal se dělí na vratný (který se čerpá zpět do aktivace) a přebytečný odcházející na zahuštění. Dosazovací nádrž je zobrazena na obr. 4.

Obr. 4 Dosazovací nádrž (ČOV Modřice)

2.3 Kalové a plynové hospodářství

Soubor kalového a plynového hospodářství obsahuje procesy, které jsou zaměřeny na zpracování primárního kalu z usazovacích nádrží mechanického stupně a přebytečného biologického kalu. Tyto procesy je možné rozdělit na mechanické, biologické a na proces zpracování vzniklého bioplynu. Mezi mechanické procesy patří operace zahušťování, odvodňování a odvoz kalu. Biologické se týkají anaerobní, popř. aerobní stabilizace.

2.3.1 Zahušťování kalu

Zahušťování kalu má své opodstatnění v tom, že eliminuje investiční a provozní náklady na následné soubory zpracovávající kal. Zahušťování se dělí na gravitační a strojní.

Gravitační zahušťování kalu

Gravitační zahuštění se provádí v kalových prohlubních usazovacích nádrží. Gravitační zahuštění kalu je jednou z provozních operací, kterou může ovlivnit sám provozovatel. K dosažení optimálních výsledků se nedoporučuje automatizace obsluhy, ale zásahy konkrétní osoby obsluhy. Hodnoty zahuštění se považují za podprůměrné při obsahu sušiny méně než 3,5 %, průměrné při 3,5 - 4,5 % sušiny a nadprůměrné při obsahu sušiny nad 4,5 % [1].

Strojní zahušťování kalu

Strojní zahuštění se obvykle používá pro čistírny od velikosti cca 2 000 - 3 000 EO. Vhodné je zejména před anaerobním uskladněním kalu. Gravitačně zahuštěný kal se následně zahušťuje na strojním zařízením za pomocí přídavku flokulantu. To se provádí na jednoduchých a provozně nenáročných zařízeních, převážně na horizontálních pásových nebo rotačních zahušťovačích. Dosahuje se takto reálného zahuštění kalu na cca 5 - 6 % sušiny. Flokulanty jsou chemické látky, které svými vlastnostmi zlepšují separaci aktivovaného kalu [1].

2.3.2 Vyhnívací nádrže

Do vyhnívací nádrže přitéká směs primárního a přebytečného biologického kalu. Vyhnívací nádrže slouží zejména k stabilizaci čistírenských kalů. Stabilizace kalu je nezbytný krok pro spolehlivé zpracování čistírenských kalů. Kal je stabilizován za účelem:

- Redukce odbouratelné organické hmoty (omezení zápachu)
- Zlepšení odvoditelnosti
- Redukce hmotnosti a množství kalu a získání využitelného produktu

V praxi by se stabilizace kalu měla provádět s ohledem na to, jak se bude dál s kalem nakládat.

Anaerobní stabilizace kalu

Anaerobní stabilizace (vyhníváním) je proces, při kterém dochází k rozkladu organických látek pomocí mikroorganismů bez přístupu vzdušného kyslíku. Konečnými produkty jsou vzniklá biomasa (nerozložitelné a obtížně rozložitelné organické látky) a bioplyn obsahující CH_4, CO_2, H_2, N_2 a H_2S. Při anaerobní stabilizaci dochází k úbytku organické sušiny, neboť právě ta se přeměňuje na bioplyn. Zároveň dochází k potlačení výskytu patogenních mikroorganismů, dochází tedy k částečné hygienizaci kalu.

V současné době se provozují dva způsoby anaerobní stabilizace, mezofilní a termofilní. V ČR je ve větší míře rozšířena mezofilní anaerobní stabilizace. Probíhá při teplotě 30 -35 °C a doba zdržení se pohybuje mezi 20 – 30 dny. Mezofilní proces je obvykle rozdělen do dvou stupňů. Jako první stupeň se používá vyhřívaná míchaná anaerobní nádrž, kde dochází k

vlastnímu procesu stabilizace. Druhý stupeň je tvořen uskladňovací nádrží. Doznívají v ní stabilizační procesy a odděluje se v ní kal, který je čerpán na odvodnění, od kalové vody, která je čerpána zpět do aktivace. Termofilní anaerobní stabilizace patří k modernějším metodám. Probíhá při teplotě 55 – 60 °C, a proto je možné zkrátit dobu zdržení na 10 – 15 dnů. Doba zdržení závisí na kinetice a zatížení procesu. Musí být tak dlouhá, aby došlo k požadovanému rozložení organických látek. Při termofilní anaerobní stabilizaci je dosahováno vyšší rychlosti rozkladu organických látek a jeho větší účinnosti. Tím dochází i ke zvýšení produkce bioplynu. Vzhledem k vyšší procesní teplotě dochází
také k účinnější hygienizaci [15].

Aerobní stabilizace kalu

Aerobní stabilizace se uplatňuje především u menších ČOV. Stejně jako u anaerobní stabilizace dochází k likvidaci patogenů a úbytku organické hmoty. Mezi novodobé způsoby aerobní stabilizace patří tzv. autotermní aerobní stabilizace. Tento proces si udržuje sám termofilní podmínky díky exotermnímu metabolismu termofilních mikroorganismů, neboť při biologické oxidaci organického uhlíku dochází k uvolňování tepla. Proces aerobní stabilizace je schopen si udržet požadovanou stabilizační teplotu. Pro zintenzivnění procesu je možno využít aeraci čistým kyslíkem. Teplota, při které probíhá stabilizace, je závislá na typu aerace (vzduch / kyslík) a na zahuštění kalu vstupujícího do procesu. Čím větší je zahuštění kalu, tím se daří dosahovat vyšších teplot. Při zahuštění kalu nad 6 % obsahu sušiny a aeraci kyslíkem je možno dosáhnout teploty až 80 °C. Naopak při zahuštění kalu kolem 3 % obsahu sušiny a aeraci vzduchem se daří dosahovat teplot pouze kolem 25 °C. Optimálními podmínkami jsou zahuštění kalu kolem 4 – 6 % obsahu sušiny a aerace kyslíkem při dosahování stabilizačních teplot 55 – 60 °C. Při těchto teplotách dochází k rozkladu patogenních mikroorganismů a také k potlačení zápachu. Doba zdržení kalu bývá 25 – 30 dní. Podmínkami pro úspěšné provozování autotermní aerobní stabilizace jsou dostatečně zahuštěný vstupní kal, který obsahuje dostatečné množství rozložitelných organických látek, izolace stabilizační nádrže z důvodů minimalizace ztrát tepla, efektivní míchání a aerace. Obsahuje-li kal velké množství vody a nízký podíl rozložitelných organických látek, není tento proces funkční, tj. kal se samovolně nezahřívá [15].

2.3.3 Uskladňovací nádrž

Uskladňovací nádrže slouží pro uskladnění vyhnilého kalu před odvodněním. Uskladňovací nádrže se dimenzují na dobu zdržení 150 dní. Překročení doby zdržení vede často k provozním obtížím (zápach, špatné zahuštění). Uskladňovací nádrže mohou a nemusí být zastřešeny. Obsah nádrží je promícháván míchadly.

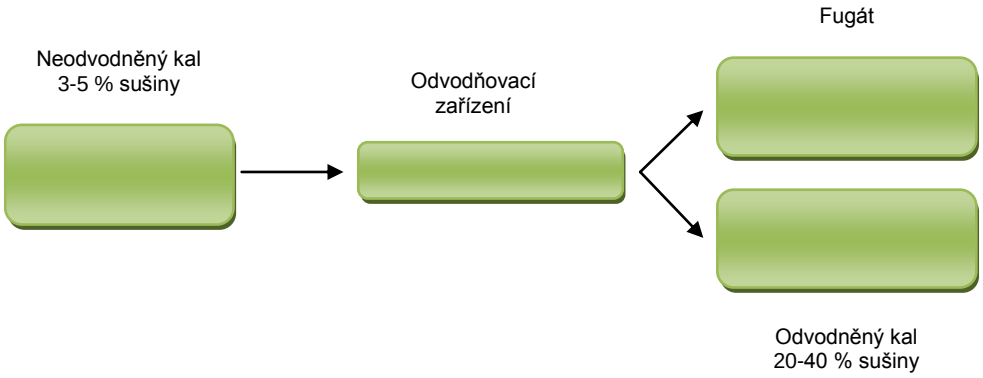
2.3.4 Odvodnění kalu, sušení kalu

Odvodnění kalu je nedílnou součástí zpracování kalu. V dnešní době nachází uplatnění na stále menších čistírnách z důvodu přísnějších podmínek na následné nakládání s kaly. Nejrozšířenější způsob odvodnění kalu v současnosti je dekantační odstředivka nebo pásový lis, který je postupně stahován z provozů. Kal lze i odvodňovat mimo zmíněné způsoby např. na kalolisech, vakuových bubnových filtrech a je i možnost uskladnění na kalových polích. Tyto metody nejsou příliš využívané.

Do odvodňovacího zařízení přivádíme kal stabilizovaný a zahuštěný. Z odvodňovacího zařízení vystupuje odvodněný kal a filtrát. Odvodněný kal má obsah sušiny 20 - 40 %. Filtrát (tzv. fugát) je čerpán zpět do aktivace a opětovně čištěn v čistícím procesu.

Složení a kvalita fugátu závisí mimo jiné i na způsobu stabilizace kalu. Při aerobní stabilizaci kalu má často fugát velice nízký stupeň znečištění. Při anaerobní stabilizaci kalu obsahuje velké množství organických látek a také sloučeniny fosforu a dusíku.

K hodnocení kvality odvodnění se používá procentuální obsah sušiny v odvodněném kalu a obsah NL ve fugátu, který by neměl přesáhnout 1 000 mg/l. Nízký obsah sušiny se vyskytuje, pokud se odvodňuje aktivovaný kal. Čím větší je podíl organické hmoty v sušině, tím je kal hůře odvoditelný. Nízké hodnoty obsahu sušiny způsobují problémy při další manipulaci s kalem, neboť tato hmota má pastovitou či kašovitou konzistenci. Tomuto lze čelit např. přidáváním práškového vápna v procesu hygienizace.



Obr. 5 Materiálová bilance odvodnění

Obsah sušiny závisí na zvoleném druhu odvodnění, výkonu odvodňovacího zařízení a na specifické spotřebě flokulantů.

Odvodňovací zařízení

Následující tabulka poukazuje na různé obsahy sušiny dle zvoleného odvodňovacího zařízení.

Odvodňovací zařízení	obsah sušiny [%]
dekantační odstředivka	20 - 30
sitopasové lisy	20
kalolis rámový	30 a více
kalolis komorový	30 a více
vakuový bubnový filtr	15 - 25

Tab.1 Hodnoty obsahu sušiny dle zvoleného odvodňovacího zařízení [18]

Obr. 6 Dekantační odstředivka (ČOV Šumperk)

Koagulanty a flokulanty

K efektivní tvorbě vloček kalu je třeba do procesu dodávat potřebné chemikálie. K těmto chemikáliím se řadí koagulační a flokulační činidla.

Koagulanty se na ČOV nejčastěji dávkují do aktivačních nádrží. Jejich účinkem zde dochází k tvorbě zárodků vloček aktivovaného kalu vlivem elektrostatických sil. Napomáhá tomu promíchávání a proudění vody v aktivačních nádržích. Pomocí koagulantů se rovněž v aktivaci odstraňuje fosfor. Jako koaguláty se nejčastěji používají hlinité či železité soli, zejména sírany a chloridy.

Flokulanty se nejčastěji dávkují až před strojní odvodnění kalu. Dochází ke snížení hodnot specifických filtračních odporů, které jsou u surového i stabilizovaného kalu vysoké (10^{12} – 10^{14} m/kg). Před procesem odvodňování je třeba tyto hodnoty zmenšit zhruba o dva řády. Volba typu a dávkování polymerního organického flokulantu závisí na druhu kalu a obsahu organické sušiny [15] a [4].

Ceny poplatků za ukládání kalů

Obecně lze tedy předpokládat, že odvodněný kal dosahuje hodnot obsahu sušiny od 20 - 40 %. Odvodněný kal je následně použit na rekultivaci, kompostování, k přímé aplikaci na zemědělskou půdu nebo určen k uložení na skládku. Náklady jednotlivých druhů zpracování jsou odlišné, pohybují se v rozmezí od 100 - 600 Kč/t, dle zvoleného způsobu. Ceny na zpracování se liší z důvodu různé předúpravy kalu před konečným zpracováním nebo jsou řízeny zákonem. Zákonem č. 185/2001 Sb. se řídí skládkování, který určuje jednotnou cenu za uložení 1 t čistírenského odpadu na skládku. Následující tab.2 ukazuje sazby základních poplatků za ukládání odpadů od roku 2002 až do současnosti. Zvyšující se cena je dána vstupem ČR do EU, která usiluje o eliminaci ukládání čistírenského kalu na skládky a upřednostňuje jiné alternativní způsoby.

Roky	2002 až 2004	2005 až 2006	2007 až 2008	2009
Cena [Kč/t]	200	300	400	500

Tab.2 Sazba základního poplatku za ukládání kalů Kč/t [24]

Při rekultivaci, kompostování a uplatnění kalů v zemědělství se ceny liší z důvodu možné úpravy před konečným zpracováním. Úpravou kalu rozumíme sušení, odvodnění, rozklad, provzdušňovaní a další přípravné práce jako je tomu např. při kompostování či rekultivaci. Ceny vybraných způsobů zpracování čistírenského kalu jsou uvedeny tab.3.

Způsob zpracování	zemědělství	kompostování	rekultivace	skládkování
Cena [Kč/t sušiny]	100 - 300	200 - 400	300 - 500	400 - 600

Tab.3 Ceny zpracování čistírenského kalu

Pokud je čistírna vybavena sušárnou kalu, je použita pro sušení odvodněného kalu. V sušárnách je teplonosným mediem nejčastěji horký olej, který nepřímo ohřívá kal. Páry a stržený prach jsou vedeny do pračky plynů, kde jsou odtahované plyny odprašovány a zajištěna kondenzace par. Kal má výslednou sušinu 85 až 92 %. Sušení kalu probíhá v ČR v současnosti pouze na ČOV Brno.

2.3.5 Hygienizace kalu

Hygienizace je proces, kterým se snižuje bakteriální kontaminace kalu a jeho podstatou je vytvoření prostředí, ve kterém nejsou bakterie schopny přežít. Nutnost hygienizace určují zejména legislativní požadavky na omezení nebezpečných vlastností kalů. Nejrozšířenější a nejekonomičtější metodou hygienizace kalů je vápnění [1].

2.3.6 Plynojemy

Plynojemy slouží k akumulaci bioplynu vzniklého při procesu anaerobní stabilizace a k udržování tlaku. Bioplyn se do plynojemů přivádí z vyhnívajících nádrží. Bioplyn se může využívat v kogeneračních jednotkách nebo v plynových kotlích. Přebytečný bioplyn je spalován hořáky zbytkového plynu. Plynojemy jsou zobrazeny na obr. 7.

Obr. 7 Plynojemy (ČOV Modřice)

2.3.7 Kogenerace

Kogenerace spočívá ve spalování bioplynu ve spalovacím motoru či turbíně za vzniku elektrické energie a tepla. Takto je možné dosáhnout přibližně 80%-ní účinnosti. Využitelné odpadní teplo se získává z chladící vody, mazacího oleje a výfukových plynů. Díky této kombinované výrobě se dosahuje vysokého využití energie obsažené v bioplynu.

Vyprodukované teplo se převážně využívá pro ohřev kalů ve vyhnívacích nádržích a pro vytápění objektů čistírny.

3. Legislativa nakládání s kaly

Nakládání s kaly je především řízeno zákonem o odpadech. Další zákonná ustanovení potřebná jak pro původce kalů, tak pro zpracování nebo odstranění kalů se vycházející ze zákonů o vodách, ovzduší a půdě.

Nakládání s odpady se řídí zákonem č. 185/2001 Sb., zákon o odpadech, který vešel v platnost k 1. 1. 2002, ve znění pozdějších předpisů. Kaly z čištění komunálních odpadních vod jsou zařazeny podle vyhlášky č. 381/2001 Sb., katalog odpadů jako odpad ostatní, pod katalogovým číslem 190805.

Pro účely zákona č. 185/2001 Sb. se rozumí dle § 4 další základní pojmy

a) kalem
   1. kal z čistíren odpadních vod zpracovávajících městské odpadní vody nebo odpadní vody z domácností a z jiných čistíren odpadních vod, které zpracovávají odpadní vody stejného složení jako městské odpadní vody a odpadní vody z domácností,
   2. kal ze septiků a jiných podobných zařízení,
   3. kal z čistíren odpadních vod výše neuvedených,

b) upraveným kalem - kal, který byl podroben biologické, chemické nebo tepelné úpravě, dlouhodobému skladování nebo jakémukoliv jinému vhodnému procesu tak, že se významně sníží obsah patogenních organismů v kalech, a tím zdravotní riziko spojené s jeho aplikací,

c) použitím kalu - zapracování kalu do půdy,

d) programem použití kalů - dokumentace zpracovaná v rozsahu stanoveném prováděcím právním předpisem.

Surový kal obsahuje okolo 70 % organických látek v sušině a vzhledem k možné přítomnosti patogenních mikroorganizmů je podle zákona o odpadech klasifikován jako nebezpečný odpad se všemi důsledky z toho plynoucími. Z tohoto důvodu je ve většině případů již přímo na ČOV v lince zpracování kalu aplikovaná taková technologie úpravy a zpracování kalu, která promění „surový kal“ z nebezpečného odpadu ve stabilizovaný materiál, který je díky svým vlastnostem přímo předurčen k využití v zemědělství, buď přímo k hnojení a kondicionaci půdy, nebo po předchozím kompostování.

Producent odpadu má při své činnosti nebo v rozsahu své působnosti povinnost v mezích daných zákonem č.185/2001 Sb. zajistit přednostní využití odpadů před jejich odstraněním. Na prvním místě jsou recyklační technologie využití kalu (pokud to lze s ohledem na rizikové prvky), dále pak spalování kalu s využitím energie a nakonec spalování bez využití energie. Splnění této povinnosti se nevyžaduje, pokud v daném čase a místě neexistují technické nebo ekonomické předpoklady pro její splnění a postupuje-li se v souladu s plány odpadového hospodářství podle jiné části tohoto zákona.

Při posuzování vhodnosti způsobů odstranění odpadů má vždy přednost způsob, kterým se zajistí vyšší ochranu lidského zdraví a je šetrnější k životnímu prostředí. Uložením na skládku mohou být odstraňovány pouze ty odpady, u nichž jiný způsob odstranění není dostupný nebo by přinášel vyšší riziko pro životní prostředí nebo riziko pro lidské zdraví [23].

3.1 Použití kalů v zemědělství

Podle zákona č. 185/2001 Sb. Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů lze použít pro přímou aplikaci do zemědělské půdy pouze kal stabilizovaný.

Na kvalitu a nezávadnost kalů přímo aplikovaných do zemědělské půdy jsou kladeny stále větší nároky. Podle vyhlášky č. 382/2001 Sb. o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. Tato vyhláška je plně v souladu se směrnicí Rady EU č. 86/278/EEC, která určuje, za jakých podmínek lze čistírenské kaly v zemědělství využívat. Tab.4 ukazuje limitní hodnoty obsahu těžkých kovů pro přímou aplikaci na zemědělskou půdu obsažené ve vyhlášce č. 382/2001 Sb. Dalším omezujícím faktorem je obsah patogenních organismů a perzistentních chemických látek. V tab.5 jsou stanovena mikrobiologická kritéria pro použití kalů na zemědělské půdě [13].

Prvek	Přímá aplikace na půdu [mg/kg sušiny]	
	382/2001 Sb.	86/278/EEC
As	30	-
Cd	5	20-40
Cr	200	-
Cu	500	1000-1750
Hg	4	16-25
Ni	100	300-400
Pb	200	750-1200
Zn	2500	2500-4000

Tab.4 Limitní hodnoty koncentrace těžkých kovů v kalech pro přímou aplikaci do zemědělské půdy[13]

Kategorie kalů	Přípustné množství mikroorganismů v 1 gramu sušiny kalů aplikovaných na zemědělskou půdu		
	Termotolerantní koliformní bakterie	Enterokoky	Salmonella sp.
I	< 10^3	< 10^3	negativní nález
II	10^3 až 10^3	10^3 až 10^3	nestanovuje se

Tab.5 Mikrobiologická kritéria pro použití kalů na zemědělské půdě [14]

Kategorii I je možno aplikovat na půdy využívané v zemědělství při dodržování ostatních ustanovení vyhlášky č. 382/2001 Sb. a kategorii II lze aplikovat na zemědělské půdy určené

k pěstování plodin a na půdy, které se nejméně 3 roky po použití čistírenských kalů nebude pěstovat polní zelenina a intenzivně plodící ovocná výsadba.

3.2 Kompostování kalů

Při využití čistírenských kalů jako přídavné suroviny pro výrobu kompostu sledujeme obsah těžkých kovů. Platí zde limitní podmínky, které jsou stanoveny normou ČSN 46 5735 Průmyslové komposty. Provoz kompostáren je řízen dvěma základními zákonnými normami.

- Zákon o hnojivech č. 156/1998 Sb. ve znění zákona 308/2001 Sb.
- Zákon o odpadech č. 185/2001 Sb.

Prvek	Surovina pro výrobu kompostu [mg/kg sušiny]
	ČSN 46 5735
As	50
Cd	13
Cr	1000
Cu	1200
Hg	10
Ni	200
Pg	500
Zn	3000

Tab.6 Limitní hodnoty koncentrace těžkých kovů v kalech určených pro kompostování[13]

3.3 Legislativa v EU

Recyklace kalů v zemědělství se řídí Směrnicí Rady EU 86/278/EEC z 12. června 1986 o ochraně životního prostředí a zvláště půdy při používání čistírenských kalů v zemědělství, jejímž cílem je zabránit poškození půd, rostlin, zdraví zvířat i lidí. Současně podporuje správné využití kalů, které jsou bohatým zdrojem organické hmoty (i více než 50 %) základních živin (dusík, fosfor, draslík, vápník aj.) i stopových prvků a mohou zlepšovat fyzikálně - chemické i biologické vlastnosti půd.

Na kvalitu a hygienickou nezávadnost kalů aplikovaných na půdu jsou kladeny stále vyšší nároky, proto v řadě členských států EU je zemědělské využívání kalů regulováno novějšími státními předpisy, jež jsou mnohem přísnější než dosud platná Směrnice Rady EU 86/278/EEC. Příkladem důsledné recyklace kalů a jejich využití v zemědělství může být Norsko, kde je v současné době využíváno v zemědělství téměř 70 % celkové produkce kalů [2].

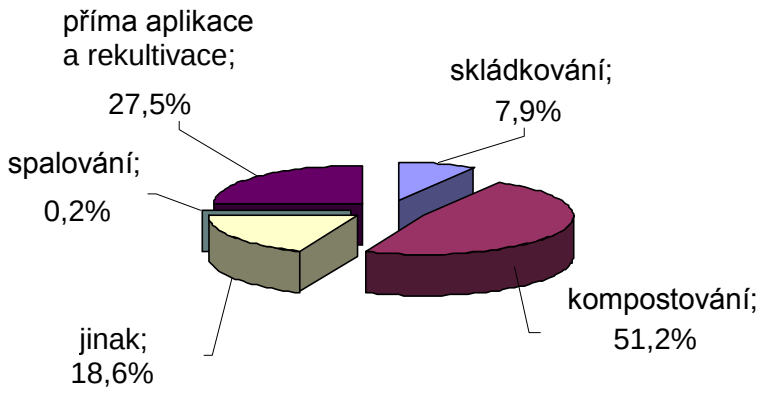
4. Způsoby nakládání s kalem

Před tím, než je rozhodnuto jakou metodou kal z ČOV využít, je třeba provést chemický rozbor, aby byly stanoveny fyzikálně chemické vlastnosti a složení kalu a bylo možné posoudit, jak s ním dál nakládat.

Mezi nejrozšířenější způsoby nakládaní s čistírenskými kaly patří kompostování, přímá aplikace na půdu, rekultivace a skládkování. Naproti tomu, zpracování kalů termickými metodami je u nás jen velmi málo zastoupené. Přehled využití jednotlivých způsobů nakládání s kalem je znázorněn tab.7 a graf. 1.

Způsoby nakládání s kaly v ČR	rok 2004 [tun sušiny]	rok 2005 [tun sušiny]	rok 2006 [tun sušiny]
produkce kalů celkem	178 749	171 888	175 471
přímá aplikace a rekultivace	29 119	34 467	48 304
kompostování	87 469	88 820	89 932
skládkování	25 447	12 027	13 979
spalování	39	20	27
jinak	36 675	36 554	23 229

Tab.7 Způsoby nakládání s čistírenskými kaly za rok 2004 až 2006 [21]



Graf. 1 Způsoby nakládání s kalem v ČR za rok 2006 [21]

4.1 Kompostování

Kompostování je v ČR nejrozšířenější způsob využití čistírenských kalů, je využíváno přibližně 51,2 % kalů z ČOV.

Kompostování je kontrolovaný biologický rozklad pevné organické hmoty za aerobních podmínek. Biologický rozložitelný odpad je při tomto procesu díky činností bakterií, hub a dalších organismů postupně transformován do půdních složek. Proces kompostování může mít na čistírenské kaly vliv nejen z hlediska hygienizace, ale také z hlediska rozkladu nežádoucích organických látek a redukce zápachu.

Kompostování je používáno k recyklaci kalů, umožňuje nám vrátit látky do přirozených potravních cyklů. Odvodněný kal je smíchán s doplňkovým organickým materiálem (např. štěpka, sláma, piliny), který je důležitý pro snížení obsahu vody a slouží jako zdroj uhlíku.

Kompostováním dosáhneme zmenšení objemu kalů až o 30 % a eliminujeme rozmnožování patogenních mikroorganismů. Navíc vzniká skladovatelný produkt.

Obr. 8 Kompostárna

4.2 Přímá aplikace do půdy v zemědělství

Aplikace na zemědělskou půdu je jedním z nejrozumnějších způsobů využití čistírenských kalů. V zemědělství jsou potřeba alternativní zdroje minerálních a organických látek, což jsou právě čistírenské kaly. Jsou bohatým zdrojem organické hmoty, základních živin i stopových prvků a mohou zlepšit biologické vlastnosti půd. Z živin jsou v kalech významně zastoupeny především dusík a fosfor. Použití je značně omezeno přítomností nežádoucích toxických prvků (zejména koncentrací těžkých kovů Zn, Cu, Pb, Hg) a rizikových organických látek. Proto je potřeba kal před použitím hygienizovat a tím zbavit nebezpečných cizorodých látek. Podle současné legislativy je značně omezen objem kalů přímo použitých k hnojení zemědělské půdy.

Přímá aplikace do půdy je v ČR druhým nejrozšířenější způsob využití čistírenských kalů, je využíváno přibližně 27,5 % kalů z ČOV. Aplikace čistírenských kalů do zemědělské půdy se provádí buď rozvozem tekutého kalu, nebo po odvodnění kalu.

4.3 Rekultivace

Rekultivace je obnova přírodního prostředí. Čistírenské kaly se používají k organickému hnojení zemitých substrátů jako tekuté nebo odvodněné. Při rekultivaci je potřeba velkého množství organické hmoty, aby bylo dosaženo správného půdního profilu. Dalšími rekultivačními substráty mohou být popeloviny, rašeliny, papírenské kaly a komposty. Dále se používají výkopová zemina, štěrk, písek, dřevo apod. Substráty se vyrábí přímo na místě rekultivace nebo na vybraných místech.

Obr. 9 Rekultivace

4.4 Skládkování

Skládkování představuje ukládání kalu na určených místech – zabezpečených skládkách. Výhodou této metody je finanční a technologická nenáročnost. V dnešní době tato metoda není již mnoho používána, z důvodů vstupu ČR do EU. Tím se zpřísnila kritéria pro ukládání kalů na skládky, podle zákona č. 185/2001 Sb. a vyhláškou č. 383/2001 Sb. a vzrostly náklady za uložení na skládky, které stále rostou s navyšující se produkcí kalu (viz tab.7).

Podle stávající legislativy je skládkování neperspektivní a ekologicky nevýhodné řešení. Do budoucna požaduje EU skládkování zcela zakázat, protože se tak pouze přesouvá problém s odpadem na pozdější dobu, proto je nutné uvažovat do budoucna s perspektivnějším řešením, které zohledňuje životní prostředí [14].

4.5 Termické zpracování kalů

Velmi výhodným způsobem zpracování čistírenských kalů se ukazuje termické zpracování. Termickému rozložení kalů často předchází částečné sušení již stabilizovaného kalu. Sušení se provádí s cílem celkového zmenšení objemu. Tím se usnadní manipulace a rozšíří se možnosti další aplikace. Vzhledem k průběhu teplot během sušení a spalování nesmíme zapomínat na chování těkavých látek, které se mohou uvolňovat do odpadního vzduchu, do unikající vodní páry v sušárnách nebo do spalin ve spalovnách.

Spalování kalů

Tento způsob zpracování kalů je v České republice nevyužíván. Spalovny musí dodržovat přísné emisní limity a další podmínky podle zákona o odpadech a zákona o ochraně ovzduší.

Z hlediska spotřeby energie může být proces spalování kalů soběstačný. Záleží na stupni odvodnění, popř. vysušení, složení kalů a výhřevnosti. Kaly z čistíren odpadních vod lze spalovat v různých spalovacích zařízeních.

Hlavní možnosti spalování a spoluspalování kalů:

- spalovny tuhých komunálních odpadů
- teplárny a elektrárny
- cementárny
- speciální spalovny odvodněného kalu

Mezi energetické nejdůležitější faktory spalování kalů patří především obsah sušiny a složení kalu resp. výhřevnost. Vyhnilý, vysušený kal má obvykle výhřevnost podobnou hnědému uhlí. Surový kal má vyšší výhřevnost než kal vyhnilý. Hodnota výhřevnosti vysušeného surového kalu je mezi 14 až 20 MJ/kg, oproti vysušenému vyhnilému kalu, který se pohybuje v rozmezí 7 až 10 MJ/kg [3]. Nevýhodou surového kalu je jeho nestabilita a nakládání s ním je více problematické.

Obr. 10 Cementárenská pec

4.6 Alternativní a méně používané způsoby nakládání s kalem

Vedle způsobů nakládání s kaly, které jsou uvedeny v předchozích kapitolách, se setkáváme v dnešní době i s méně rozšířenými metodami, mezi které řadíme tyto uvedené způsoby solidifikace, pyrolýza, výroba pelet a mokrá oxidace.

Solidifikace

Solidifikace je speciální případ fyzikálně - chemické metody zpracování kalů. Solidifikací se rozumí proces, při kterém dochází k stabilizaci odpadu na pevný produkt. Odpad, pojivo a další přísady se převedou na matici (tvárnici), čímž dochází k podstatnému snížení specifického povrchu, zlepší se manipulace upraveného odpadu a ukládání na skládky.

Pyrolýza

Pyrolýzou rozumíme zplyňování kalů. Pyrolýza je přeměna vysušeného kalu na plynné palivo. Proces probíhá prostřednictvím zplyňovacího média, kterým může být vzduch nebo kyslík.

Výroba pelet

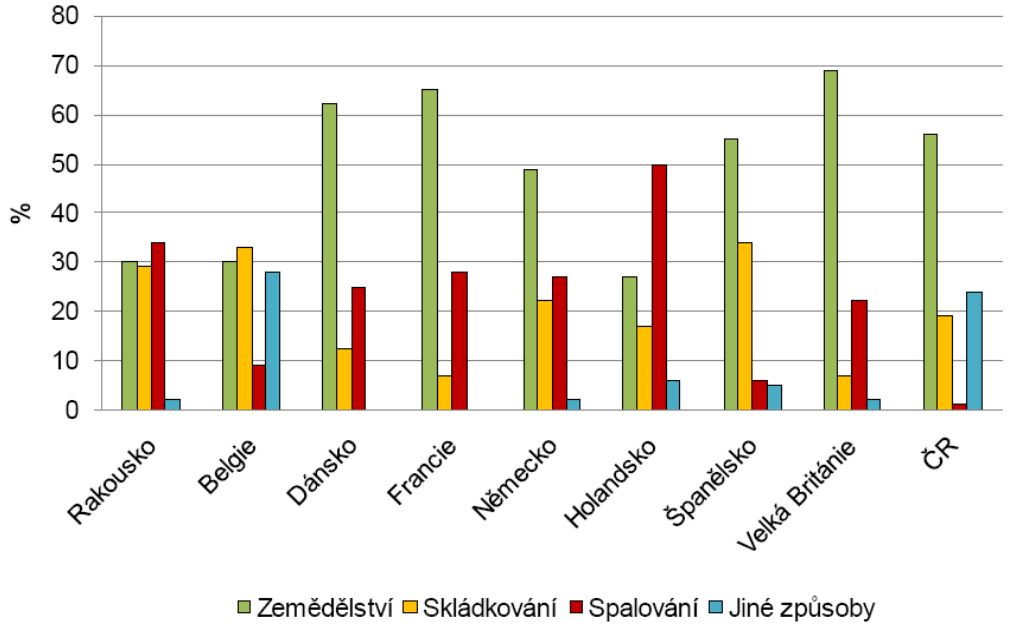
Pelety jsou perspektivní palivo s vysokou výhřevností vyrobené z obnovitelných surovin. Pelety jsou zpravidla granule kruhového průřezu, které se vyrábějí na protlačovacích lisech pod vysokým tlakem. Nejčastěji jsou vyráběny smícháním dřeva, slámy a kalů, které zlepšují soudržnost pelet.

Mokrá oxidace

Při mokré oxidaci dochází k oxidaci spalných látek z roztoku či emulze za přítomnosti energie, která umožňuje intenzivní oxidaci. Oxidace se provádí za přítomnosti kyslíku rozpuštěného v suspenzi za vyšší teploty a vyššího tlaku.

4.7 Způsoby nakládání s kalem v zemích EU

V zemích Evropské Unie je recyklováno 40 – 45 % čistírenských kalů, z nichž je většina využívána v zemědělství. Zbývající část kalů je ukládána na skládkách 30 – 35 %, spalována 15 - 20 % či jinak využívána 5 – 10 %, zejména ve stavebnictví. Stále rostoucí zájem o recyklaci kalů v některých evropských zemích v posledních letech je důsledkem zpřísnění limitů pro jejich skládkování a zákazu vypouštění kalů do moře od 31. 12. 1998. Způsoby zpracování kalů ve vybraných zemích EU jsou znázorněny v graf. 2.



Graf. 2 Způsoby nakládání s kalem ve vybraných zemích EU za rok 2002 [13]

5. Dezintegrace kalu

Vzhledem k rostoucí produkci kalu se zvyšují požadavky na čištění odpadních vod a následně na zpracování. Dle vývoje v EU je ukládání kalů na skládky potlačováno a zůstávají dva hlavní směry konečného využití nebo likvidace. Předně je to využití v zemědělství, za splnění přísných podmínek nebo spalování [6].

Hlavním cílem je snížení hmotnosti, snížení objemu, využít cenných látek a energie obsažených v kalech. Technologie, které efektivně kombinují tyto požadavky, představují nejlepší řešení.

5.1 Dezintegrace

Pro zlepšení biologické rozložitelnosti kalů byla vyvinuta řada metod tzv. předúpravy kalu, jejichž společnou charakteristikou je dezintegrace [6]. Dezintegrace je rozbití vloček a částic kalu. Současně dochází k rozbití části buněk mikroorganismů aktivovaného kalu a uvolnění buněčného obsahu do roztoku, prostřednictvím narušení buněčných stěn. V důsledku rozpadu struktury kalu se podstatně urychlí anaerobní a aerobní biologický rozkladný proces. To má za následek zkrácení doby reakce a tím se sníží množství zbývajícího nerozloženého materiálu a zlepšení odvoditelnosti materiálu.

Nejdůležitější efekty dezintegrace jsou:

Dezintegrace čistírenských kalů v různých uzlech technologické linky ČOV je velice perspektivní jak pro zlepšení funkce kalového hospodářství, tak i biologického čištění odpadních vod. Celkový přínos je zvýšení účinnosti všech biologických procesů s výsledným efektem snížení množství produkovaného kalu [7].

- Zvýšení rychlosti anaerobního rozkladu organických látek a tím zvýšení produkce bioplynu
- Snížení spotřeby fakulantu při odvodňování kalu
- Zlepšení obsahu sušiny při odvodňování
- Redukce přebytečného kalu a tím dosažení úspor na nákladech za likvidaci kalu
- Zlepšení celkové energetické bilance ČOV

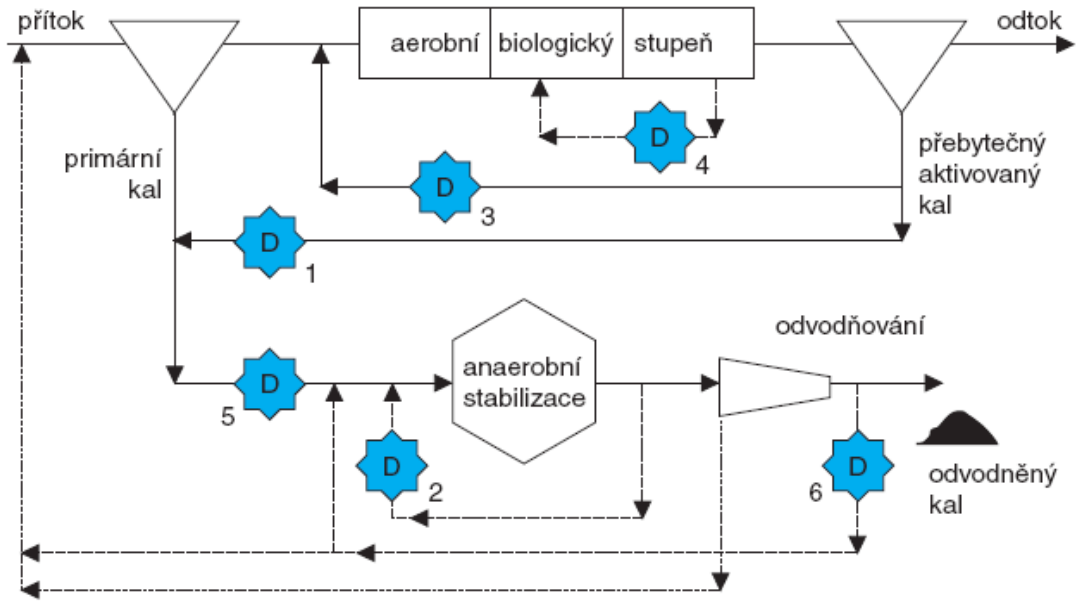
5.2 Metody dezintegrace

Následující tab.8 zobrazuje různé metody dezintegrace a na obr. 11 je zobrazeno začlenění dezintegrace do čistírenského provozu.

Mechanické	Fyzikální	Chemické	Biologické
kulové mlýny	zmrazování-rozmrazování	kyselá hydrolýza	enzymová lyze
vysokotlaký homogenizátor	osmotické šoky	alkalická hydrolýza	
ultrazvuk	plazmové pulsy	mokrá oxidace	autolýza
lyzátovací zahušťovací centrifuga	termická dez.	ozonizace	

Tab.8 Možnosti dezintegrace kalu [19]

Možnosti uplatnění dezintegrace v čistírenském procesu:



= dezintegrace

1) dezintegrace přebytečného aktivovaného kalu před anaerobní stabilizací: provozně velmi využívána: lyzátovací centrifuga, ultrazvuk
2) dezintegrace anaerobně stabilizovaného kalu s vrácením do anaerobního reaktoru
3) dezintegrace vráceného aktivovaného kalu
4) dezintegrace části aktivační směsi:příprava substrátu pro denitrifikaci
5) dezintegrace směsného surového kalu před anaerobní stabilizací
6) dezintegrace odvodněného anaerobně stabilizovaného kalu a jeho recirkulace do anaerobního reaktoru nebo před primární sedimentací

Obr. 11 Možnosti uplatnění dezintegrace v čistírenském procesu [18]

5.3 Mechanické metody

Pro mechanické způsoby rozkladu buněk je zapotřebí energie a tlaku, translační nebo rotační energie. Nejpoužívanější jsou následující metody.

Dezintegrace buněk mletím v kulovém mlýnu

Kulový mlýn se skládá z válcové komory (horizontální nebo vertikální). Komora obsahuje rotující disky instalované na hřídeli poháněné motorem (míchadlo) a je naplněna mělnícími korálky ze skla nebo umělé hmoty. Rotační pohyb míchadla uvádí do pohybu kuličky a upravovaný materiál (kal). Vlivem vzájemných srážek kuliček a jejich nárazů na stěnu mlecí komory dochází k dezintegrování mikroorganismů střižnými a tlakovými silami. Během mletí se uvolňuje velké množství tepla.

Účinnost dezintegračního procesu závisí na množství vložené energie, rozměru kuliček (menší mají větší účinnost), hydrodynamice míchání, teplotě procesu, hustotě suspenze a geometrii komory [7].

Vysokotlaká homogenizace

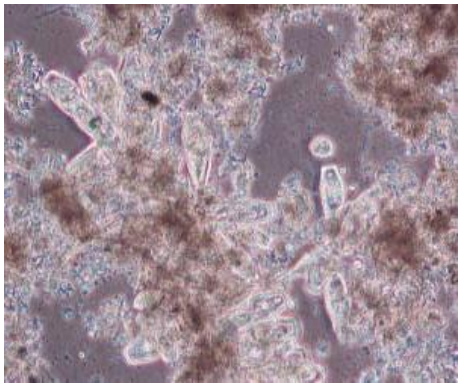
Vysokotlaký homogenizátor se skládá z vícestupňového čerpadla a homogenizačního ventilu. Čerpadlo nasává suspenzi do pístového válce a stlačuje ji na tlak několik stovek barů, dosahující průtoku několika kubických metrů za hodinu. Suspenze prochází skrz štěrbinu, při čemž klesá tlak pod mez evaporace (vypaření) tekutiny, a rychlost tekutiny roste na 300 m/s. Když kavitační bublinky prasknou, gradient tlaku je zaveden do tekutiny a vyvolá teplotu několik stovek stupňů Celsia a tlakovou vlnu.

Velikost tlaku se řídí citlivostí k destrukci a ta závisí na druhu rozrušované suspenze [7].

Dezintegrace ultrazvukem

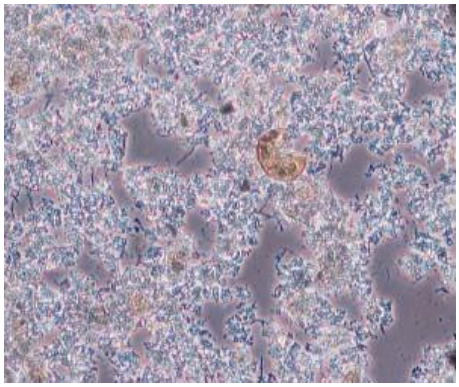
Použití ultrazvuku pro dezintegraci je zcela běžné. Jedná se o provozně bezpečný a hospodárný proces a snadno realizovatelný v čistírenském procesu. Dezintegrační účinek ultrazvuku, tj. kavitace, spočívá v periodickém stlačování a uvolnění kalu. V milisekundách vznikají kavitační bubliny, které vedou při porušení k lokálnímu vytvoření extrémních podmínek (tlaku až 500 barů a teplotě až 230 °C). Podle množství dodané energie resp. požadovaného výsledku rozlišujeme dezintegraci kalů nízkoenergetickou (zničení struktury buněk) a vysokoenergetickou (rozklad buněk) [7].

Pro porovnání je na obr. 12 a obr. 13 znázorněn kal před dezintegrací a po dezintegraci (metoda ultrazvukem).



100x

Obr. 12 Kal před dezintegrací: je patrná neporušená struktura buněk [26]



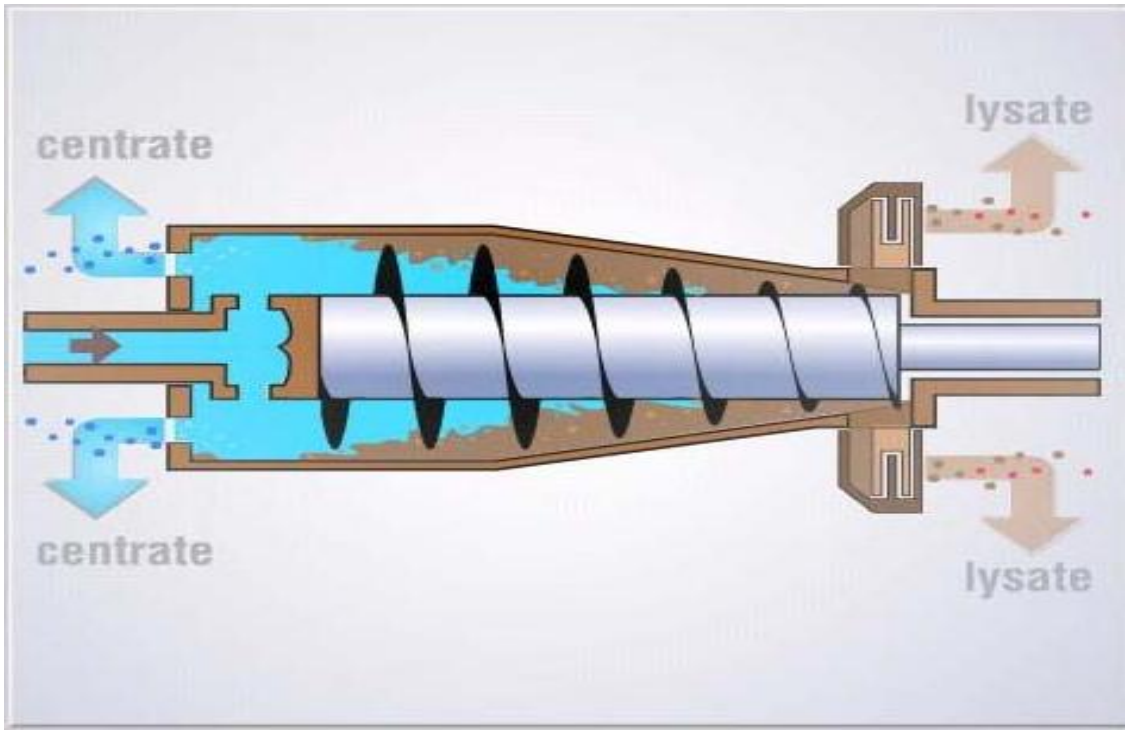
100x

Obr. 13 Kal po dezintegraci: struktura vloček velmi otevřená, směs má nyní stejnosměrnou kašovitou soudržnost [26]

Lyzátovací zahušťovací centrifuga

Během zahušťování přebytečného aktivovaného kalu v centrifugách dochází k mechanickému rozrušení malé části buněk mikroorganismů střižnými silami [7]. Umístěním lyzovacího (rozrušovacího) zařízení do proudu vystupujícího zahuštěného kalu se zvýší účinnost destrukce buněčných stěn. Využije se tím částečně přebytek kinetické energie centrifugy. Tato centrifuga je potom využívána jako dvouúčelové zařízení k lysci a zahuštění.

Množství rozbitých buněk závisí na parametrech centrifugy (počet otáček, průměr bubnu), na druhu rozrušovacího zařízení a na druhu a kvalitě zpracované biomasy zpracovaného aktivovaného kalu [6].



Legenda:

centrace – výstup kapaliny
lysate – výstup sedimentu

Obr. 14 Lyzátovací zahušťovací centrifuga – schéma rozrušení

5.4 Fyzikální metody

Termická dezintegrace

Termickou úpravou čistírenských kalů dochází k hydrolýze tuhých buněčných komponentů. Při této metodě dochází k zahřátí kalu na teplotu dezintegrace, čímž dosáhneme rozkladu tuků, uhlovodíků a dalších makromolekul vylučovaných z buněk kalu.

Kal určený k tepelné úpravě (přebytečný aktivovaný kal, anaerobně stabilizovaný kal, zahuštěný nestabilizovaný kal) se v tlakové nádobě (termickém reaktoru) zahřeje na požadovanou teplotu dezintegrace při tlaku 0,1 - 1,3 MPa. Následuje upuštění tlaku a pokles teploty (samovolně nebo chlazením), což je příčinou rozkladu buněk mikroorganismů. Doba ohřevu je různá, dle navrženého zařízení. Při krátké době ohřevu (desítky sekund) nedochází k úplnému potlačení enzymů a stimulačních faktorů, i přes vysoký stupeň dezintegrace buněk [7].

Možné výhody termické dezintegrace:

- zvýšení rychlosti rozkladu při stabilizaci kalu
- zvýšení produkce bioplynu při anaerobní stabilizaci
- snížení celkového množství stabilizovaného kalu

- zlepšení odvoditelnosti kalu
- zvýšení rozložitelnosti organických látek

Dezintegrace zmrazováním a rozmrazováním

Při opakovaném zmrazení buněčné suspenze pod teplotu tuhnutí kapalné fáze a následném rozmrazení dezintegrovaného materiálu dochází k nevratným změnám struktury vloček. Dochází k roztrhnutí buněčného obalu vlivem utváření a následného tání krystalků ledu v buňce. Postupně vznikají větší a větší krystaly, které způsobují i rozsáhlejší destrukci buněk [7].

Vzhledem k mechanismu procesu je účinnost této metody omezená, často se používá zejména jako pomocná metoda při ostatních metodách dezintegrace.

Osmotické šoky

Dezintegrace tímto způsobem je vhodná především pro bakteriální buňky. Dezintegrace dosáhneme náhlým vzrůstem osmotického tlaku uvnitř buněk, který způsobí, že se poruší buněčný obal a dojde k uvolnění složek do roztoku [7].

Osmotický tlak je tlak toku rozpouštědla pronikajícího přes semipermeabilní (polopropustnou) membránu do roztoku, ve kterém je vyšší koncentrace rozpuštěných molekul nebo iontů. Je závislý na teplotě a koncentraci roztoku.

5.5 Chemické metody

Kyselá nebo alkalická hydrolýzy

K destrukci některých buněk se jeví opodstatněné použití minerálních kyselin a zásad v různých koncentracích, kde se kombinuje efekt chemických reakcí s osmotickým šokem. Hydrolýzu lze realizovat v podstatě v celém rozsahu pH. V kyselém prostředí kyseliny chlorovodíkové při pH 6 proběhne hydrolýza během 6 až 12 hodin. V zásadité oblasti pH 11,5 – 12,5 dochází k hydrolýze během 20 až 30 minut [7].

Oxidace

Mezi chemickými metodami zaujímá úprava kalu ozónem speciální místo, protože nevyžaduje žádné chemikálie a nezvyšuje koncentraci solí. Ozón vyvolá současně částečnou oxidaci a hydrolýzu organické hmoty. Buněčné stěny mikroorganismů jsou rozrušeny a cytoplasma je rozpuštěna v kalové vodě. Látky nerozpustné ve vodě s vysokou molekulovou hmotností jsou rozpuštěny na menší, ve vodě rozpustné a rozložitelné fragmenty. Při ozonizaci také dochází ke snížení počtu patogenních mikroorganismů.

Ozón se při anaerobní stabilizaci kalů používá buď k předúpravě přebytečného aktivovaného kalu před jeho vstupem do anaerobního reaktoru, nebo se ozonizaci podrobí část anaerobně stabilizovaného kalu, který se po ozonizaci vrací zpět do anaerobního reaktoru [7].

Dezintegrace použitím organických rozpouštědel

Organická rozpouštědla mohou v mnoha případech účinně napomoci při dezintegraci mikrobiálních buněk a při izolaci složek, které jsou lokalizovány na membránách.

Mezi nejvíce používané organické látky patří aceton, který se používá pro přípravu tzv. acetonové sušiny [6].

5.6 Biologické metody

Enzymatická dezintegrace způsobuje rozklad sloučenin z buněčné stěny, při kterém enzym urychlí reakci. Enzymatická dezintegrace a rozklad buněk je zajímavá v kombinaci s mechanickým rozkladem, protože vnitrobuněčná tekutina obsahuje látku na rozklad enzymů, proto mohou způsobit další rozklad po mechanické úpravě. Nevýhodou tohoto procesu jsou vysoké náklady na enzymy.

Enzymová lýze

Při předúpravě kalu pomocí enzymů dochází k porušení vazeb v buněčných stěnách. Enzymově katalyzovaná reakce rozštěpí sloučeniny buněčné stěny [7].

Autolýza

Autolýza je definována jako buněčná lýze, která není vyvolána zásahem exogenních činitelů. Je známo mnoho podmínek a faktorů, které indukují vznik autolytického procesu. Autolýza se většinou vyskytne, je-li náhle přerušen normální metabolismus buňky, autolýza může být indukována náhlým snížením teploty apod. [7].

5.7 Zhodnocení dezintegrace

Zmíněné popsané metody rozkladu buněk mikroorganismů nebo rozmletí kalů vyžadují speciální samostatné zařízení a jsou energeticky náročné. V dnešní době dosahují největšího uplatnění metody ultrazvukem, termická dezintegrace a dezintegrace lyzátovací centrifugou, která je ekonomicky i provozně nejefektivnější ze všech dnes známých dezintegračních metod.

Metoda dezintegrace	Účinnost dezintegrace [%]	Zvýšení stupně rozkladu [%]
Lyzátovací zahušťovací centrifuga	2,5 - 15	10 - 20
Homogenizátor	až 25	~30
Ultrazvuk	až 40	~30
Kulový mlýn	až 30	~20

Tab.9 Účinnost anaerobní stabilizace kalů dezintegrací [18]

6. Experimentální část

Tato kapitola diplomové práce je věnována podrobnému popisu měření dezintegrace kalu. Dále je vybraný postup pro měření zhodnocen a navrhnuty možnosti pro zlepšení postupu měření a funkčnosti zařízení.

Pro experimentální měření byla zvolena metoda termické dezintegrace (v rozmezí 60 -180 °C) a byl používán zahuštěný nestabilizovaný kal (ZNK). ZNK byl zvolen z důvodu vyšší výhřevnosti sušiny oproti zahuštěnému stabilizovanému kalu (ZSK). Výhřevnost ZNK sušiny je mezi 14 až 20 MJ/kg a ZSK je mezi 7 až 14 MJ/kg. ZNK má tedy lepší využitelnost pro termické procesy a dosahuje lepší odvoditelnosti bez použití stabilizace.

Měření bylo uskutečněno v laboratoři ÚPEI Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Pro měření dezintegrace kalu byla použita dvouplášťová tlaková nádoba vlastní konstrukce s maximálním tlakem 10 bar, maximální teplotou 180 °C a objemem 4,2 litrů. Tlaková nádoba byla vybavena tlakoměrem a teploměrem pro správné stanovení hodnot. Ohřev kalu byl proveden mediem (termoolej) proudícím v meziprostoru nádoby, ohřívaným pomocí lázňového termostatu HUBER bez chlazení. Nádoba a termostat byly propojeny plastovou hadicí s max. tlakem 6 bar a teplotou 350 °C. Chlazení kalu probíhalo pomocí průtoku vody ve spirále pomořené do olejové lázně. Ohřev kalu včetně chlazení trval přibližně 3,5 hodiny. Na obr. 15 je znázorněno celé zařízení, používané při termické dezintegraci.

K laboratorním měření byla dále použita tato zařízení: sušící váha KERM s maximálním rozsahem 50 g a přesností 0,001 g, digitální váha DENVER INSTRUMENT SI - 603 s maximálním rozsahem 600 g a přesností 0,001 g, rtuťové teploměry s přesností ± 0,1 °C, CENTRIFUGA MPW - 340 s maximálním výkonem 5000 ot./min, Triton Electronics TYPE 304M CST, sušárna KCW·100, kompresor Schnaider Compaq master 212.10.2W, filtrační papíry ze skleněných mikrovláken Ø 55 a 125 mm ISO 9001 QSC – 6250 (střední velikost pórů 2,5 μm) a CST filtrační papír 200 APPROX.

Obr. 15 Zařízení pro dezintegraci kalu

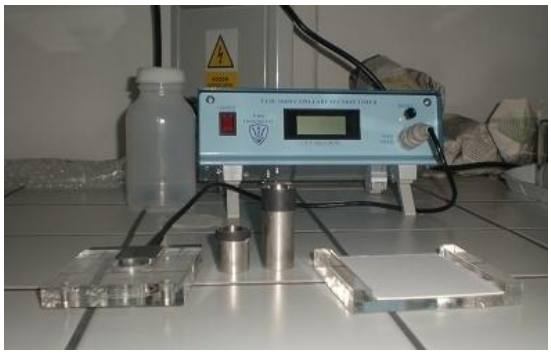
6.1 Základní údaje o zahuštěném nestabilizovaném kalu

Odběr vzorků na ČOV Tetčice probíhal dne 8. 12. 2008 a 11. 2. 2009. Byly odebrány vzorky ZNK, při každé návštěvě ČOV Tetčice bylo odebráno pět kanistrů s objemem pět litrů. Poté byly vzorky ZNK převezeny do laboratoře ÚPEI. První fáze měření probíhala od 9 - 16. prosince 2008 a druhá od 11 - 23. 2. 2009. Celkem bylo provedeno deset měření dezintegrace ZNK. Postupně byly stanoveny parametry CST a obsah sušiny v odebraných vzorcích. Dále byla prováděna filtrace, měření nerozpustných látek (NL) a odstředění dezintegrovaného a nedezintegrovaného ZNK.

Stanovení odvodňovacích vlastností kalu metodou měření času kapilárního sání CST

Pro měření hodnoty odvoditelnosti kalu byl použit přístroj Triton Electronics TYPE 304M CST a filtrační papír CST PAPERS 200 APPROX. Stanovení CST spočívá v nahrazení tlakového spádu, potřebného k filtraci přepážkou, sací silou vhodného filtračního papíru, kterým je filtrát sorbován. Rychlost sorpce závisí hlavně na odvoditelnosti kalu, na sací síle filtračního papíru a na teplotě.

Přístroj Triton Electronics TYPE 304M CST se skládá ze dvou tlustostěnných dílu, mezi které se vkládá filtrační papír, kruhové zásobní nádobky na vzorek vnitrního průměru 10 nebo 18 mm ve tvaru dutého válce a tří pevných měřících kontaktů.



Obr. 16 Triton Elektronics TYPE 304M CST

Stanovení obsahu sušiny kalu

Pro měření obsahu sušiny v kalu byla použita sušící váha KERN s maximálním rozsahem do 50 g a přesností 0,001 g. Při měření obsahu sušiny byly vzorky sušeny při teplotě 105 °C na hliníkových miskách. Doba sušení kalu je závislá na hmotnosti sušeného vzorku a obsahu vlhkosti.

Obr. 17 Sušící váha KERN

Posouzení odvoditelnosti odstředěním

Pro měření odvodňování kalu byla použita Centrifuga MPW - 340 s maximálním výkonem 5000 ot/min. Při odvodňování kalů centrifuga pracuje na principu odstředivé síly. Vzorek kalu je odstředivou silou vytlačován k plášti kádinky, ve které se nachází. Těžší část se usazuje ve spodní části kádinky a odstředěná kapalina se vytlačuje na povrch. Poměr odstředěného kalu a fugátu je dán zvolenými otáčkami a dobou odstředění.

Obr. 18 Centrifuga MPW-340

6.2 Popis měření dezintegrace kalu

V této části je shrnut průběh měření dezintegrace ZNK, včetně všech použitých metod měření. Celkem bylo provedeno deset měření ZNK. Pro stanovení hledaných závislostí a vlastností byly zvoleny teploty dezintegrace 60, 90, 120, 150 a 180 °C. Jak bude diskutováno později, skutečná teplota kalu v reaktoru byla o něco nižší něž ta zvolená.

Prvním krokem každého měření bylo zjištění obsahu sušiny daného vzorku ZNK na sušících vahách. Vzorek byl po promíchání naléván na hliníkovou misku. Před sušením bylo nutné vzorek rozprostřít po celé ploše misky, kdyby se tak neprovedlo, vzorek by mohl obsahovat po vysušení stopy vlhkosti. Poté byla miska vložena do sušící váhy a vysoušena při teplotě 105 °C. Hmotnost vzorků byla v rozmezí 15 – 20 g a doba sušení nepřesahovala 30 minut.

Pro stanovení odvoditelnosti kalu byla zvolena metoda měření času kapilárního sání (CST). ZNK byl do kruhového zásobníku naléván skleněnou trubicí. Hmotnost vzorků byla přibližně 7 g. Pro všechna měření byl zvolen kruhový zásobník o průměr 18 mm a filtrační papír typ CST Papers 200 APPROX.

Měření obsahu sušiny a CST ZNK byly vždy provedeny na začátku každého experimentu. Následovala dezintegrace ZNK. Promíchaný kal byl pomocí trychtýře nalit do tlakové nádoby. Nádoba byla uzavřena a víko dotaženo osmi šrouby, po celém obvodu nádoby se nachází těsnění viz obr. 19.

Obr. 19 Tlaková nádoba a manometry teploty a tlaku

Poté byl napojen kompresor (kompresor byl napojen k horní části víka), pomocí regulačního ventilu byl nastaven v tlakové nádobě tlak 0,8 MPa (viz obr. 19) a na termostatu byla nastavena zvolená teplota dezintegrace. Po důkladné kontrole těsnění tlakové nádoby a termostatu byl kal ohříván.

Doba ohřevu kalu záležela na teplotě dezintegrace. Při dosažení teploty v reaktoru o 20 °C méně než byla stanovená teplota dezintegrace, se ohříval kal ještě 60 min. Po vypršení této doby byla dezintegrace ukončena.

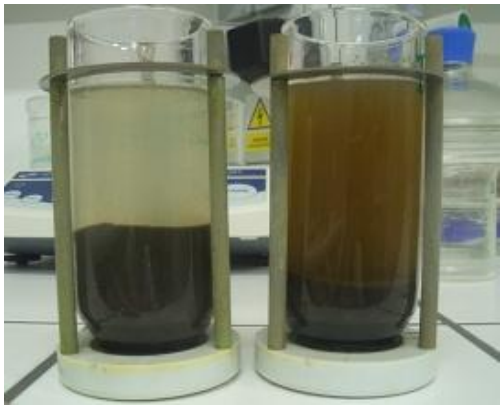
V průběhu ohřívání kalu byl tlak z nádoby odpuštěn (provedeno při dosáhnutí poloviny teploty dezintegrace). Následně byl kompresor přepojen z horní části do dolní části nádoby a byl znovu nastaven tlak v nádobě na 0,8 MPa. Bylo tak provedeno, aby při dopouštění tlaku z dolní části došlo k promíchání kalu. Tím bylo dosaženo zkrácení doby ohřevu v důsledku lepšího prostupu tepla.

Dezintegrace ZNK probíhala od 60 – 180 °C, pokud teplota dezintegrace překročila 100 °C, bylo nutné po skončení dezintegrace kal chladit na teplotu v rozmezí 80 – 90 °C, aby bylo možné s kalem provádět daná měření. Doba chlazení záležela na dosažené teplotě dezintegrace, pohybovala se v rozmezí 30 – 60 min. Po ukončení dezintegrace kalu (příp. chlazení) byl tlak odpuštěn a odděláno víko nádoby. Dezintegrovaný kal byl promíchán a vypuštěn do nerezové nádoby. Poté bylo provedeno změření teploty, obsahu sušiny a CST kalu.

Následovalo odvodnění kalu metodou podtlakové filtrace. Filtrace probíhala zároveň pro nedezintegrovaný i dezintegrovaný ZNK. Filtrace byla prováděna na filtračním papíře ze skleněných vláken, který byl umístěn v Büchnerově nálevce o průměru 140 mm. Podtlak byl vyvolán vodní vývěvou. Před začátkem samostatné filtrace byla na digitální váze nejprve zvážena Petriho miska, Petriho miska + filtr o průměru 125 mm a Petriho miska + navlhčený filtr. Poté byla provedena filtrace kalů, viz obr. 20. Množství filtrovaných vzorku bylo v první fázi měření 200 ml a v druhé 80 g a doba filtrace byla stanovena na jednu hodinu, dle normy DIN-EN 14701-2:2006; Teil 2: Bestimmung des spezifischen Filtrationswiderstands (Charakterizace kalů - Filtrační vlastnosti - Část 2: Stanovení specifického filtračního odporu). Po ukončení filtrace byly vzorky i s filtračním papírem vyjmuty z Büchnerovi nálevky a vloženy zpět na Petriho misky. Vzorky byly zváženy a vloženy do horkovzdušné sušárny na dobu 8 - 10 hodin. Po vyndání ze sušárny byly vzorky opět zváženy i s filtračním papírem.

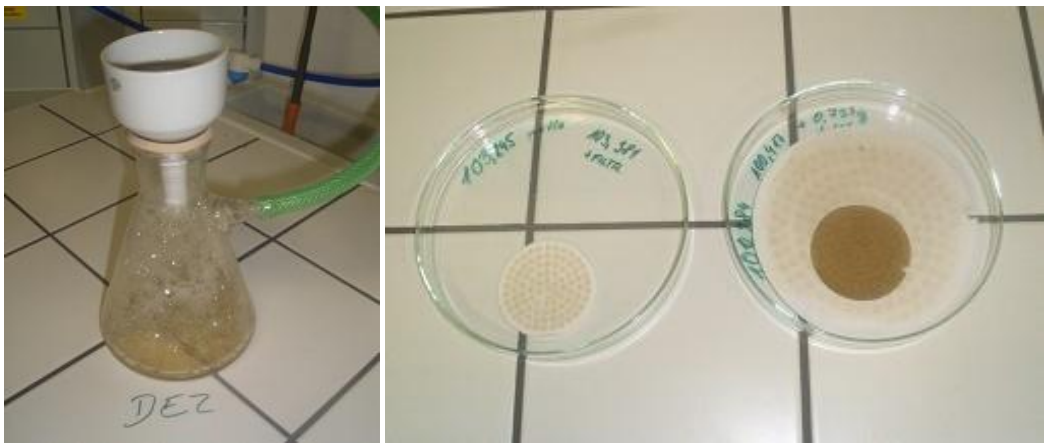
Obr. 20 Filtrace kalu

Dalším krokem bylo odvodnění kalu na centrifuze. Odstředění kalu se provádělo při otáčkách 1500 ot/min po dobu 10 minut a probíhalo pro oba vzorky (dezintegrovaný i nedezintegrovaný) zároveň. Množství vzorku bylo v první fázi 80 ml a ve druhé 80 g. Před odstředěním kalu byla Petriho miska s prázdnou kádinkou zvážena. Po odstředění byl fugát slit do kádinek a použit při měření nerozpuštěných látek (NL). Odstředěný kal byl pomocí laboratorní lžíce vybrán na Petriho misku a i s kádinkou zvážen a poté vložen do horkovzdušné sušárny na dobu 8 - 10 hodin. Po vyndání ze sušárny byly vzorky opět zváženy.



Obr. 21 Nedezintegrovaný (vlevo) a dezintegrovaný (vpravo) ZNK

Poslední měření se týkalo stanovení NL ve fugátu, byla zvolena metoda podtlakové filtrace na filtračním papíře ze skelných mikrovláken a Büchnerově nálevce o průměru 60 nebo 140 mm. Podtlak byl vyvolán vodní vývěvou. Před filtrací byly zváženy Petriho misky s filtračními papíry s průměry 55 mm pro nedezintegrovaný ZNK a průměrem 125 mm pro dezintegrovaný kal. Po skončení filtrace byly filtrační papírky vyjmuty z Büchnerovi nálevky a vloženy zpět na Petriho misky. Následně byly zváženy a vloženy do horkovzdušné sušárny na dobu 8 - 10 hodin. Po vyndání ze sušárny byly vzorky opět zváženy. Pro dezintegrovaný kal se používala Büchnerova nálevka a filtrační papír s větším průměrem, protože docházelo k „zacpání“ filtru z důvodu většího množství fugátu.



Obr. 22 Filtrace NL u dezintegrovaného kalu a Petriho miska + filtrační papírky

Diskuze teploty dezintegrace

Teplota ZNK při dezintegraci nedosáhla vždy zvolené teploty dezintegrace. Tab.10 zobrazuje skutečně dosažené teploty v kalu při dezintegraci.

Teplota [C°]	ZNK I (odběr 8.12.2008)					ZNK II(odběr 11.2.2009)				
Termooleje	60	90	120	150	180	60	90	120	150	180
V tlakové nádobě	48	78	106	126	136	48	78	104	137	170

Tab.10 Teploty dezintegrace ZNK

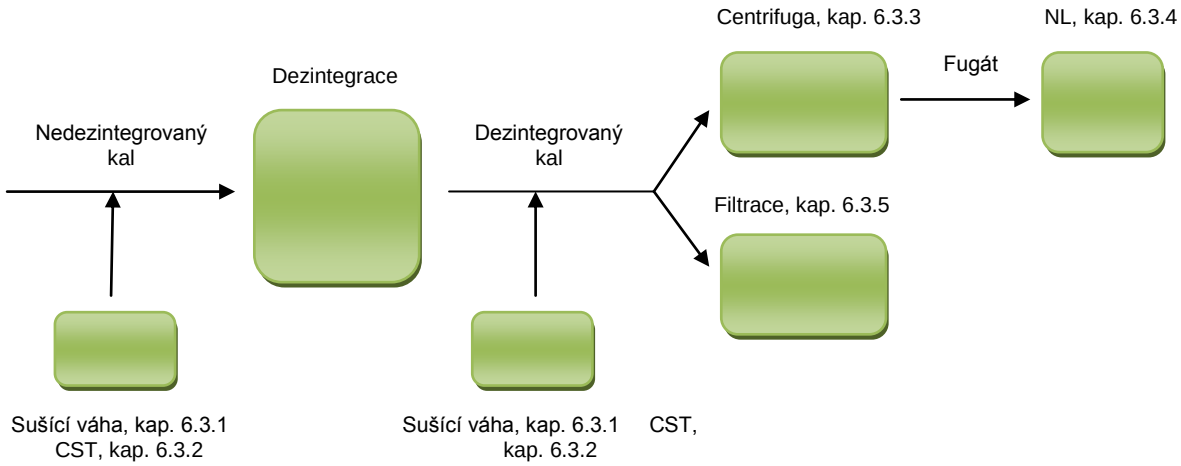
Rozdíly mezi teplotou termooleje (odečteno z teploměru umístěného v termostatu) a kalu v tlakové nádobě byly způsobeny následujícími faktory.

- Tlaková nádoba není vybavena mícháním, proto je prostup tepla kalem velmi pomalý
- Kal se nenechával temperovat na požadovanou teplotu, protože měření by pak bylo neúměrně dlouhé

Rozdíly ve zmírněných teplotách je však možné jednoduše odstranit, tak že tlaková nádoba bude vybavena mícháním. Návrh vhodného způsobu míchání tlakové nádoby je uveden v kapitole 7.

6.3 Výsledky měření a jejich vyhodnocení

Následující kapitola je věnována porovnání výsledku dezintegrace kalu při teplotách 60, 90, 120, 150 a 180 °C.



Obr. 23 Zjednodušené schéma průběhu měření

6.3.1 Vliv dezintegrace na obsah sušiny

Při měření obsahu sušiny ZNK bylo zjištěno, že obsah sušiny před a po dezintegraci kalu zůstává až na nepatrné odchylky relativně stejný a pohybuje se v rozmezí 2,77 - 4,81 % sušiny.

Průměrný obsah sušiny u ZNK I (odběr 8. 12. 2008) byl 3,63 %, po dezintegraci byl 3,63 %. U ZNK II (odběr 11. 2. 2009) byl 4,660 % a po dezintegraci 4,66 %. Velké rozmezí obsahů sušin u ZNK, bylo způsobeno odběrem vzorků ve dvou odlišných obdobích. Následující tab.11 ukazuje naměřené obsahy sušin u ZNK před a po dezintegraci.

Složka	ZNK I odběr 8.12.2008					ZNK I	ZNK II odběr 11.2.2009					ZNK II
Datum	9.12.	10.12.	11.12.	12.12.	15.12.		11.2.	12.2.	19.2.	16.2.	23.2.	
Teplota termooleje [°C]	60	90	120	150	180	Průměr	60	90	120	150	180	Průměr
Skutečná teplota kalu [°C]	48	78	106	126	136		48	78	104	137	170	
Obsah sušiny u ZNK před dez. [%]	4,229	3,534	3,305	4,330	2,773	3,634	4,717	4,738	4,589	4,620	4,639	4,661
Obsah sušiny u ZNK po dez. [%]	4,275	3,598	3,339	4,240	2,721	3,635	4,810	4,803	4,677	4,530	4,520	4,668

Tab.11 Obsah sušiny u ZNK před a po dezintegraci

6.3.2 Vliv dezintegrace na CST

Při měření CST bylo zjištěno, že ZNK po dezintegraci mění podstatně své vlastnosti, což se projevilo i na odvoditelnosti. Se zvyšující se teplotou dezintegrace kalu se rychlost sorpce podstatně prodlužuje. Pro srovnání byla odvoditelnost kalu měřena vždy před a po dezintegraci kalu.

CST u nedezintegrovaného ZNK byla naměřena v rozmezí 20 – 100 s a pro dezintegrovaný kal 100 – 700 s, pro průměr kruhového zásobníku 18 mm. Výjimkou byla dezintegrace při teplotě 180 °C (skutečná teplota 170 °C), kdy CST dosáhla pouze 30,7 s. Bylo to pravděpodobně způsobeno dosažením nejvyšší teploty dezintegrace, kdy kal změnil své specifické vlastnosti (silný zápach, hustotu, vlastnosti podobné vodě).

Měření dezintegrovaného kalu probíhalo hned po vypuštění z nádoby. Byl dán předpoklad pro praxi, že kal jde bezprostředně po dezintegraci na odstředění. Dezintegrovaný kal byl tedy podroben CST při teplotách 60 – 180 °C, zatímco nedezintegrovaný kal měl obvykle teplotu 20 °C. vzhledem k tomu, že výsledky CST jsou porovnávány (jedná se o komparativní metodu), je nutné vzít tento fakt na vědomí. Teplota kalu totiž hodnoty CST ovlivňuje, protože ovlivňuje viskozitu kalu. Výsledky jsou zobrazeny v tab.12.

Zhodnocení výsledků CST:

Metoda CST nám jasně ukazuje, že termická dezintegrace byla účinná. Došlo z rozbití částic na menší, které způsobili zacpání filtru a prodloužení doby sorpce.

Složka	ZNK I odběr 8.12.2008					ZNK II odběr 11.2.2009				
Datum	9.12.	10.12.	11.12.	12.12.	15.12.	11.2.	12.2.	19.2.	16.2.	23.2.
Teplota dezintegrace [°C]	60	90	120	150	180	60	90	120	150	180
Skutečná teplota [°C]	48	78	106	126	136	48	78	104	137	170
Průměr kruhového zásobníku [mm]	10	10	18	18	18	18	18	18	18	18
Teplota ZNK [°C]	11	11,3	11,3	14,6	14,9	12,1	14	10,3	10,6	11,5
Teplota ZNK po dez. při měření CST [°C]	47,3	47,3	75,5	73	64	47,6	78,5	82,8	85	94
Hodnota CST u ZNK [s]	251,2	153,5	29,7	55,6	23,7	47,8	56,5	83	76,4	105,7
Hodnota CST u ZNK po dezintegraci [s]	800,5	0	480,5	612,1	147,9	112,1	687,6	646,5	349,1	30,7
Rozdíl hodnoty CST [%]	318,7	-	1618	1101	624,1	234,5	1217	778,9	456,9	29,04

Tab.12 Výsledky CST

Dne 10. 12. 2008 při měření teploty dezintegrace 90 °C chybí údaj CST. Bylo to způsobeno nedostačujícím rozmezím měřícího přístroje. Při měření bylo použito kruhového zásobníku s průměrem 10 mm, proto pro všechna další měření byl zvolen kruhový zásobník s průměrem 18 mm.

6.3.3 Vliv dezintegrace na odstředitelnost kalu

Při měření obsahu sušiny v odstředěném kalu byly vždy srovnávány vzorky ZNK před a po dezintegraci. Obsah sušiny v odstředěném kalu před dezintegrací byl v rozmezí 5,7 - 6,7 % a po dezintegraci 6,0 – 14,5 %.

U druhé série dezintegrace kalu byla měřena také výška odstředěného kalu a fugátu v použité kyvetě. Průměrná výška fugátu u nedezintegrovaného kalu byla 21,8 mm a u dezintegrovaného 36,4 mm. Podrobné výsledky analýzy odstředěného kalu jsou shrnuty v příloha 1 a příloha 2 a zobrazeny v graf. 3 a graf. 4.

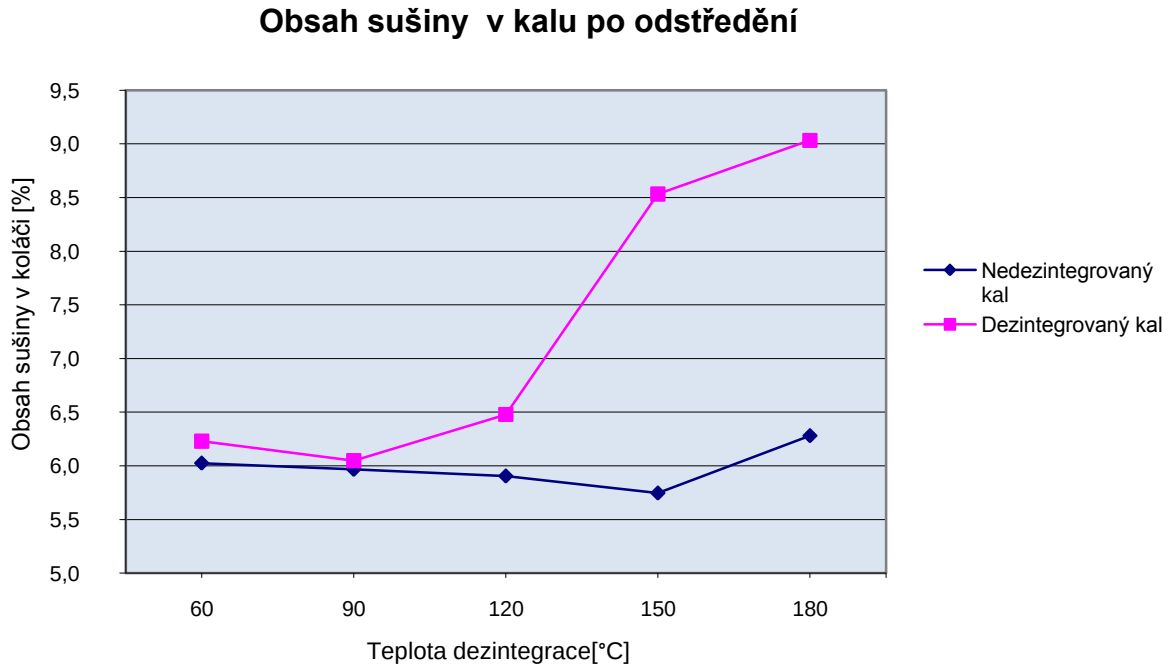
Vztah pro výpočet obsahu sušiny v koláči:

$$D_{ZNK} = \frac{m_{VOK,M} - m_M}{m_{OK,M} - m_M} \cdot 100 = \frac{m_{VSK}}{m_{OK}} \cdot 100$$

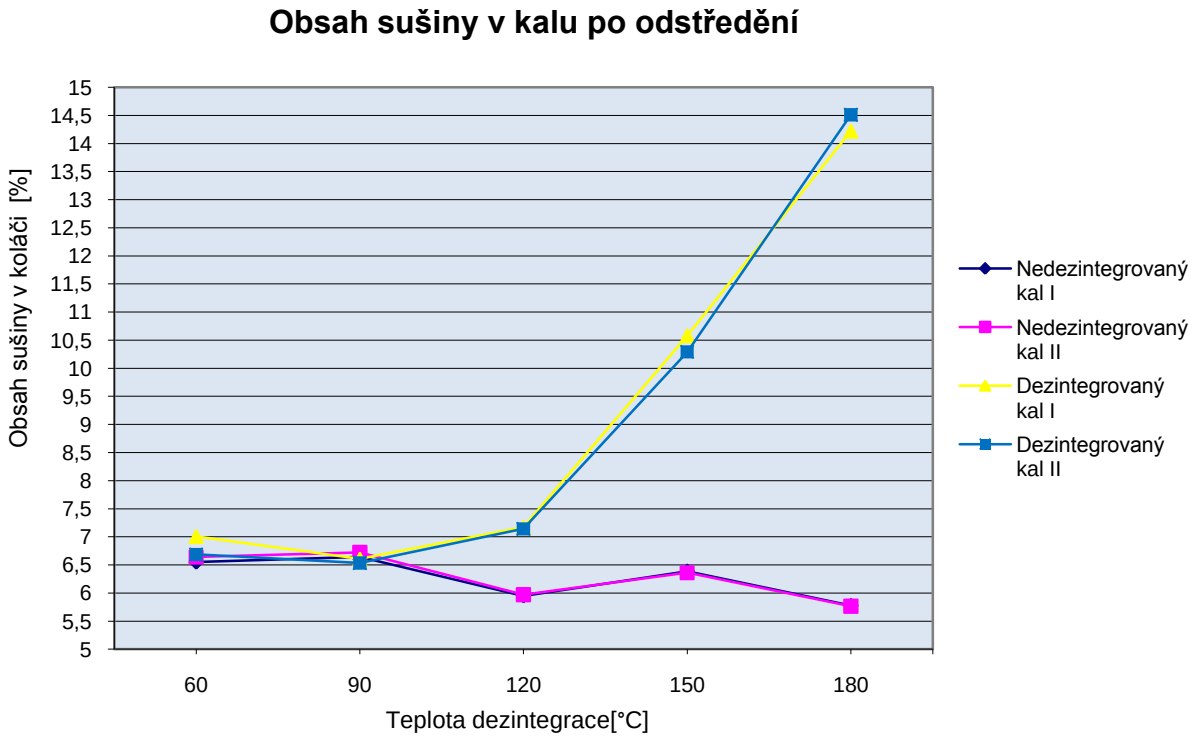
- D_{ZNK} obsah sušiny v odstředěném koláči
- $m_{VOK,M}$ hmotnost vysušeného odstředěného kalu + miska
- $m_{OK,M}$ hmotnost odstředěného kalu + miska
- m_M hmotnost misky
- m_{VSK} hmotnost vysušeného odstředěného kalu
- m_{OK} hmotnost odstředěného kalu

Při změně teploty dezintegrace byly zjištěny následující poznatky:

- Obsah sušiny v odstředěném kalu roste se zvyšující teplotou dezintegrace.
- Hmotnost odstředěného kalu s rostoucí teplotou dezintegrace klesá, objem fugátu se zvyšuje.
- Nejvyššího obsahu sušiny u odstředěného kalu bylo dosaženo při teplotě dezintegrace 150, resp. (137) °C a 180, resp. (170) °C, kdy obsah sušiny v koláči dosáhl 10,6 a 14,5 %.
- Nejnižší hmotnosti odstředěného kalu bylo rovněž dosaženo při teplotě dezintegrace 150, resp. (137) °C a 180, resp. (170) °C, hmotnost byla 29,39 a 18,66 g, to bylo způsobeno větším objemem fugátu.
- Obsahy sušiny v odstředěném kalu dezintegrovaném při nižší teplotě byly až na malé odchylky stejný jako u nedezintegrovaného kalu.



Graf. 3 Závislost obsahu sušiny ZNK I na teplotě dezintegrace



Graf. 4 Závislost obsahu sušiny ZNK II na teplotě dezintegrace

6.3.4 Vliv dezintegrace na obsah NL ve fugátu získaném odstředěním

Rozdíl mezi fugátem z nedezintegrovaného a dezintegrovaného kalu byl patrný již pouhým vizuálním srovnáním (viz obr. 21). Při odstřeďování se u nedezintegrovaného kalu vytvořilo mezi usazenou suspenzí a fugátem mnohem ostřejší rozhraní. Fugát byl jen nepatrně zakalený, měl šedavou barvu. U dezintegrovaného kalu (zejména při vyšších teplotách dezintegrace) měl fugát barvu hnědou až černou, rozhraní mezi suspenzí a nugátem nebylo tak dobře patrné. Při filtraci z dezintegrovaného kalu pak docházelo k vytváření pěny ve filtrátu.

Samotná filtrace trvala déle při filtraci fugátu z dezintegrovaného kalu, zatímco filtrace fugátu z kalu nedezintegrovaného byla mnohem rychlejší (1 – 3 min). Pomalá filtrace fugátu z dezintegrovaného kalu byla způsobena ucpáváním pórů filtru malými částečkami, které při dezintegraci vznikaly, a které nepodlehly usazování při odstředění.

Výsledky z měření obsahu NL ve fugátu z dezintegrovaného a nedezintegrovaného kalu jsou uvedeny příloha 3 a příloha 4 a zobrazeny v graf. 5 a graf. 6.

Pro výpočet obsahu NL byl použit vztah:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$V_{fugátu} = \frac{m_{fugátu}}{\rho_{H_2O}}$$

$$NL = \frac{m_{zachycených\ částic}}{V_{NL\ fugátu}}$$

- $V_{fugátu}$ objem fugátu [m^3]
- $V_{NL\ fugátu}$ objem fugátu [l]
- $m_{fugátu}$ hmotnost fugátu [kg]
- ρ_{H_2O} hustota vody při 18 °C [kg/m^3]
- NL obsah NL ve fugátu [mg/l]
- $m_{zachycených\ částic}$ hmotnost zachycených částic na filtru [mg]

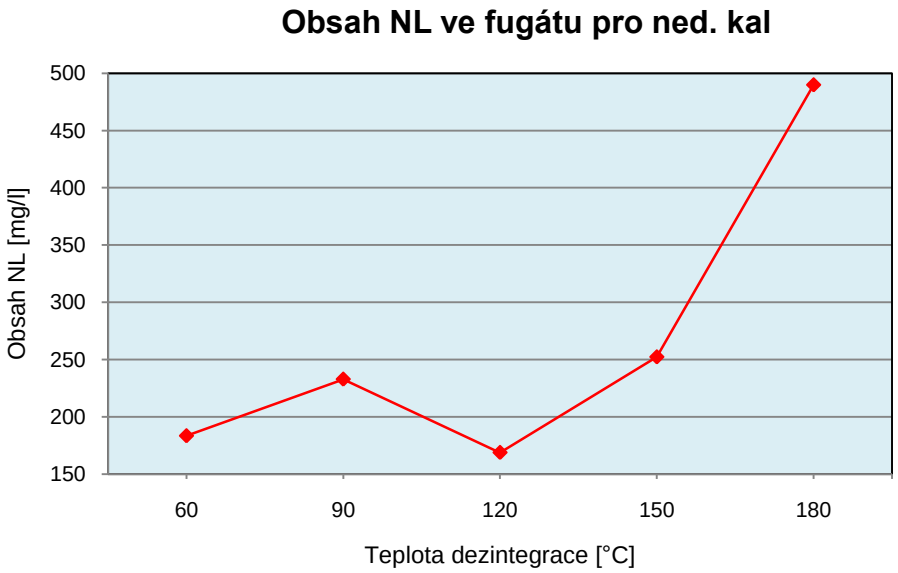
$1m^3 = 1000$ l

1g = 1000 mg

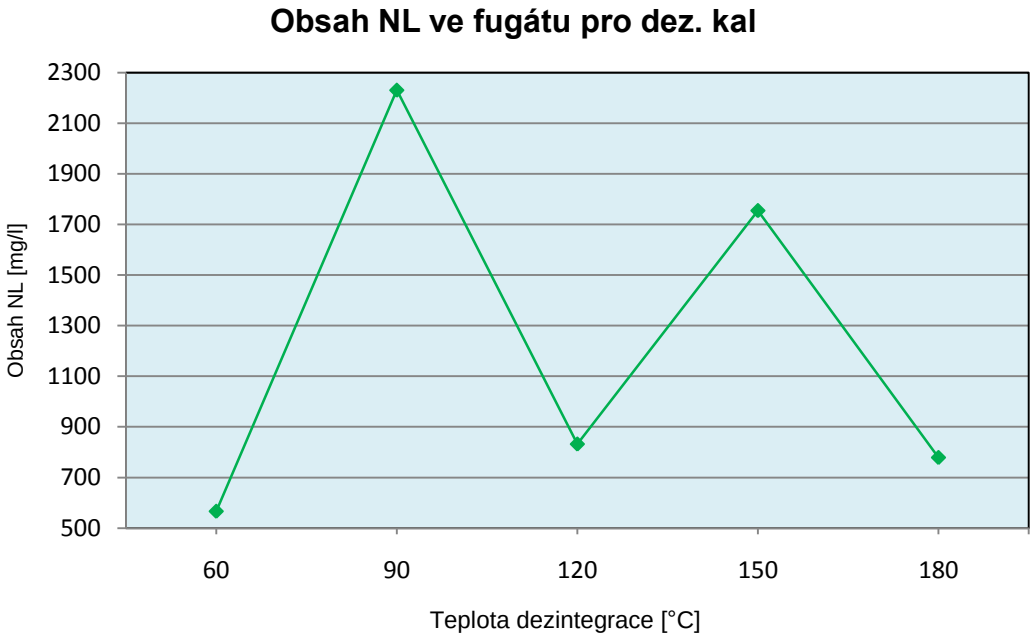
1kg = 1000 g

hustota vody při 18 °C = 998,59 kg/m^3

V příloha 3 chybí výsledky NL pro teploty dezintegrace 60 a 90 °C, protože měření NL bylo prováděno až od teploty dezintegrace 120 °C.



Graf. 5 Závislost obsahu NL ve fugátu ned. kalu na teplotě dezintegrace



Graf. 6 Závislost obsahu NL ve fugátu dez. kalu na teplotě dezintegrace

6.3.5 Vliv dezintegrace na obsah sušiny v koláči po filtraci

Filtraci byl podroben ZNK před a po dezintegraci. Průměrný obsah sušiny v koláči u nedezintegrovaného kalu byl 11,98 % a u dezintegrovaného 10,12 %. Výsledky jsou znázorněny v graf. 7 a příloha 5.

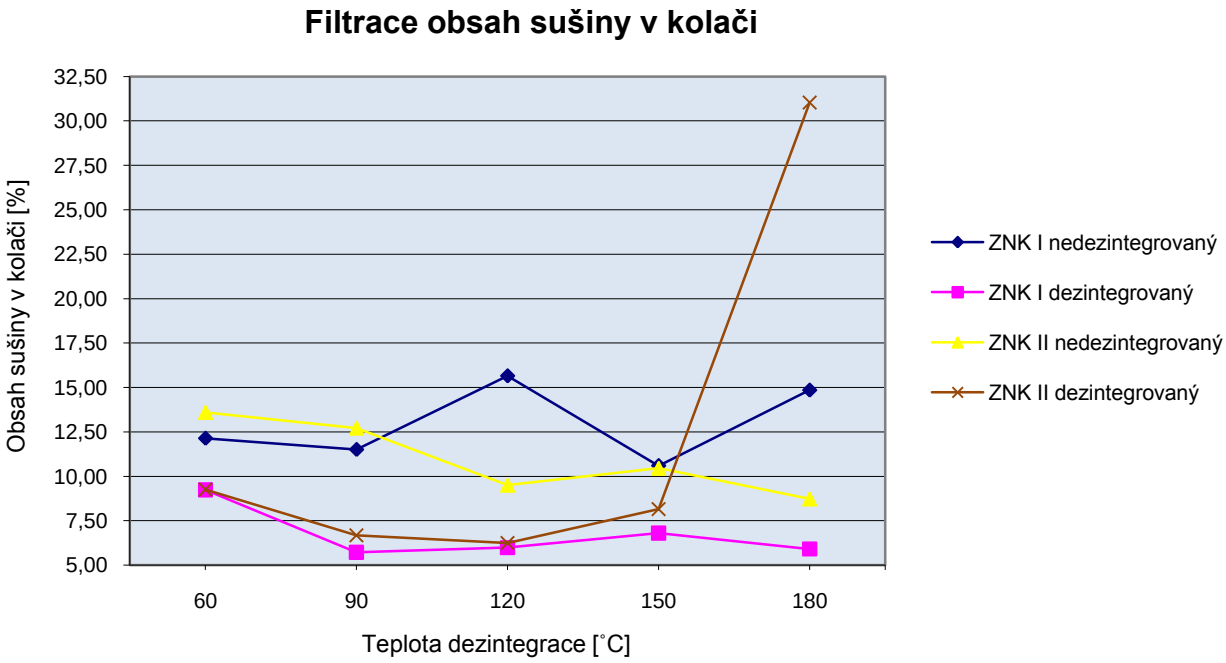
Vztah pro výpočet obsahu sušiny v koláči:

$$D_{ZNK} = \frac{m_{KV} - m_{M+F}}{m_{FK} - m_{M+MF}} \cdot 100 = \frac{m_{VK}}{m_{FK}} \cdot 100$$

- D_{ZNK} obsah sušiny v koláči
- m_{KV} hmotnost kalu po vysušení + miska + filtr
- m_{M+F} hmotnost misky + filtru
- m_{FK} hmotnost filtrovaného kalu + miska + mokrý filtr
- m_{M+MF} hmotnost misky + mokrý filtr
- m_{VK} hmotnost kalu po vysušení
- m_{FK} hmotnost filtrovaného kalu

Filtrace shrnutí:

- Nejvyšší obsah sušiny v koláči byl naměřen při teplotě dezintegrace 180 (170) ˚C, kdy dosáhl 31,03 %.
- Při filtraci dezintegrovaného kalu ve všech případech docházelo k zacpání filtru, proto k odvodnění kalu nedocházelo při filtrace, ale posléze v sušárně. Výjimkou bylo měření při teplotě 180 (170) ˚C, zde k zacpání filtru nedošlo. Proto byly ve většině případů obsahy sušin u dezintegrovaného kalu nižší v porovnání s nedezintegrovaným.



Graf. 7 Závislost obsahu sušiny ve filtračním koláči na teplotě dezintegrace

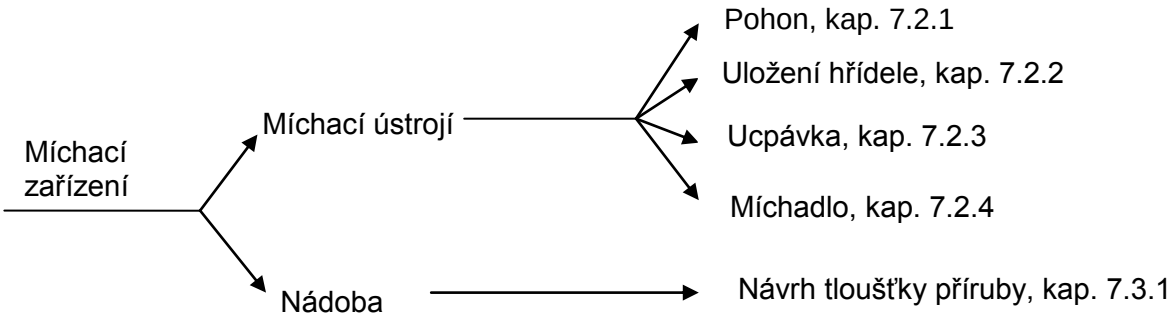
7. Návrh míchání tlakové nádoby

Tato kapitola je věnována návrhu míchání tlakové nádoby. Pro experimentální měření byla použita dvouplášťová tlaková nádoba bez míchání, ve které nebylo dosaženo rovnoměrného ohřevu celého objemu náplně. Z tohoto důvodu je výhodné míchání kalu při dezintegraci, které urychlí ohřev kalu a umožní dosáhnout vyšší teploty dezintegrace.

Zadané parametry tlakové nádoby pro experimentální měření:

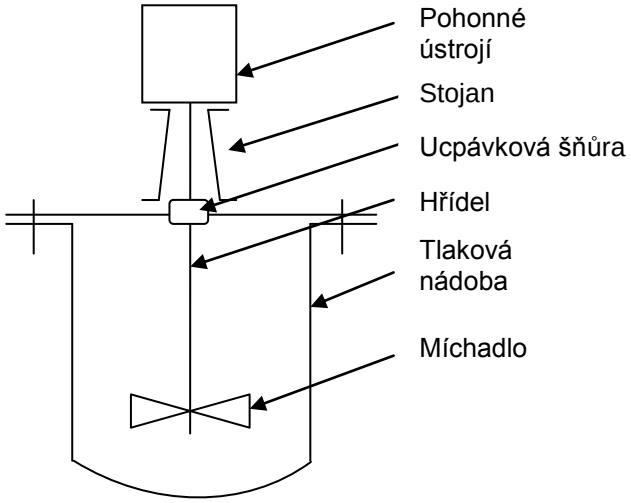
Maximální teplota	180°C
Maximální tlak v nádobě	1 MPa
Objem nádoby	4,2 l (nádoba zaplněna z 80 %)
Otáčky míchadla	7 ÷ 8 ot./s (vypočteno)
Průměr hřídele míchadla	20 mm (zvoleno)

Zjednodušený postup při návrhu míchacího zařízení:



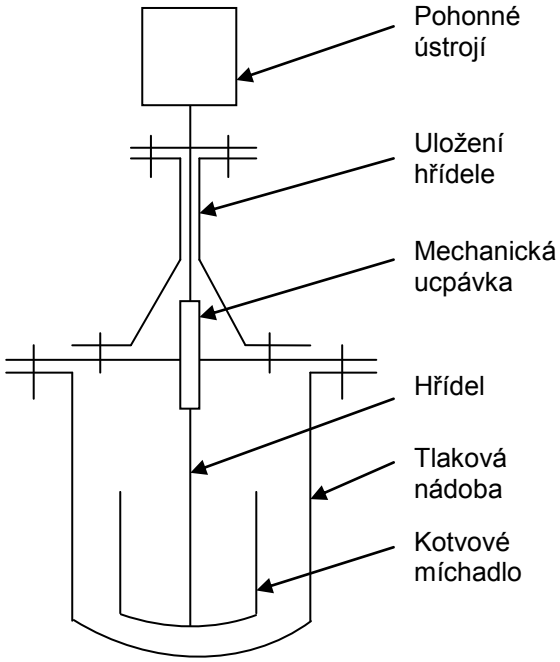
7.1 Varianty řešení

a) První varianta umožňuje promíchání kalu pomocí míchadla, ucpávkové šňůry a pohonného ústrojí. Zjednodušené schéma míchání kalu je na obr. 24.



Obr. 24 Schéma první varianty

b) Druhá a finální varianta je oproti první doplněná o mechanickou ucpávku, kotvové míchadlo a uložení hřídele. Mechanická ucpávka umožňuje míchání kalu při tlaku 10 bar. Kotvové míchadlo svým obrysem sleduje dno nádoby a je možné stírání usazenin ze dna. Používá se pro viskózní směsi a pro rychlosti 0,5 - 4 m/s. Zjednodušené schéma je na obr. 25.



Obr. 25 Schéma finální varianty

7.2 Míchací ústrojí

7.2.1 Pohon

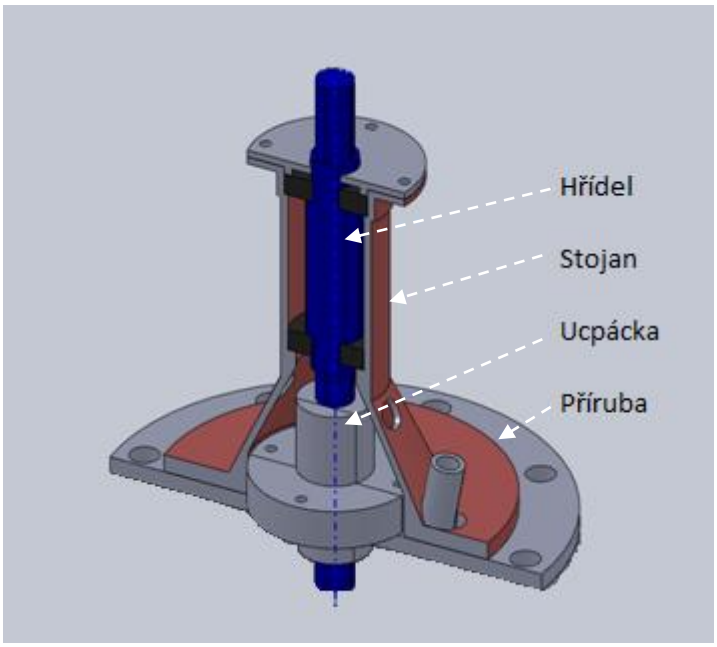
Pro míchání kalu je k dispozici hřídelová míchačka IKA RW 20 DIGTAL. Laboratorní míchačka řízená mikroprocesorem určená (se zobrazením aktuálních otáček 50 ÷ 2000 ot. / min. na displeji) pro středně viskózní kapaliny. Plynulý start zabraňuje rozstříknutí kapaliny.

7.2.2 Uložení hřídele

Uložení má zajistit přesné vedení hřídele, které umožní správnou funkci mechanické ucpávky. Hlavní části je stojan, ve kterém je hřídel uložena ve dvou jednořadých kuličkových ložiskách s kosoúhlým stykem. Pohyb hřídele ve svislém směru je v horní části zamezen víkem a v dolní části pojistným kroužkem. Stojan je doplněn sedmi otvory, které slouží pro nátrubky, k proplachování mechanické ucpávky a ke snadnému přístupu k unášecím šroubům mechanické ucpávky. Stojan je k přírubě připevněn pomocí čtyř šroubů. Zjednodušený nákres stojanu je zobrazen na obr. 26.

Použité součásti stojanu:

- jednořadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 7205 2Z
- pojistný kroužek 25 ČSN 02 2930
- 4 x šroub M6 x 16 ISO 4017 - 8,8
- 4 x šroub M6 x 18 ISO 4017 - 8,8
- 8 x matice M6 x 1 ISO 4032 - 05



Obr. 26 Uložení hřídele

Kontrola ložisek:

Byla zvolena jednořadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem 7205 2Z:

Síla na ložisko (dle [8]):

$$F = p \cdot S = p \cdot \frac{\pi \cdot D_{hr}^{\ 2}}{4} = 1 \cdot 10^6 \cdot \frac{\pi \cdot 0{,}02^2}{4} = 314{,}15\ N$$

Dynamické ekvivalentní zatížení (dle [8]):

$$F_e = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$
$$F_e = Y \cdot F_a = 314{,}15\ N$$

Základní hodinová trvanlivost (dle [8]):

$$L_h = \frac{16\,666}{n} \cdot \left(\frac{C}{F_e} \right)^p = \frac{16\,666}{10} \cdot \left(\frac{26818}{314{,}15} \right)^3 = 10{,}36 \cdot 10^8\ h$$
$$C = 26818\ N [8]$$

F síla na ložisko[N]

p maximální tlak v nádobě [MPa]

S plocha hřídele [mm^2]

D_{hr} průměr hřídele [mm]

C základní dynamická únosnost [N]

F_e dynamické ekvivalentní zatížení [N]

L_h základní hodinová trvanlivost [hod]

n otáčky ložiska [s^{-1}]

p mocnitel dle druhu ložiska (pro kuličková ložiska 3)

F_a axiální zatížení ložiska [N]

F_r radiální zatížení ložiska [N]

X, Y součinitel podle poměru

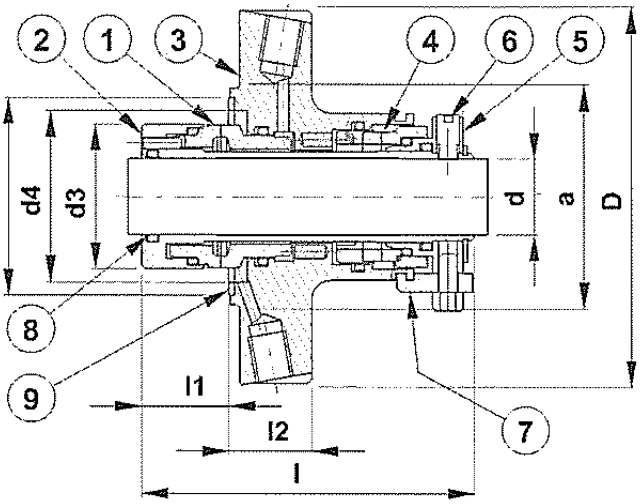
7.2.3 Ucpávka

Dle zadaných požadavků byla zvolena mechanická ucpávka HTC-B od Flowserve Czech Republic s. r. o. Jedná se o dvojitou mechanickou ucpávku, s možností proplachování pro lepší chlazení. Schéma mechanické ucpávky je na obr. 27.

Montáž mechanické ucpávky je snadná, hlavní parametry jsou nastaveny od výrobce.

Mechanická ucpávka HTC-B:

- mechanická ucpávka cartridge
- odlehčená, dvojitá
- nezávislá na smyslu otáčení hřídele
- sada vinutých pružin
- pružiny mimo těsnící medium
- limitní provozní parametry: p = 2 MPa
  t = 200 °C
  v = 20m/s (obvodová rychlost)



1. Mechanická ucpávka HTC
2. Unášecí pouzdro
3. Víko ucpávky
4. Koncová ucpávka
5. Unášecí kroužek
6. Unášecí šrouby
7. Příložka
8. O-kroužek
9. Těsnění

Obr. 27 Schéma mechanické ucpávky [28]

Hlavní rozměry mechanické ucpávky HTC-B pro průměr hřídele 20 mm:

(dle katalogu FLOWSERVE Flow Solutions Division – Výrobky HydroTechnik Olomoluc [28])

d	= 20 mm	l2	= 22 mm
d3	= 38 mm	l1	= 23 mm
$d4_{min}$	= 39 mm	D	= 90 mm
$d4_{max}$	= 46 mm	a	= 57 mm
d5	= 52 mm	s	= 14 mm
l	= 88 mm		

Upevnění mechanické ucpávky:

Pro uchycení mechanické ucpávky k přírubě byly zvoleny šrouby s válcovou hlavou a s vnitřním šestihranem. Kontrola šroubů byla vypočtena pro maximální tlak v nádobě 1 MPa.

Kontrola šroubů (dle [8]):

Byly zvoleny šrouby 4 x M6x40 8G ISO 4762.

$$F_{MU} = \frac{\pi \cdot D_{MU}}{4} \cdot p$$

$$F = \frac{F_{MU}}{i}$$

$$\sigma_{Dt} = (0{,}1 \div 0{,}3) \cdot \sigma_{Kt} = 0{,}3 \cdot \sigma_{Kt} = 0{,}3 \cdot 640 = 192\ MPa$$

$$S = \frac{F}{\sigma_{Dt}} = \frac{F_{MU}}{i \cdot \sigma_{Dt}} = \frac{\pi \cdot D_{MU} \cdot p}{4 \cdot i \cdot \sigma_{Dt}} = \frac{\pi \cdot 46 \cdot 1}{4 \cdot 4 \cdot 192} = 2{,}163 mm^2$$

Volím šrouby 4 x M6, které mají výpočtový průřez S = As = 27 mm^2.

$As_{vypočtený}$	≤	As
2,163	≤	27 → vyhovuje

σ_{Dt}	dovolené napětí v tahu [MPa]
σ_{kt}	mez kluzu [MPa]
F	síla v ose šroubu [N]
F_{MU}	síla na mechanickou ucpávku [N]
S, As	výpočtový průřez [mm^2]
D_{MU}	průměr mechanické ucpávky [mm]
i	počet šroubů [-]
p	tlak v nádobě [MPa]

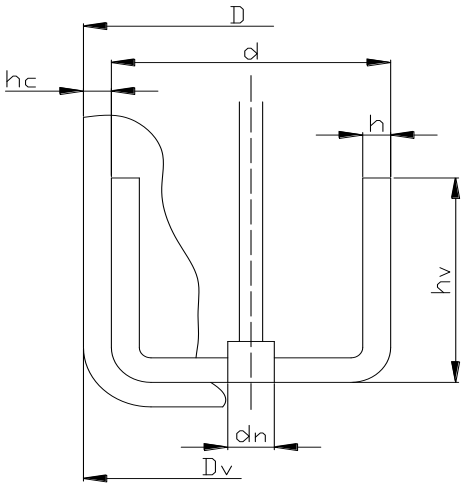
7.2.4 Míchadlo

Navržení rozměrů kotvového míchadla

Hlavní rozměry kotvového míchadla byly navrženy dle normy CVS 69 1014 Míchací zařízení – Kotvové míchadlo. Tato norma platí pro konstrukci kotvových míchadel s plochými rameny kolmými ke směru otáčení a stanoví rozměry, které mají podstatný vliv na hydrodynamický režim [27].

Hlavní rozměry kotvového míchadla [27]:

$d / D_V = 0{,}9 \pm 0{,}03$
$h_V / d = 0{,}89$
$h / d = 0{,}07$
$h_C / d = 0{,}053$



Obr. 28 Kotvové míchadlo

Vypočtené rozměry kotvového míchadla (dle [27]):

D_V = 135 mm (viz tlaková nádoba)
d = 120 mm
h_V = 110 mm
h = 10 mm
h_C = 7,5 mm
t = 3 ÷ 4 mm

Stanovení otáček kotvového míchadla:

Při návrhu kotvového míchadla byla uvažována hustoty a viskozity kalu při teplotě 20 a 50 °C. Dále byla použita norma pro kotvová míchadla [17] a [27].

Kotvová míchadla se navrhují pro obvodovou rychlost $v = 0{,}5 - 4\ m/s$.

Výpočet pro teplotu kalu 20 °C:

$$\eta = 0{,}049\ Pa \cdot s$$
$$\rho = 1000{,}95\ kg/m^3$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{0{,}049}{1000.95} = 4{,}895 \cdot 10^{-5}\ m^2/s$$
$$\mathrm{Re} = \frac{n \cdot d^2}{\nu} = \frac{6 \cdot 0{,}12^2}{4{,}895 \cdot 10^{-5}} = 1765$$

Z grafu pro příkonové charakteristiky pomaloběžných míchadel po odečtení získáme hodnotu příkonového kritéria. Pro kotvové míchadlo ON 691014b [27]:

$$P_O = 3{,}1$$

Frekvence otáčení míchadla:

$$n_V = \sqrt[3]{\frac{P}{P_O \cdot \rho \cdot d^5}} = \sqrt[3]{\frac{26}{3{,}1 \cdot 1000{,}95 \cdot 0{,}12^5}} = 6{,}95\ s^{-1}$$

$$v = \pi \cdot d \cdot n = \pi \cdot 0{,}12 \cdot 9{,}67 = 2{,}62\ m/s$$

$$Kontrola:$$
$$2{,}62 \le (0{,}5 - 4) m/s$$

Výpočet pro teplotu kalu 50 °C:

$$\eta = 0{,}028\ Pa \cdot s$$
$$\rho = 955{,}32\ kg/m^3$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{0{,}028}{955{,}32} = 2{,}931 \cdot 10^{-5}\ m^2/s$$
$$\mathrm{Re} = \frac{n \cdot d^2}{\nu} = \frac{6 \cdot 0{,}12^2}{2{,}093 \cdot 10^{-3}} = 2947$$

Z grafu pro příkonové charakteristiky pomaloběžných míchadel po odečtení získáme hodnotu příkonového kritéria. Pro kotvové míchadlo ON 691014b [27]:

$$P_O = 2$$

Frekvence otáčení míchadla:

$$n_V = \sqrt[3]{\frac{P}{P_O \cdot \rho \cdot d^5}} = \sqrt[3]{\frac{70}{2 \cdot 1000{,}95 \cdot 0{,}12^5}} = 8{,}05\ s^{-1}$$

$$v = \pi \cdot d \cdot n = \pi \cdot 0{,}12 \cdot 10{,}3 = 3{,}03\ m/s$$

Kontrola :

$3{,}03 \leq (0{,}5 - 4) m/s$

η	dynamická viskozita [Pa.s]
ρ	hustota kalu [kg/m^3]
ν	kinetická viskozita [m^2/s]
Re	Reynoldsovo kriterium [-]
d	průměr kotvového míchadla [mm]
P_O	Příkonové kritérium [-]
P	max. výkon míchadla na hřídeli [W]
n	otáčky [s^{-1}]
n_V	otáčky vypočtené [s^{-1}]

Pro experimentální měření volím otáčky kotvového míchadla 7 s^{-1} do teploty kalu 50 °C nad 50 °C volím otáčky 8 s^{-1} a kotvové míchadlo 120 x 135 CVS 69 1014.2.

Spoj hřídele a kotvového míchadla:

Možné varianty spoje:

- Nalisováním + kolík
  - složitá montáž a demontáž spoje
  - kontrola kolíku na smyk a otlačení

- Závit na konci hřídele a závit uvnitř kotvovém míchadla
  - snadná montáž a demontáž spoje
  - samovolné dotahování spoje při míchání

Pro spojení hřídele a kotvového míchadla volím druhou variantu, která je lepší při využití u experimentálního měření pro snadnou montáž a demontáž. Volím opačný závit než směr otáčení kotvového míchadla, který nám zajistí samovolné dotažení míchadla.

7.3 Nádoba

Výpočet tloušťky příruby byl proveden pro plochá kruhová víka s otvorem. Byla vypočtena tloušťka příruby a provedena kontrola. Mezi přírubou a tlakovou nádobou bylo použito těsnění Gambrit AF-202 (parametry 180 °C a 40 bar). Součástí příruby jsou tři nátrubky, které slouží pro manometr, kompresor a pojistný ventil.

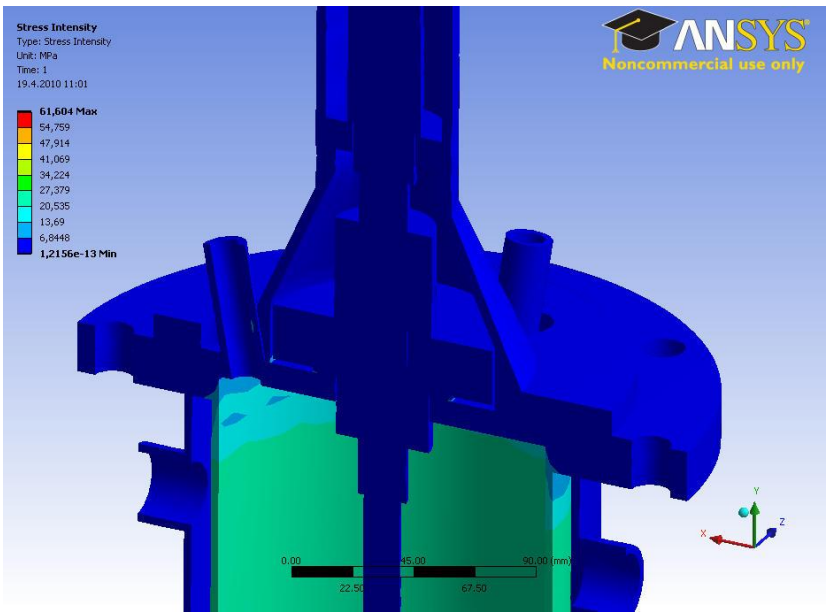
Model příruby byl nakreslen v programu SolidWorks a kontrolní zatížení poté provedena v programu Ansys.

Tlaková nádoba a příruba byla zatížena tlakem 10 bar. Na obr. 29, obr. 30 a obr. 31. je znázorněno rozložení zatížení tlakové nádoby vč. příruby vyvolané zvoleným tlakem.

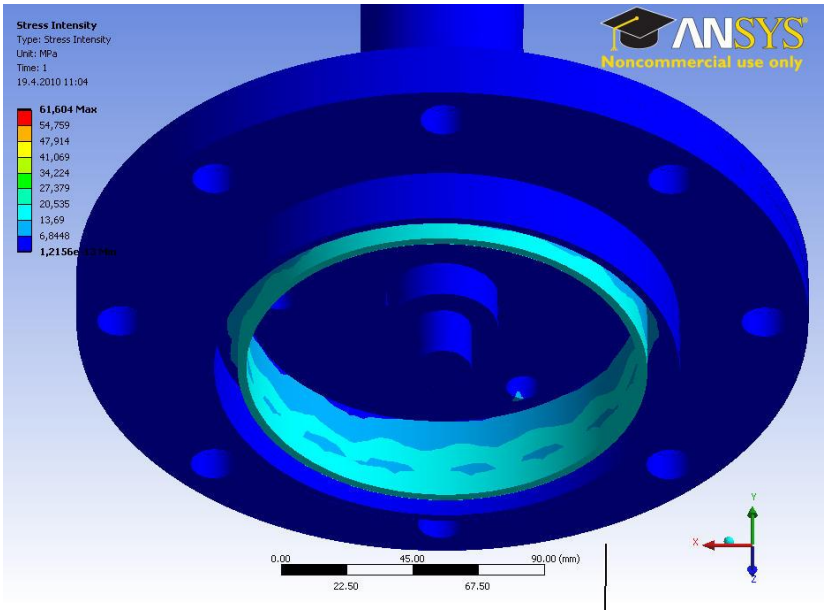
Zadané hodnoty:

průměr příruby	D = 250 mm
průměr otvoru příruby	d = 40 mm
provozní přetlak v nádobě	p = 10 bar
mez kluzu	Re = 180 ÷ 225 MPa
tloušťka příruby	s_1 = 10 mm (vypočteno dle [10])

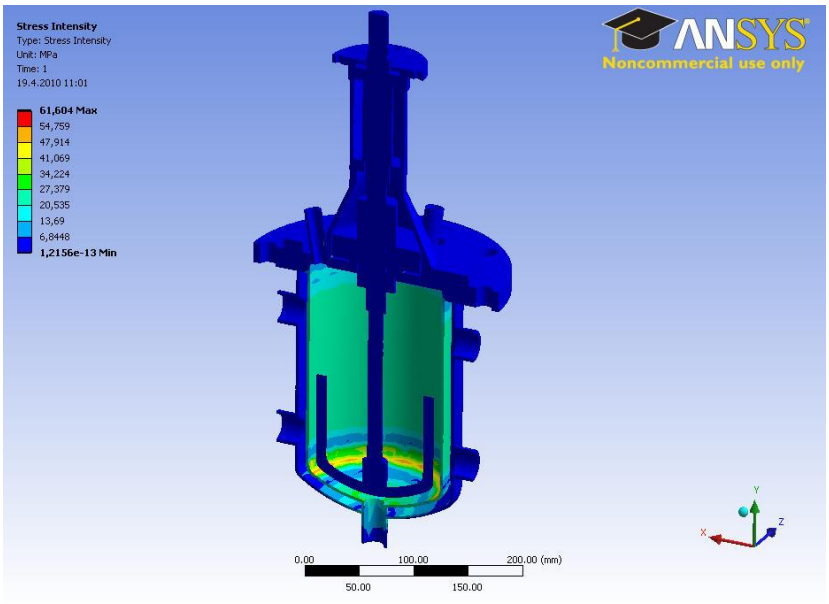
$$s_1 = 0{,}408 \cdot D \cdot \sqrt{\frac{D^3 - d^3}{D^2 \cdot (D-d)}} \cdot \sqrt{\frac{P}{\mathrm{Re}}} = 0{,}408 \cdot 250 \cdot \sqrt{\frac{250^3 - 40^3}{250^2 \cdot (250-40)}} \cdot \sqrt{\frac{1}{200}} = 7{,}85\ mm \Rightarrow 10\ mm$$



Obr. 29 Znázornění minimálního a maximálního napětí – horní detail



Obr. 30 Znázornění minimálního a maximálního napětí – řez tlakové nádoby



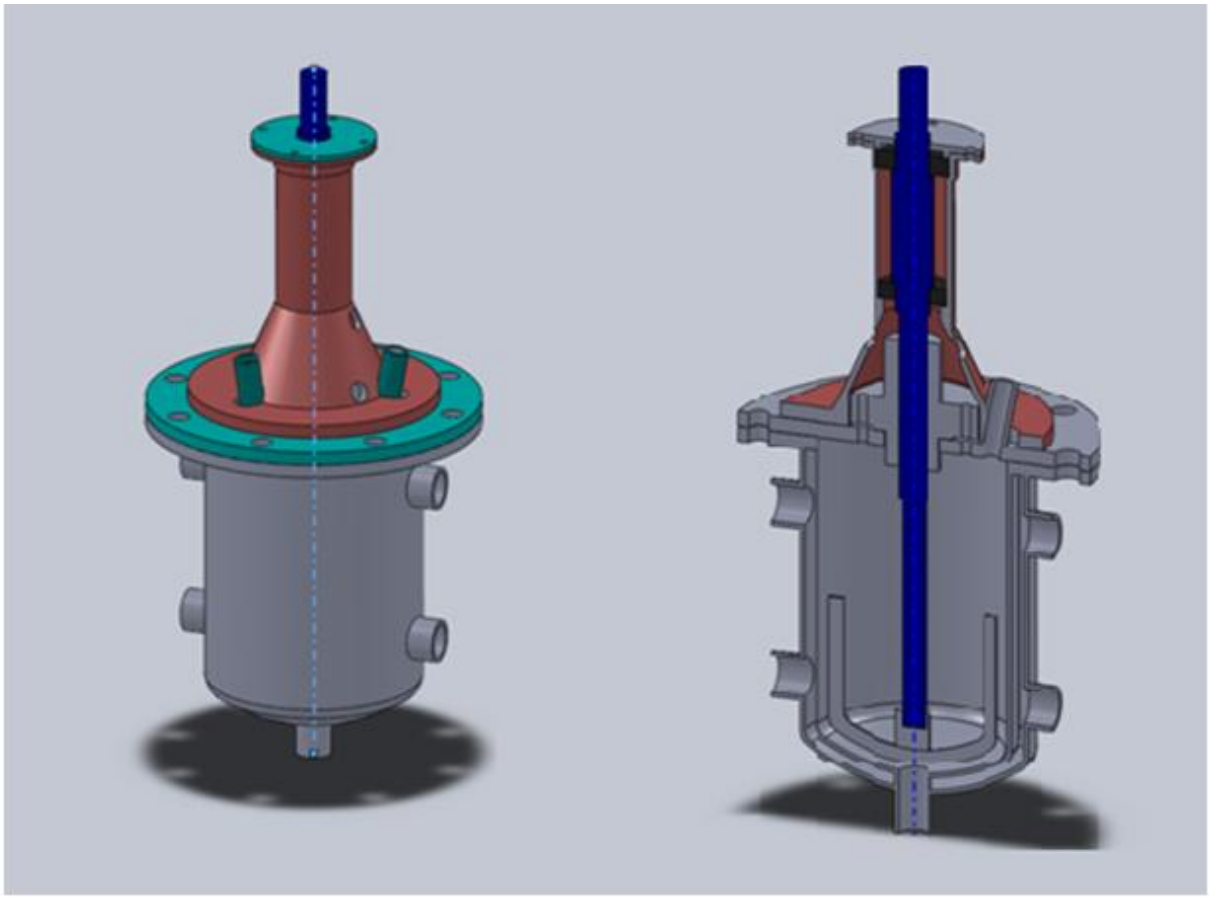
Obr. 31 Znázornění minimálního a maximálního zatížení – celkový pohled

Z předchozích obrázků je zřejmé, že vzhledem k modré barvě po celé ploše příruby je zatížení dokonale rozloženo po ploše a nezpůsobuje žádné deformace.

7.4 Finální verze míchacího zařízení

Návrh možného zlepšení dezintegrační jednotky, která je tvořena dvouplášťovou tlakovou nádobou, víkem, uložením pro hřídel, mechanickou ucpávkou, hřídelí a kotvovým míchadlem, je znázorněn na obr. 32. V tlakové nádobě je kal zahříván na maximální teplotu 180 °C, čímž dochází k dezintegraci. Uložení hřídele má zajistit přesné vedení hřídele k mechanické ucpávce. Mechanická ucpávka slouží pro správné těsnění přetlaku uvnitř nádoby a kotvové míchadlo k promíchání a urychlení ohřevu kalu a dosažení vyšší teploty dezintegrace.

Model míchacího zařízení byl nakreslen v programu SolidWorks.



Obr. 32 Finální verze dezintegrační jednotky

8. Závěr

Při pohledu na rychlost rozvoje lidské společnosti je jasné, že produkce kalů se neustále navyšuje a současné metody likvidace čistírenských kalů jsou již nedostačující. Z tohoto hlediska je potřeba nalézt nové metody likvidace, které jsou ekologicky i ekonomicky výhodné. Zde se naskytuje uplatnění pro metodu dezintegrace kalů.

V diplomové práci byla řešena metoda termické dezintegrace. Při této metodě dochází k zahřátí kalu na určenou teplotu dezintegrace, při čemž dosáhneme rozkladu buněk. Rozkladem dochází k lepšímu odvodnění a snížení objemu celkové produkce kalu. Experiment byl prováděn v tlakové nádobě při několika zvolených teplotách dezintegrace (60, 90, 120, 150 a 180 °C).

Z provedených měření dezintegrace zahuštěného nestabilizovaného kalu bylo zjištěno, že nejmenšího podílu obsahu sušiny bylo dosahováno při teplotách dezintegrace do 100 °C. Naopak vyššího podílu bylo dosahováno při teplotách nad 100 °C. Jako nejvýhodnější teplota dezintegrace použitelná v praxi se jeví teplota nad 140 °C, protože nejlepších výsledků odvodnitelnosti kalu bylo dosahováno při teplotách 137 a 170 °C při tlaku 0,8 Mpa. Dezintegrace se projevila pozitivně zejména při odvodňování kalu odstřeďováním, naopak odvodňování kalu filtrací bylo značně problematické.

Získané výsledky v kombinaci se zkušenostmi při průběhu měření a navržení dezintegrační jednotky byly využity pro vypracování ekonomické a energetické bilance nákladů na termickou dezintegraci [16].

Jako výraznou nevýhodu dezintegrace je nutné zmínit vysoký obsah nerozpuštěných látek ve fugátu po odstředění kalu. Na druhou stranu, při experimentech nebyl použit žádný flokulant, přičemž lze předpokládat, že výběrem vhodného flokulantu by bylo možné tento nedostatek eliminovat. Tímto směrem by také mohl být zaměřen další výzkum.

Veškeré výše popsané experimenty probíhaly v nemíchané tlakové nádobě, což vedlo k tomu, že v celém objemu kalu nebylo dosahováno zvolené teploty desintegrace. Proto je součástí této práce návrh na inovaci experimentální jednotky, která by spočívala ve výrobě nového víka osazeného míchadlem. K pohonu míchadla by bylo možné s výhodou použít hřídelovou míchačku IKA, která je v laboratoři k dispozici. Tato míchačka má vlastní stojan, proto by byla celá experimentální aparatura snadno rozebíratelná. Provedené experimenty by pak měly být zopakovány v míchané tlakové nádobě.

Použitá literatura

Monografie

[1] Pytl, V.: Příručka pro provozovatele čistírny odpadních vod. Vydání 1. Praha: 206 s. ISBN 80-239-2528-8

[2] KOLEKTIV.: sborník referátů. Možnosti využití kalů z ČOV v zemědělství. Vydání 1. Praha: VÚVR, 200, ISBN 80-238-5333-3

[3] Michal Dohányos, Jan Koller, Nina Strnadová: Čištění odpadních vod. 1. vydání. Praha, 1998. 177 s. ISBN 80-7080-207-3

[4] Medek, J.: Hydraulické pochody. 3. vyd. Brno: VUT Brno, 2000. 339 s. ISBN 80-214-0563-5

[5] Lubomír Mazel, Miloš Pokorný: Vodárny a čistírny. 2. přepracované vydání, VUT, Brno 1992. 149 s. ISBN 80-214-0473-6

[6] Alena Pecinová, Olga Halousicová: Kaly z čistíren odpadních vod. SEČ – Ústupky, Hotel Jezerka. 134 s. IBSN 80-86832-00-7

[7] Michal Dohányos, Václav kutil, Karel Hartig: Minimalizace produkce čistírenských kalů, Klatovy 2004, 100 s. ISBN 80-7280-208-4

[8] Jiří Zelený, Stavba strojů – strojní součásti, Vydání 1. Computer PressPraha, 2000, ISBN 80-7226-311-0

[9] Stanislav Vejvoda: Stavba chemických zařízení IIb. Pevnost a životnost tlakových nádob , Brno :VUT Brno,1987. 2. vyd. 196 s.

[10] Stanislav Vejvoda: Stavba procesních zařízení: Hodnocení odolnosti materiálů tlakových nádob proti jejich poškozování v provozních podmínkách , Brno:CERM,2002. 1. vyd. 107 s. ISBN 80-214-2302-1

[11] Jan Leinveber, Jaroslav Řasa, Pavel Vávra: Strojnické tabulky, Třetí doplněné vydání, Praha 1999, ISBN 80-7183-164-6

Vědecko-kvalifikační práce

[12] Boráň, J.: Příprava kalů z ČOV pro jejich energetické využití. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2003. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Martinák, Ph.D.

[13] Boráň, J.: Zpracování kalů z čistíren odpadních vod s energetickým využitím. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008. 127s. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík , CSc

[14] Žerava, Z.: Čistírenské kaly-současnost a budoucnost. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Boráň, Ph.D.

[15] Volejník, T.: Vliv specifické spotřeby fakulantu na odvoditelnost čistírenských kalu. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Boráň Ph.D.

[16] Brtna F.: Návrh dezintegrační jednotky. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2009. 107 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Boráň Ph.D.

[17] Burjanek F.: Termofyzikální vlastnosti čistírenských kalů. Diplomová práce: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2007. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lucie Houdková Ph.D.

Články v časopise

[18] Dohányos, M.:SOVAK. *Vliv dezintegrace na produkci bioplynu*, 2005, roč. 14, č. 11, s. 3-5, ISSN 1210-3039

[19] Dohányos, M.: Odpadové fórum. *Kaly z ČOV*, 2004, roč. 4, č. 05, s. 7, ISSN 1212-7779

[20] Beneš, J.: Dezintegrace čistírenského kalu, Sovak, 2000, č. 04,

[21] Statistická ročenka České republiky 2006 [online]. Praha: Český statistický úřad, 2006. Dostupné z <ww.czso.cz/csu/redakce.nsf/i/statisticke_rocenky_ceske_republiky>

[22] *ČOV Brno – Modřice*, [online]. Brno: Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.,2005. [cit. 2008-01-13]. Dostupné z: <http://www.bvk.cz/page.jsp?lang=cz&firstLevel=29&secondLevel=43&thirdLevel=45>

[23] Sbírka zákonů ČR

[24] Statistická ročenka České republiky 2009 [online]. Praha: Český statistický úřad, 2009. Dostupné z <ww.czso.cz/csu/redakce.nsf/i/statisticke_rocenky_ceske_republiky>

[25] Commenges-Bernole N., Marguerie J.: ScienceDirect.Ultresonics Sonochemistry, 2009. Dostupné z <ww.elevier.com/locate/ultsonch>

Firemní literatura (katalogy, výroční zprávy)

[26] Technický popis VTA Technologie GMBH, Weibern: 2008

[27] Míchací zařízení soubor norem on 69 1000 – 691039, Výzkumný Ústav chemických zařízení Brno, Generální ředitelství Brno

[28] Katalog výrobního programu HTO, Flowserve Flow Solutions Czech Republic s.r.o.

Seznam příloh:

Příloha 1. Vliv dezintegrace na odstředění u ZNK I

Příloha 2. Vliv dezintegrace na odstředění u ZNK II

Příloha 3. Výsledky NL ZNK I

Příloha 4. Výsledky NL ZNK II

Příloha 5. Výsledky obsahu sušiny ve filtračním koláči

Příloha 1: Vliv dezintegrace na odstředění u ZNK I

Složka	ZNK - odběr 8.12.2008									
Datum	9.12.		10.12.		11.12.		12.12.		15.12.	
Teplota dezintegrace [°C]	60		90		120		150		180	
Skutečná teplota [°C]	48		78		106		126		136	
Množství ZNK [ml]	80		80		80		80		80	
Druh kalu	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.
Miska+kádinka [g]	207,52	191,43	206,80	192,16	206,81	192,16	206,80	192,16	190,08	205,88
Miska+kádinka+odstředěný kal [g]	264,23	242,52	254,03	233,13	250,50	227,04	264,52	224,72	221,83	223,98
Vyšušený odstředěný kal [g]	210,94	194,61	209,62	194,64	209,39	194,42	210,12	194,94	192,07	207,51
Odstředěný kal [g]	56,71	51,09	47,23	40,97	43,69	34,88	57,72	32,57	31,75	18,10
Rozdíl odstředěného ned. a dez. Kalu [g]	5,62		6,26		8,80		25,15		13,65	
Obsah sušiny v kolači	6,0	6,2	6,0	6,0	5,9	6,5	5,7	8,5	6,3	9,0

Vysušený odstředěný kal = hmotnost Petřino misky + kádinky + vysušeného kalu

Příloha 2: Vliv dezintegrace na odstředění u ZNK II

Složka	ZNK - odběr 11.2.2009																			
Datum	11.2.				12.2.				19.2.				16.2.				23.2.			
Teplota dezintegrace [°C]	60				90				120				150				180			
Skutečná teplota [°C]	48				78				104				137				170			
Množství ZNK [g]	80				80				80				80				80			
Druh kalu	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II
Miska+kádinka [g]	193,59	193,03	192,65	192,22	193,58	193,02	192,64	192,21	193,58	193,02	192,64	192,21	193,59	193,03	192,64	192,22	193,57	193,02	192,63	192,21
Miska+kádinka+odstředěný kal [g]	251,43	249,29	245,01	247,06	251,84	250,46	248,00	247,86	255,13	254,54	240,61	241,00	252,69	252,15	222,04	222,81	258,48	258,33	212,04	210,87
Vyšušený odstředěný kal [g]	197,37	196,76	196,32	195,89	197,45	196,88	196,30	195,85	197,24	196,69	196,08	195,69	197,36	196,79	195,75	195,37	197,32	196,78	195,39	194,92
Odstředěný kal [g]	57,84	56,26	52,37	54,84	58,26	57,44	55,37	55,65	61,56	61,52	47,98	48,80	59,10	59,12	29,39	30,59	64,91	65,31	19,41	18,66
Rozdíl odstředěného ned. a dez. Kalu [g]	5,48		1,42		2,89		1,79		13,58		12,72		29,71		28,53		45,50		46,65	
Výška fugátu [mm]	24	22	26	23	24	23	25	24	23	22	30	29	23	22	49	47	18	17	56	55
Celková výška [mm]	81	81	81	80	81	82	82	81	82	82	82	82	81	81	81	81	81	81	81	79
Obsah sušiny v kolači	6,6	6,6	7,0	6,7	6,6	6,7	6,6	6,5	6,0	6,0	7,2	7,1	6,4	6,4	10,6	10,3	5,8	5,8	14,2	14,5

Vysušený odstředěný kal = hmotnost Petřino misky + kádinky + vysušeného kalu

Příloha 3: Výsledky NL ZNK I

Složka	ZNK - odběr 8.12.2008					
Datum	11.12.		12.12.		15.12.	
Teplota dezintegrace [°C]	120		150		180	
Druh kalu	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.
Miska+filtr [g]	103,966	101,008	103,381	100,417	103,582	101,009
Fugát [g]	32,555	39,013	17,924	41,727	44,513	58,355
Miska+filtr po vysušení [g]	103,974	101,041	103,382	101,198	103,631	101,061
Rozdíl [g]	0,008	0,033	0,001	0,781	0,049	0,052
Hodnota NL [mg/l]	245,24651	844,18015	55,679536	18679,464	1098,6004	889,3154

Příloha 4: Výsledky NL ZNK II

Složka	ZNK - odběr 11.2.2009																			
Datum	11.2.				12.2.				19.2.				16.2.				23.2.			
Teplota dezintegrace [°C]	60	60	60	60	90	90	90	90	120	120	120	120	150	150	150	150	180	180	180	180
Druh kalu	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II	Ned. I	Ned. II	Dez. I	Dez. II
Miska+filtr [g]	101,342	104,313	100,323	100,082	101,368	104,306	100,321	100,111	101,369	104,345	100,352	100,113	101,371	104,340	100,361	100,117	101,366	104,298	100,315	100,112
Fugát [g]	21,494	22,282	26,121	23,568	20,953	21,790	22,339	21,578	17,396	17,822	29,388	29,416	20,122	19,582	48,357	47,191	14,347	14,082	58,264	57,530
Misk+filtr po vysušení [g]	101,347	104,316	100,336	100,097	101,372	104,312	100,368	100,162	101,370	104,350	100,368	100,146	101,375	104,346	100,450	100,196	101,376	104,302	100,336	100,181
Rozdíl [mg/litr]	0,005	0,003	0,013	0,015	0,004	0,006	0,047	0,051	0,001	0,005	0,016	0,033	0,004	0,006	0,089	0,079	0,010	0,004	0,021	0,069
Hodnota NL [mg/l]	232,30	134,45	496,98	635,56	190,63	274,97	2100,98	2360,19	57,40	280,16	543,67	1120,26	198,51	305,97	1837,88	1671,69	696,03	283,65	359,92	1197,68
Průměr NL [mg/l]	183,37		566,27		232,80		2230,58		168,78		831,96		252,24		1754,79		489,84		778,80	

Příloha 5: Výsledky obsahu sušiny ve filtračním koláči

Složka	ZNK - odběr 8.12.2008										ZNK - odběr 8.12.2008									
Datum	9.12.		10.12.		11.12.		12.12.		15.12.		11.2.		12.2.		19.2.		16.2.		23.2.	
Teplota dezintegrace [°C]	60		90		120		150		180		60		90		120		150		180	
Skutečná teplota [°C]	48		78		106		126		136		48		78		104		137		170	
Množství ZNK [ml]	200		200		200		200		200		200		200		200		200		200	
Druh kalu	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.	Ned.	Dez.
Miska [g]	103,45	100,62	103,45	100,62	100,62	103,46	100,62	103,46	100,62	103,47	104,63	101,84	104,63	101,83	104,62	101,83	104,64	101,83	104,64	101,84
Miska+filtr [g]	104,31	101,55	104,31	101,55	101,55	104,38	101,52	104,37	101,55	104,41	105,36	102,56	105,38	102,58	105,39	102,59	105,39	102,59	105,39	102,59
Miska+mokrý filtr [g]	106,07	103,43	106,27	103,47	103,44	106,33	103,34	106,22	103,04	106,09	107,48	104,60	107,66	104,72	107,56	104,81	107,74	104,79	107,57	104,82
Filtrovaný kal [g]	178,06	187,93	166,19	215,98	145,71	200,28	185,02	215,77	137,48	178,68	174,52	200,28	179,94	240,33	201,39	244,85	194,13	204,74	209,69	125,98
Kal po vynušení [g]	113,0	109,4	111,20	107,99	108,17	110,00	110,17	111,82	106,66	108,70	114,47	111,42	114,56	111,64	114,30	111,33	114,42	110,74	114,31	109,16
Obsah sušiny v kolači[%]	12,14	9,24	11,50	5,72	15,66	5,99	10,59	6,80	14,85	5,91	13,59	9,26	12,71	6,68	9,50	6,24	10,45	8,15	8,73	31,03