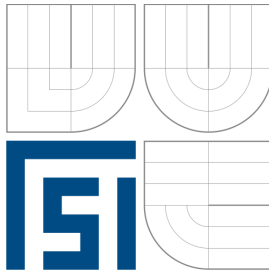




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

# NÁVRH DEZINTEGRAČNÍ JEDNOTKY ČISTÍRENSKÝCH KALŮ

DESIGN OF SLUDGE DISINTEGRATION UNIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. FILIP BRTNA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV BORÁŇ Ph.D.

BRNO 2009

## Abstrakt

První část diplomové práce je zaměřena na problematiku produkce kalů z komunálních čistíren odpadních vod a následným nakládáním s tímto kalem. V diplomové práci je popsán kompletně proces čištění odpadních vod. Zejména je podrobněji pojednáno o procesu probíhající ve vyhnívacích nádržích tedy procesu stabilizace, přičemž důraz je kladen na předúpravu (desintegraci) přebytečného aktivovaného kalu před samotnou stabilizací.

Druhá část této práce je zaměřena na návrh desintegrační jednotky čistírenských kalů s využitím experimentálních dat. Dle naměřených a zadaných údajů byla navržena tlaková nádoba. Na této nádobě byl dále proveden pevnostní výpočet, rozvaha o ohřevu a zpracována ekonomická bilance.

## Klíčová slova:

kaly, nakládání, čistírna odpadních vod, lyzát, desintegrace, odvodnění

## Abstract

The target of the first part of this diploma thesis is focused on the problems relating to the sludge production from the wastewater treatment plant and subsequent sludge treatment. In this thesis complete process of the wastewater treatment is described. Predominantly is described the process in digestion tanks, therefore stabilization process, whereas the paper is focused on sludge pre-treatment (disintegration) of waste activated sludge before stabilization.

The second part of this thesis is focused on the design of the disintegration unit for the wastewater treatment sludge in assist with experimental data. According to measured and fixed parameters the unfired pressure vessel has been designed. On the vessel has been further realized the strength calculation, the heat balance and the economic balance.

## Key words:

sludge, disposal, wastewater treatment plant, lick, disintegration, dewatering

## Bibliografická citace

Brtna, F. Návrh dezintegrační jednotky. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 107 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.

V Brně

Dne 11. 5. 2009

.....

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Jaroslavu Boráňovi Ph.D. a konzultantům doc. Ing. Zdeňkovi Jeglovi Ph.D. a Ing. Richardu Nekvasilovi Ph.D. za odborné vedení a podporu při realizaci této diplomové práce.

**Filip Brtna**

## Obsah

1. Úvod	.8
2. Čištění odpadních vod	.9
2.1 Mechanický stupeň	9
2.1.1 Vstupní objekt čistírny	9
2.1.2 Hrubé předčištění	10
2.1.3 Usazovací nádrže	11
2.2 Biologický stupeň	11
2.2.1 Aktivační nádrže	11
2.2.2 Dosazovací nádrže	12
2.3 Kalové a plynové hospodářství	12
2.3.1 Zahušťovací nádrž, flotační jednotka	13
2.3.2 Stabilizace	13
2.3.3 Uskladňovací nádrž	16
2.3.4 Odvodnění kalu, popř. sušení kalu	16
2.3.5 Kogenerace	20
2.4 Rozdíly v technologiích dle počtu napojených EO	21
3. Současné způsoby nakládání s kalem	23
3.1 Přímé zapracování kalů do zemědělské půdy	23
3.2 Terénní úpravy a rekultivace	24
3.3 Kompostování	25
3.4 Termické zpracování kalů	26
3.5 Skládkování	28
3.6 Alternativní a méně používané metody využití kalů	29
3.6.1 Náhrada výrobní suroviny – materiálová recyklace na výrobě cihel	29
3.6.2 Výroba bílkovinného krmného koncentrátu	29
3.6.3 Vermikompostování	29
3.6.4 Výroba pelet	29
3.6.5 Využití kalů pro intenzivní pěstování biomasy k produkci bioplynu	29
3.6.6 Pyrolýza – zplyňování kalů	29
3.6.7 Mokrý oxidace kalu – přídavné palivo	30
3.6.8 Solidifikace	30
4. Desintegrace	31
4.1 Mechanická desintegrace	33
4.1.1 Desintegrace buněk mletím v kulovém mlýnu	33
4.1.2 Desintegrace v dispersních a koloidních mlýnech	33

4.1.3	Vysokotlaká homogenizace .....	33
4.1.4	Kavitace .....	33
4.1.5	Vysokovýkonná pulsní metoda .....	33
4.1.6	Desintegrace biomasy mixováním .....	34
4.1.7	Desintegrace biomasy zařízeními pracujícími na principu nožů .....	34
4.1.8	Desintegrace v zahušťovací odstředivce s integrovaným zařízením pro destrukci buněk .....	34
4.2	Fyzikální metody .....	35
4.2.1	Ultrazvukové a radiační metody .....	35
4.2.2	Termická desintegrace .....	36
4.3	Chemické metody .....	36
4.3.1	Rozklad kyselinami a louhy .....	36
4.3.2	Detergenty .....	36
4.3.3	Rozpouštědla .....	37
4.3.4	Ozonace .....	37
4.3.5	Solární photo-Fenton reakce .....	38
4.4	Biologické metody .....	38
4.4.1	Enzymatická lyze a autolýza .....	38
4.4.1	Lysozomy .....	39
4.6	Porovnání způsobů desintegrace .....	39
5.	Návrh provozní jednotky pro tlakovo-termickou desintegraci kalu .....	41
5.1	Varianty zpracování .....	41
5.2	Navržení předběžných rozměrů tlakové nádoby a teploty teplonosného média . .....	44
5.3	Výpočet potřebné doby k ohřevu kalu v tlakové nádobě dle předběžně určených rozměrů .....	45
5.4	Výpočet tepelného výměníku .....	47
5.5	Návrh tlakové nádoby a její pevnostní výpočet .....	52
5.6	Začlenění desintegrační jednotky do procesu zpracování kalu a finální schéma desintegrační jednotky .....	61
6.	Energetická bilance .....	63
6.1	Výpočet tepla potřebného pro ohřev .....	63
6.2	Příkon míchadla .....	64
6.3	Příkon kompresoru .....	64
6.4	Produkce bioplynu .....	64
7.	Návratnost investic .....	67
7.1	Přibližné pořizovací náklady .....	67
7.2	Úspory za odvoz kalů ročně .....	68

---

7.3 Ekonomická bilance procesu .....	69
8. Závěr	71
Použitá literatura	73
Seznam obrázků	76
Seznam tabulek	78
Seznam grafů	79
Seznam příloh	80

## 1. Úvod

Zavedení biochemického čištění odpadních vod významně napomáhá k zachování samotné podstaty lidské existence a ve své době bylo obrovským pokrokem v oblasti ochrany životního prostředí. Zpracování odpadních vod se provádí na čistírnách odpadních vod (ČOV) a je navrženo tak, aby se odstraňovaly nežádoucí složky z vody a koncentrovaly se do objemově nevýznamného vedlejšího produktu - kalu, který pro své četné využití současně představuje jednu z nejvíce extenzivních odpadových komodit. Kaly tvoří přibližně 1 až 2 % objemu čištěných vod i přes to je v nich transformováno 50 až 80 % celkového znečištění. Koncentrace prospěšných i znečišťujících látek v kalu, stejně tak jako jeho celkové množství, je závislé na počáteční kvalitě odpadní vody a na úrovni požadované technologie, která zaručí dosažení požadovaných hodnot na vyčištěnou odpadní vodu. S většími nároky na kvalitu vyčištěné vody úměrně roste i produkce kalů. Ta se také zvětšuje nárůstem populace. Vzhledem k tomu, že náklady na zpracování kalů tvoří přibližně polovinu celkových nákladů na čištění odpadních vod, je nezbytné nalézt nejvhodnější metodu pro zpracování nebo využití kalů v dané lokalitě.

Tradiční rozlišování kalů z čistíren městských odpadních vod a z čistíren průmyslových odpadních vod je dnes již spíše jen formální klasifikací, protože ve většině čistíren se čistí společně jak vody městské, tak i průmyslové. Navíc narůstající chemizace našeho života vede ke stírání rozdílů v míře znečištění obou zmíněných kategorií odpadních vod [7].

Faktem je, že neexistuje žádná univerzální metoda pro zpracování, využití, eventuelně likvidaci čistírenských kalů. Důležitým faktorem je zejména zohlednění rozdílnosti lokálních přístupů k nakládání s kaly.

Způsoby zpracování ovšem nezávisí jen na podmínkách dané lokality, ale také na fyzikálních, chemických a biologických vlastnostech kalu.

Současná odpadová politika EU (a nejen její) se snaží potlačit ukládání odpadů a vyvíjí iniciativu směrem k minimalizaci a recyklaci odpadů. Produkci kalů nelze zabránit, pouze lze výběrem správné technologie zmenšit jeho množství. Zůstávají dva hlavní směry konečného využití nebo likvidace kalů. Předně je to využití, za splnění řady podmínek v zemědělství, v budoucnu se počítá s množstvím až 55%. Kaly mohou být využity na půdu jako organické hnojivo nebo pro vylepšení kvality půdy v zemědělství, popřípadě pro rekultivace. Druhým směrem je spalování kalů nebo obecně termické zpracování. Spalovat je možno surové kaly. Anaerobně stabilizované kaly lze spalovat samostatně nebo spoluspalovat s energeticky bohatším palivem. Spalování kalů v cementářské peci, kde kal je přidáván jako přísadka k palivu, představuje materiálové zhodnocení kalů.

I přesto, že je už nyní k dispozici řada možností, jak zpracovávat kaly a zlepšovat jejich kvalitu, především snižováním obsahu vody, patogenů a zápachu, je snaha o nalezení nových ekonomicky akceptovatelných metod, které by byly schopné odstranit i takové znečišťující látky, jako jsou těžké kovy a využít cenných látek a energie obsažených v kalech. Zařazení dezintegrace do čistírenské linky může významně přispět ke zmenšení množství kalů, se kterými je třeba nakládat.

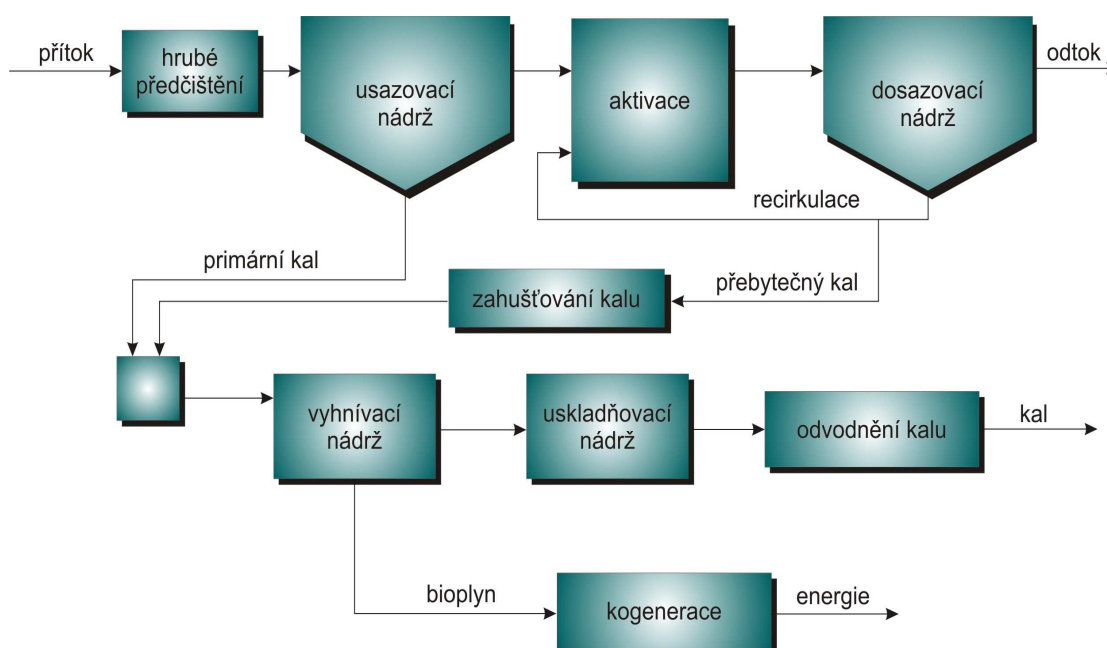
Volba technologie nakládání s kaly bude v budoucnu především řízena legislativou a tlakem veřejnosti a zákazníků. Kvalitní produkty z kalů mají obchodní hodnotu, což přináší možnost zvýšení tržby v budoucnu, to je další impuls k dosahování kvalitativně zajištěných produktů z kalů.[7]



## 2. Čištění odpadních vod

Čistírna odpadních vod je soubor zařízení, ve kterém dochází k čištění odpadních vod. Při procesu čištění získáváme kal, jež je odpadním produktem. Čistírny mohou být mnoha typů. Rozdělují se hlavně podle velikosti a typu čistírenského procesu. Velké čistírny kombinují většinou všechny dostupné procesy. Patří sem mechanické, biochemické a chemické procesy. Zjednodušené schéma ČOV je uvedeno na obr. 1.

Kapitola č. 2 byla zpracována s využitím literatury [1], [3], [4], [7], [8], [9], [13], a [15].



Obr. 1 Zjednodušené schéma ČOV [3]

### 2.1 Mechanický stupeň

Mechanický stupeň se skládá ze vstupních objektů, hrubého předčištění a usazovacích nádrží.

#### 2.1.1 Vstupní objekt čistírny

Odpadní voda přitéká do hlavního nátokového objektu, který se skládá z hlavní stavidlové komory regulující přítok do ČOV, do dešťové zdrže (příklad dešťové zdrže uveden na obr. 2) a odlehčovací komory s hrubým předčištěním dešťových vod.

Dešťová zdrž je objekt sloužící k zachycení prvního náporu dešťových vod. Nádrž je rozdělena podélně na sekce s proplachovacím zařízením. Voda akumulovaná v dešťové zdrži je z čerpací jímky ve vhodnou dobu přečerpávána z čerpací stanice do čistícího procesu.

Čerpací stanice bývá zpravidla osazena ponornými nebo šnekovými čerpadly.



**Obr. 2** Dešťová zdrž

### 2.1.2 Hrubé předčištění

Hrubé předčištění se skládá z lapáku štěrku, česlovny, lapáku písku a lapáku tuků. Slouží k zachycení nejhrubších sunutých látek. Vyklízení jímek se provádí drapákem do přistaveného kontejneru.

Česlovna se skládá z dráh vybavených česlemi, česle se podle šířky průlin dělí na hrubé, s šířkou průlin 80 – 100 mm, polohrubé 10 – 25 mm a jemné do 10 mm (viz. obr. 3). Shrabky jsou propírány a po odvodnění transportovány do kontejnerů.

Lapák písku slouží k zachycení písku z odpadní vody. Písek je s vodou odtahován do betonových jímek a čerpán do pračky písku.

Písek je do praček písku dopraven šnekovými třídíči. V objektu jsou dále umístěny dmychadla pro dodávku vzduchu pro provzdušnění lapáku písku. Vedle objektu je umístěna pračka a třídíčka pro vytěžený štěrk.



**Obr. 3** Strojní česle jemné

Lapáky tuků a olejů slouží k zachytávání olejů a tuků z odpadní vody. Jako předčistící zařízení se doporučuje umístit přímo ke zdroji znečištění.

Takto vyčištěná odpadní voda přitéká na rozdělovací objekt usazovacích nádrží.

### 2.1.3 Usazovací nádrže

Voda z rozdělovacího objektu je usměrňována do usazovacích nádrží, kde primární kal sedimentuje. Usazovací nádrže jsou obvykle vybaveny pojezdy se shrabovacím zařízením kalu a se stíráním plovoucích nečistot (obr. 4). Kal je hromaděn do sběrné jímky, odkud je čerpán do objektu kalového hospodářství. Pohled na usazovací nádrž je na obr. 4.



Obr. 4 Usazovací nádrž (ČOV Šumperk)

## 2.2 Biologický stupeň

Biologický čištění odpadní vody probíhá v aktivačních a dosazovacích nádržích.

### 2.2.1 Aktivační nádrže

Aktivace se skládá z denitrifikace, nitrifikace a regenerace. Všechny tyto nádrže bývají uspořádány dvoulinkově. V nitrifikační nádrži jsou rozmístěny provzdušňovací elementy, které obohacují odpadní vodu dusíkem. V regeneraci se provzdušňováním oživuje kal z dosazovací nádrže. V denitrifikační nádrži je umístěno míchadlo, k homogenizaci vratného kalu a odpadní vody z primární usazovací nádrže. Dusík obsažený v odpadní vodě vyprchá do atmosféry. Odpadní voda z aktivačních nádrží je čerpána do dosazovacích nádrží. Pohled na aktivační nádrž je na obr. 5.



Obr. 5 Aktivační nádrž (ČOV Šumperk)

### 2.2.2 Dosazovací nádrže

Dosazovací nádrž slouží k usazení aktivovaného kalu. Usazený kal je shrabovacím zařízením na pojezdovém mostu stírán ze dna do kalového prostoru a recirkulován do aktivace. Přebytečný kal je přemístěn k jeho zahuštění. Stírací most je vybaven rovněž stíráním plovoucí pěny.

Vyčištěná voda odtéká na odtokový objekt. Objekt odtoku je vybaven měřením množství a kvality odvážené vody z dosazovacích nádrží. Vedle tohoto objektu je umístěn objekt čerpací stanice pro užitkovou vodu. Užitková voda je čerpána do objektu chlorovny a voda je pak dále dodávána do rozvodu užitkové vody.

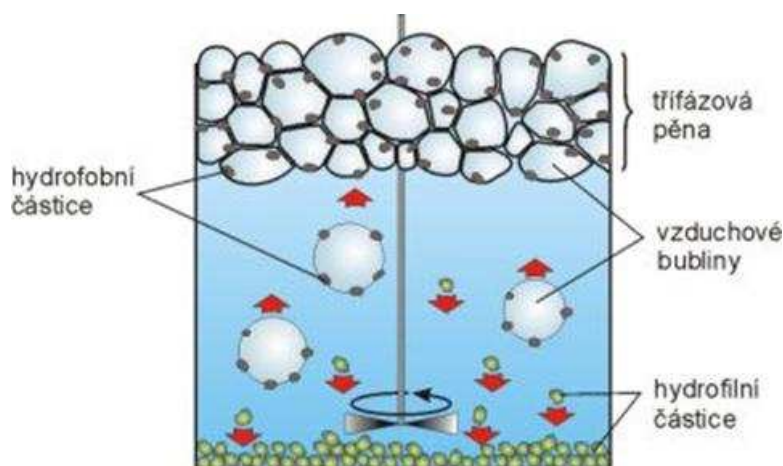
## 2.3 Kalové a plynové hospodářství

Skládá se obvykle ze zahušťovacích nádrží, flotační jednotky, vyhnívacích nádrží, uskladňovacích nádrží, odvodnění kalu, a kogenerační výroby energie z bioplynu.

Kal je relativně řídká suspenze pevných a koloidních částic, organických i anorganických ve vodě. Jedním z nejdůležitějších procesů „kalové linky“ je snižování obsahu vody v kalové suspenzi. Snižováním obsahu vody v kalu dochází k výraznému snížení jeho objemu a zvýšení sušiny.

### 2.3.1 Zahušťovací nádrž, flotační jednotka

Zahušťovací nádrž slouží k zahuštění primárního kalu a zvýšení sušiny v kalu na 8 až 10 %. Zahušťování se provádí gravitačně nebo strojově. Gravitační zahušťovací nádrže pracují na principu sedimentace a liší se od sedimentačních nádrží hloubkou, dobou zdržení a povrchovým zatížením. Gravitační zahušťování se většinou používá pro primární nebo směsný surový kal. Sekundární kal (aktivovaný) je převážně zahušťován strojově, pomocí zahušťovacího síta a zahušťovací centrifugy. Nádrž je vybavena shrabovacím zařízením a pomaloběžným mícháním. Flotační jednotka je využívána k zahuštění přebytečného biologického kalu, při strojním zahušťování na zahušťovacích sítích, naproti tomu u zahušťovacích centrifug není nutná. Princip flotace je patrný z obr. 6.



Obr. 6 Princip flotace [13]

### 2.3.2 Stabilizace

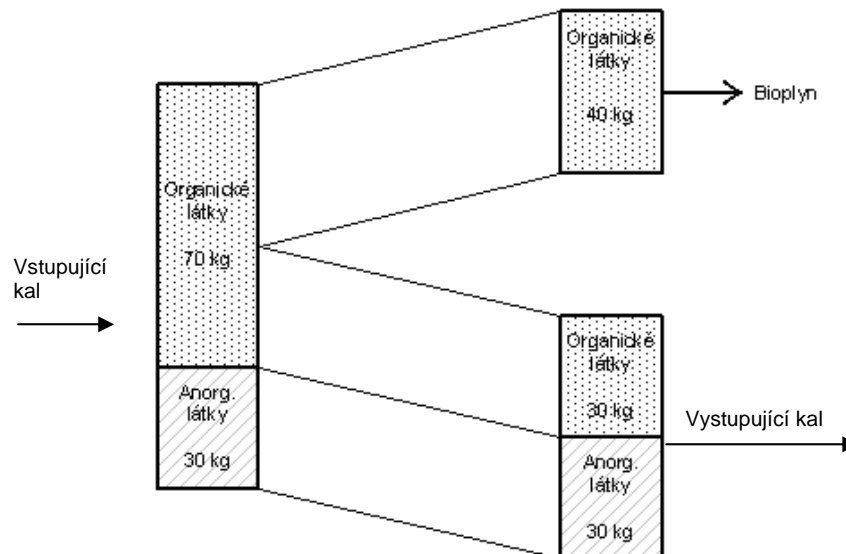
Stupeň stabilizace slouží ke stabilizaci a hygienizaci kalu obsahujícího různé patogenní mikroorganismy.

#### Anaerobní stabilizace

Ve většině čistíren se kaly zpracovávají anaerobní stabilizací – metanizací. Ve vyhnívacích nádržích probíhá proces, při němž vzniká bioplyn. Nádrže jsou vybaveny mechanickým mícháním, jehož účelem je zabezpečit dobrý kontakt aktivní biomasy s přivedeným substrátem, zamezuje místnímu přetížení, zlepšuje odvod reakčních zplodin a udržuje stejnou teplotu v celém reaktoru, což je důležité z hlediska udržení dynamické rovnováhy probíhajících procesů. Nádrže jsou zastřešené plynotěsným stropem.

Metanizace je soubor procesů, při nichž směsná kultura mikroorganismů postupně rozkládá biologicky rozložitelnou organickou hmotu bez přístupu vzduchu. Konečnými produkty jsou vzniklá biomasa, plyny ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) a nerozložený zbytek organické hmoty, který je již z hlediska hygienického a sensorického nezávadný pro prostředí – stabilizován. Dochází současně k hmotnostnímu i objemovému úbytku organické hmoty uvolněním velké části organického uhlíku v plynné formě a uvolněním vody, původně vázané chemicky i fyzikálně. Dochází ke snížení výskytu patogenních mikroorganismů a k potlačení ostatní flóry a fauny. Předpokládá se, že při metanizaci surového kalu klesne obsah organické sušiny o 45-65 %. Úbytek organické sušiny je zobrazen na obr. 7.

Za anaerobně stabilizovaný kal lze považovat kal, ve kterém již neprobíhají intenzivní biologické pochody, nepůsobící sensorické a hygienické problémy. Zbylé organické látky jsou již velmi obtížně a pomalu rozložitelné nebo nerozložitelné.



**Obr. 7** Úbytek organické hmoty v sušině při anaerobní stabilizaci [7]

V současné době se používají dva režimy anaerobní stabilizace, mezofilní a termofilní.

V ČR je ve větší míře rozšířena mezofilní stabilizace při teplotách 30 – 35 °C a době zdržení mezi 20 – 30 dny. Mezofilní proces probíhá ve vyhřívané a míchané anaerobní nádrži, kde dochází k vlastnímu procesu stabilizace.

Termofilní anaerobní stabilizace patří k modernějším metodám. Probíhá při teplotě 55 – 60 °C, z důvodu vyšší teploty je možné zkrátit dobu zdržení na 10 až 15 dnů. Doba zdržení závisí na kinetice a zatížení procesu. Musí být tak dlouhá, aby došlo k požadovanému rozložení organických látek. Tím, že je při termofilní anaerobní stabilizaci dosahováno vyšší rychlosti rozkladu organických látek a jeho větší účinnosti, dochází i ke zvýšení produkce bioplynu. Vzhledem k vyšší procesní teplotě dochází také k účinnější hygienizaci.

#### Autotermní termofilní aerobní stabilizace

Autotermní termofilní aerobní stabilizace je založena na udržení termofilních podmínek pomocí tepla získaného při aerobním biologickém rozkladu organických látek. Termofilní organismy v systému jsou výrazně aerobní, jejich metabolismus je exotermní, a rychlejší než u ostatních mikroorganismů.

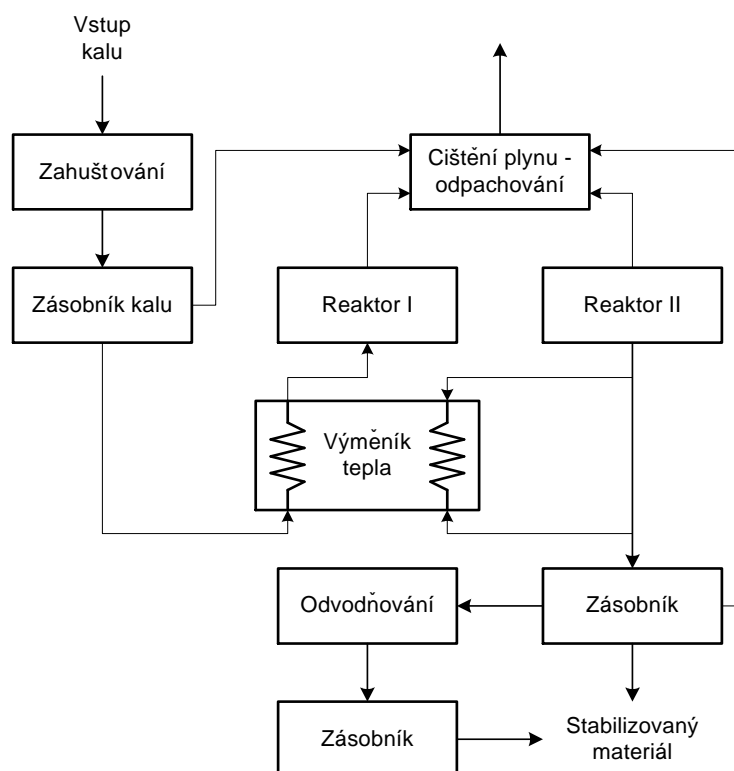
Pro autotermní provoz musí být dodrženy základní podmínky provozu:

- Dostatečně zahuštěný vstupní kal.
- Dostatečné množství snadno rozložitelných organických látek v zpracovaném materiálu.
- Dostatečná tepelná izolace reaktoru, rekuperace tepla.

- Efektivní míchání.
- Efektivní aerace.

Optimální teplotní rozmezí je 55 až 60 °C, kdy vedle odstraňování zápachu dochází také k devitalizaci patogenních mikroorganismů. Za těchto podmínek se předpokládá účinnost odstranění organických látek v rozmezí 25 – 65 %.

Produktem autotermní stabilizace je stabilizovaný a hygienizovaný kal, který lze odvodnit na sušinu 25 – 30 %. Celý technologický systém je nutné zabezpečit proti úniku zápachu, všechny odpadní plyny vyžadují čištění – odpachování. Schéma procesu je patrné z obr. 8.



**Obr. 8** Schéma konfigurace autotermní termofilní aerobní stabilizace [7]

### Hygienizace kalu

Nutnost hygienizace kalu pramení zejména z legislativních požadavků na omezení nebezpečných vlastností kalu z hlediska obsahu patogenních mikroorganismů. Základní hygienizační metody lze rozdělit do dvou hlavních skupin. První skupinou je hygienizace chemická za použití silného oxidačního činidla ( $H_2O_2$ ,  $O_3$ , formaldehyd, fenol). Naproti tomu fyzická hygienizace využívá účinků tepla, radiace a mechanické destrukce buněk mikroorganismů.

Hygienizace kalu může probíhat přímo v technologické lince úpravy a zpracování kalů, kdy současně probíhá stabilizace a hygienizace. S výhodou se toho využívá při autotermní aerobní stabilizaci nebo při termofilní anaerobní stabilizaci. Stupeň hygienizace závisí na podmínkách stabilizace (teplota, doba zdržení, hydraulické uspořádání reaktoru apod.)

Další možností je hygienizace kalu před stabilizací, tzv. předúprava. Např. úplná desintegrace vstupujícího kalu fyzikálními (ultrazvuk, radiace), termickými

(pasterizace, termický rozklad), nebo chemickými metodami (ozon). Všechny tyto metody zničí buňky většiny mikroorganismů a dojde také k dezintegraci (zmenšení velikosti částic kalu). Desintegrací se také podstatně zvýší biologická rozložitelnost složek kalu, což má za následek snížení výsledného množství kalu a v případě anaerobní stabilizace nárůst produkce bioplynu.

Hygienizace kalu může probíhat také po stabilizaci, tzv. následná nebo dodatečná úprava. Např. kal po stabilizaci se podrobí pasterizaci nebo odvodněný kal se podrobí sušení apod.

Volba metody hygienizace záleží především na požadovaném stupni hygienického zabezpečení a na možnostech a místních podmínkách dané ČOV. Důležitou roli hrají také ekonomické otázky.

Nejrozšířenější a neekonomičtější metodou je vápnění kalu. Reakcí páleného vápna s vodou za vzniku hydroxidu vápenatého dochází ke zvýšení pH nad 12 a také ke zvýšení teploty nad 55 °C. Je nutné udržení těchto hodnot alespoň po dobu 2 hodin nebo alkalizace vápnem nad pH 12 při teplotě okolí, po dobu alespoň 3 měsíců. Přitom pH nesmí klesnout pod uvedenou teplotu. Další možností je kondicionace vápnem nad pH 12 a udržení pH na této teplotě po dobu nejméně 24 hodin. Do stabilizovaného kalu před odvodněním je možné vápno dávkovat jako vápenné mléko nebo práškové pálené vápno. Práškové pálené vápno lze také dodávat do již odvodněného kalu.

Pro pasterizaci kalu je potřeba zvýšení teploty kalu na 70 °C po dobu minimálně 30 minut. Průmyslově dodávané pasterizační jednotky jsou dimenzovány na ohřev surového kalu v rozmezí 60 až 70 °C při době zdržení 1–3 hodiny. Zbývající teplo potřebné k dosažení pasterizace je kalu dodáváno pomocí systému rekuperačních výměníků.

### 2.3.3 Uskladňovací nádrž

Dochází v nich k druhému stupni stabilizace, přičemž v nádržích dozrívají stabilizační procesy a odděluje se v nich kal, který je čerpán na odvodnění, od kalové vody, která je čerpána zpět do aktivace. Obsah nádrží je promícháván.

### 2.3.4 Odvodnění kalu, popř. sušení kalu

Odvodňováním se odstraní z kalu všechna „volná voda“ (není vázána na žádné částice) a částečně i „voda meziprostorová“ (kapilární voda, vázaná kapilárními silami v mezerách mezi vločkami). Technologický stupeň odvodňování se zařazuje za technologický stupeň stabilizace kalu, pouze u malých čistíren a v případě přímého spalování surového kalu se odvodňuje surový kal. Dobře anaerobně stabilizovaný kal lze odvodnit na sušinu 30 až 40 %. Odvodnění surového kalu je složitější a při kombinaci fyzikální (teplo) a chemické (polyflokulanty) kondicionace lze dosáhnout odvodnění na sušinu okolo 31%.

#### Způsoby odvodňování:

Kalová pole – Nejstarší a nejjednodušší způsob odvodňování kalů. Jedná se o speciálně upravenou ohraničenou plochu, jejíž dno je tvořeno drenážním systémem – drenážní trubky, zasypané vrstvou štěrku a vrstvou písku. Na tuto vrstvu se napustí kal. Princip odvodnění na kalovém poli je založen na kombinaci procesů filtrace a odpařování. Účinnost odvodňování je závislá na klimatických podmínkách. Za suchého počasí můžeme dosáhnout až 65 % obsahu sušiny. Příklad kalového pole na obr. 9.





**Obr. 9** Kalové pole [13]

Sítopásové lisy – Momentálně se jedná o nejrozšířenější metodu odvodňování kalů. Metoda je založena na filtrování kalu po kondicionaci polykogulanty, zpočátku volně, později i pod tlakem mezi dvěma nekonečnými filtračními plachetkami, které meandrovitě procházejí systém válců, kde dochází k postupnému stlačování a deformaci koláče, což usnadňuje uvolňování vody. Touto metodou můžeme dosáhnout koncentraci sušiny odvodněného kalu 27 - 36 %. Příklad sítopásového lisu na obr. 10.



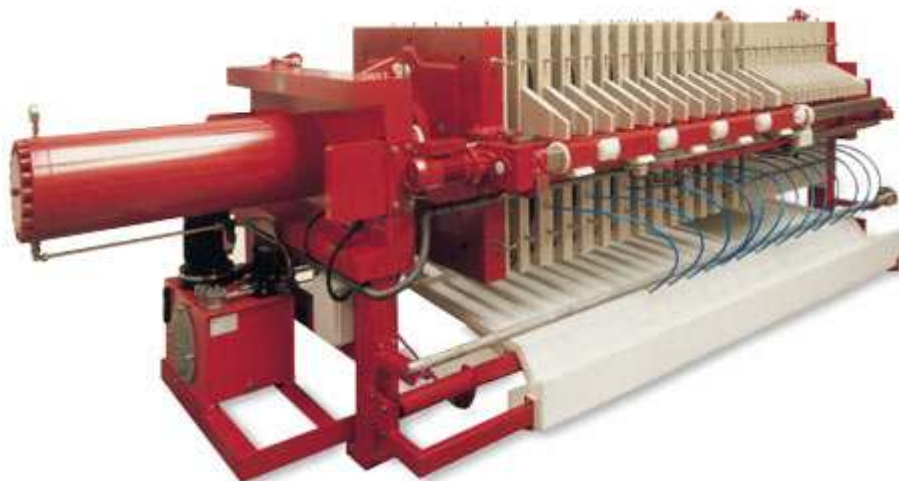
**Obr. 10** Sítopásový lis [13]

*Kalolisy – Komorové lisy (obr. 11) – Princip metody je filtrace za vysokého tlaku 1,5 až 2,5 MPa. Kondicionace kalu (přídavek flokulantu) není nutná, ale doporučuje se. Lze dosáhnout sušiny odvodněného kalu po anaerobní stabilizaci 35 - 50 %. Tato metoda má ovšem nevýhody v podobě periodičnosti provozu, vysokých nákladů a pracnosti.*



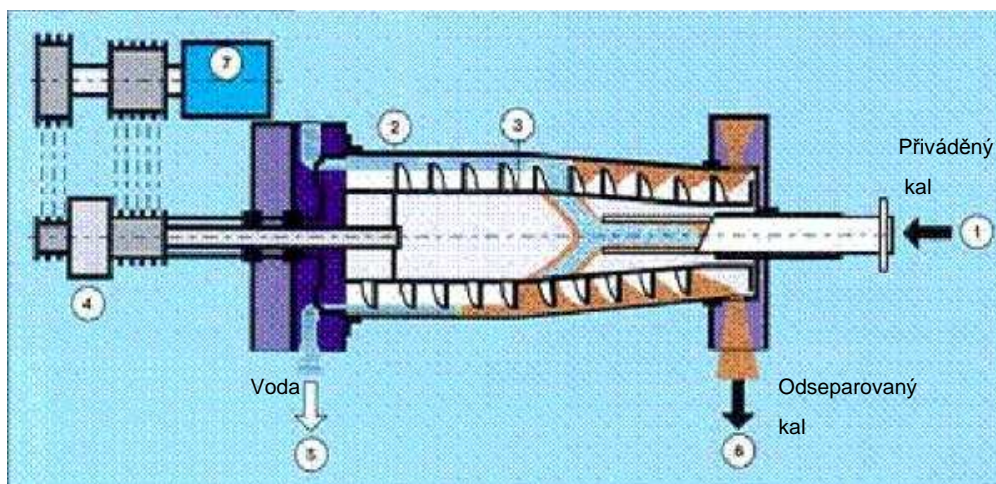
**Obr. 11** Komorový lis [13]

*Membránové lisy – U membránového kalolisu (viz. obr. 12) je drenáž filtrační desky na pohyblivé membráně. Membrána slouží k dotlačení nafiltrované vrstvy a tímto stlačením k vytvoření odvodněného koláče. První fáze – naplnění je podobné jako u komorového lisu, ale po tlakové filtraci přichází další fáze a nafiltrovaná vrstva je stlačena pohybem membrány. Jako pomocné tlakové médium je nejčastěji používána voda nebo vzduch.*



Obr. 12 Membránový lis [13]

Odvodňovací centrifugy - Pro odvodňování kalů se používají celoplastřové šnekové odstředivky. Kal se přivádí potrubím v ose bubnu. Odseparovaný kal se usazuje na vnitřní straně kuželovité části rotačního bubnu, filtrát odtéká přes hranu bubnu do válcovité části, odvodněný kal je dopravován šnekem k zúženému konci komolého kužele, kde vypadává z odstředivky. Kondicionace kalu je potřebná. Koncentrace sušiny odvodněného kalu dosahuje 30 – 35 %. Odvodňovací centrifuga se vyznačuje vysokou výkonností a malými požadavky na plochu a prostor oproti ostatním odvodňovacím zařízením. Princip je patrný ze schématu na obr. 13.



Obr. 13 Schéma šnekové odstředivky [13]

Sušárny kalu - Pokud je čistírna vybavena sušárnou kalu dopravujeme na ni odvodněný kal. V sušárnách je teplotním médiem horký olej, horký vzduch a pára. V případě použití termálního oleje je olej ohříván v kotelně umístěné v samostatné místnosti. Páry a stržený prach jsou vedeny do pračky plynů, kde jsou odtažované plyny odprašovány a zajištěna kondenzace par. Kal o výsledné sušině 85 až 92 % je přepravován systémem dopravníků za současného ochlazení do kontejnerů.

### 2.3.5 Kogenerace

Bioplyn je produktem anaerobního rozkladu organických látek z kalu. Vzhledem k vysokému obsahu metanu (60 – 70 %) má vysokou výhřevnost (20 – 27,4 MJ/m<sup>3</sup>). Tyto vlastnosti řadí bioplyn mezi ušlechtilé zdroje energie. Bioplyn lze využít přímo na ČOV k ohřevu anaerobních stabilizačních nádrží a pro výrobu potřebného tepla v dalších provozech ČOV. V poslední době se navíc využívá bioplyn k výrobě elektrické energie v kogeneračních jednotkách (obr. 14), které současně produkují využitelné odpadní teplo.



**Obr. 14** Kogenerační jednotka (ČOV Šumperk)

Před vlastním využitím je plyn zpravidla skladován v plynojemech. Plynojemy jsou kulové zásobníky, které slouží k akumulaci bioplynu a udržování tlaku. Plyn je přiváděn z vyhnívacích nádrží. Přebytný bioplyn je spalován hořáky zbytkového plynu. Pohled na plynojem je na obr. 15. Do kogenerace je plyn přiváděn přes odsiřovací stanice.



Obr. 15 Plynojem (ČOV Modřice)

Odsiřovací stanice je zařízení, sestávající z uzavřených kontejnerů, v nichž je bioplyn zbaven nežádoucí příměsí síry.

Pokud vyrobená elektrická energie přesahuje množství využitelné v čistírně, je možné ji prodat do elektrorozvodné sítě. Dle cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č.8/2008 je současná výkupní cena rovna 2 420 Kč/MWh.

## 2.4 Rozdíly v technologiích dle počtu napojených EO

Velikost čistíren odpadních vod se hodnotí podle počtu napojených ekvivalentních obyvatel (EO). EO je definován produkcí znečištění 60 g BSK<sub>5</sub> za den. V případech, kdy je známo množství produkovaného znečištění, je tedy EO počítán vydělením celkové produkce BSK<sub>5</sub> za den hodnotou 60 g BSK<sub>5</sub>. V případě, že není známa skutečná produkce lze počet EO stanovit pomocným výpočtem. Ten vychází ze součtu stálých obyvatel, příležitostných obyvatel a zahrnutého průmyslového znečištění v oblasti napojené ČOV vynásobených koeficientem roční produkce BSK<sub>5</sub> jednoho dílčího subjektu.

Za malé ČOV jsou dle [14] považovány čistírny s počtem připojených EO do 5 000. Nad touto hodnotou se jedná o menší a středně velké ČOV. Velké čistírny jako ÚČOV Praha nebo ČOV Brno – Modřice mají počet EO v řádech stovek tisíců. Nařízení vlády č. 61/2003 Sb. uděluje ČOV emisní limity na základě počtu EO. Zde se uvádí rozdělení dle EO: menší než 500, 501 – 2 000, 2 001 – 10 000, 10 001 – 100 000 a více než 100 000 EO.

U malých ČOV se používají typizované modely čistíren a slouží především k čištění splaškových vod malých a středních obcí. Takové ČOV obvykle disponují mechanickým předčištěním, provzdušňovanou aktivací s integrovanými dosazovacími nádržemi a uskladňovacími nádržemi na přebytečný kal, ve kterých probíhá aerobní stabilizace. Kromě dosazovacích kruhových se používají nádrže obdélníkového nebo čtvercového půdorysu. Malé ČOV nejsou obvykle vybaveny žádným zařízením pro

odvodnění kalu, proto je přebytečný kal odvážen k odvodnění na větší ČOV. Příklad malé ČOV je uveden na obr. 16.



**Obr. 16** Typizovaná malá ČOV (KUNST) [39]

Technologie použitá u menších a středních ČOV (do 20 000 EO) je v některých ohledech odlišná od technologie, která je uplatněna u velkých čistíren. Například z ekonomického hlediska zde není vhodné stavět anaerobní stabilizační nádrže a také se obvykle nepoužívá primární sedimentace.

V poslední době se dostávají do popředí u obcí či osad s velmi malým počtem EO (v řádu desítek až stovek) nebo jako domovní čistírny přírodní způsoby čištění. Asi nejrozšířenější je model kořenové čistírny odpadních vod (KČOV). Princip těchto čistíren je založen na systému umělých mokřad, jež jsou navrhovány a stavěny tak, aby při čištění odpadních vod byly využívány procesy, které probíhají v přirozených mokřadech. Tyto čistírny bývají tvořeny utěsněnou jámkou vyplněnou filtračním materiálem a osázenou vlhkomilnými a mokřadními rostlinami. Přívodní voda je rovnoměrně po nádrži rozdělována, prochází přes půdní filtr, kde dochází k odstraňování znečištění kombinací fyzikálních, chemických a biologických procesů. Vyčištěná voda je odváděna sběrnou drenáží. Jako filtrační materiál může být použit štěrkopísek nebo materiály s lépe definovatelnými sorpčními vlastnostmi. Nově se používají vícestupňové kořenové čistírny, které kombinují horizontální i vertikální proudění. Dosahují tak lepších výsledků při odbourávání chemického znečištění, zejména při denitrifikaci. Vzhledem k velké produkci biomasy a ke schopnosti přijímat a kumulovat velké množství živin a odstraňovat dusík a fosfor z odpadních vod se tyto čistírny do budoucna jeví jako perspektivní. Příklad kořenové čistírny odpadních vod je uveden na obr. 17.

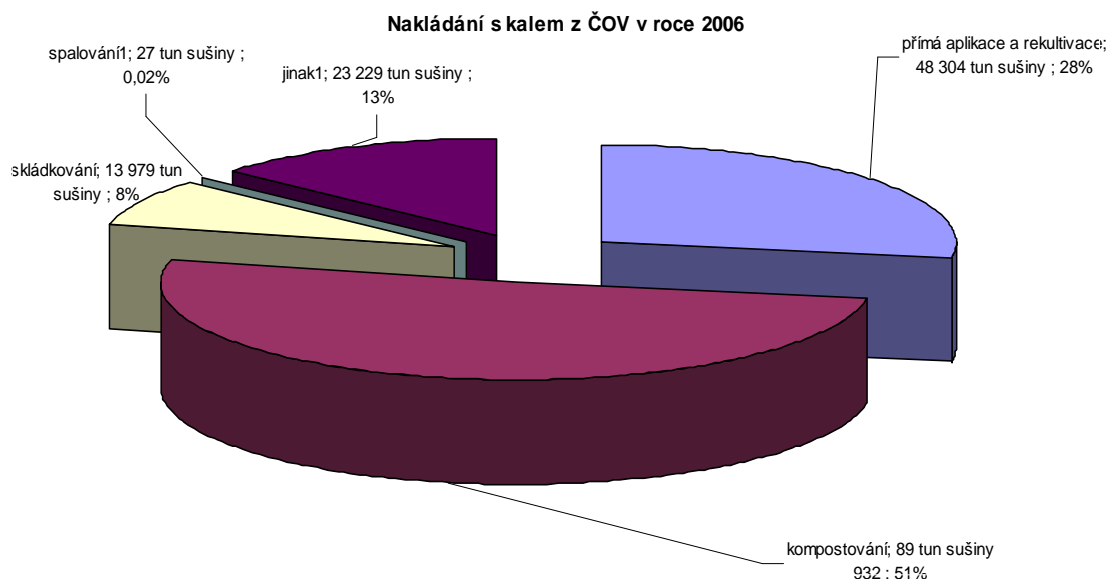


**Obr. 17** kořenová čistírna odpadních vod [15]

### 3. Současné způsoby nakládání s kalem

Před tím, než se rozhodneme jakou metodou kal z ČOV využijeme, je třeba provést chemický rozbor, abychom zjistili fyzikálně chemické vlastnosti a složení kalu a mohli posoudit, jak sním dál nakládat. Jak bylo s kalem z ČOV nakládáno v roce 2006 je patrné z graf 1.

Kapitola č.3 byla zpracována s využitím literatury [1], [5], [6], [14], [16] a[18].



**Graf 1. Zpracování kalů z ČOV v ČR [5]**

#### 3.1 Přímé zapracování kalů do zemědělské půdy

Přímé hnojení kaly je výhodný způsob zužitkování produktů ČOV, jsou-li aplikovány cíleně a kontrolovaně. Tento způsob je podporován pro ekonomické výhody, které přináší jak odběratelům, tak dodavatelům.

Stabilizované odvodněné kaly představují svým bohatým obsahem organických látek, živin a biologicky aktivních látek významný doplňkový zdroj chybějících organických a ostatních látek v zemědělsky využívané půdě. Hnojivý účinek kalů spočívá v příznivém obsahu biologicky důležitých prvků (N, P, K, Ca, Mg), dostatku organické hmoty a obsahu stopových prvků nezbytných pro zdárný vývin a růst rostlin. Při aplikaci kalu v zemědělství je nutno kontrolovat obsah cizorodých látek a patogenních mikroorganismů. Z tohoto důvodu je potřeba kal před použitím v zemědělství hygienizovat. Mezi nejvíce nebezpečné cizorodé látky patří chlorované látky (např. PCB, dioxiny), polyaromatické uhlovodíky, organická farmaceutika a další. Obsah těžkých kovů se v poslední době daří výrazně snižovat. V ČR je použití čistírenských kalů v zemědělství řízeno vyhláškou č. 382/2001 SB., která je v plném souladu se směrnicemi EU.

Aplikace kalů se provádí buď rozvozem tekutého kalu, nebo po jeho odvodnění. Aplikace odvodněného kalu by měla být taková, aby byl co nejrovnoměrněji rozptýlen v obdělávané vrstvě půdy. Možnosti zužitkování průmyslových kalů jsou pro hnojení problematické. Často obsahují nevhodné či

toxické příměsi, které tuto jejich aplikaci vylučují. Ve většině případů je třeba tyto kaly spíše likvidovat, než zemědělsky využívat. Limitní hodnoty koncentrace těžkých kovů v kalu jsou uvedeny v tab. 1.

prvek	limit pro přímou aplikaci v mg/kg sušiny	limit pro kompostování v mg/kg sušiny
As - arzén	30	50
Cd - kadmium	5	13
Cr - chróm	200	1 000
Cu - měď	500	1 200
Hg - rtuť	4	10
Ni - nikl	100	200
Pb - olovo	200	500
Zn - zinek	2 500	3 000

**Tab. 1** Limitní hodnoty koncentrace těžkých kovů [13]

- Výhody:
- možnost uplatnit veškerý kal (objemově)
  - navrácení organických látek zpět do půdy
  - možnost aplikace tekutého i odvodněného kalu
  - dovozní vzdálenosti nemusí být velké

- Nevýhody:
- kal odpovídající limitům příslušných předpisů
  - nutnost důsledné kontroly kalu i půdy
  - skladování kalu v zimním období, kdy se kal nesmí aplikovat

### 3.2 Terénní úpravy a rekultivace

Při rekultivaci výsypek, skládek a hald je potřeba velkého množství organické hmoty pro vytvoření normálního půdního profilu. Čistírenské kaly se jeví jako vhodný a levný zdroj organické hmoty, obsahující značné množství dusíku a fosforu za předpokladu, že splňují zákonem stanovené podmínky. Při použití kalu na rekultivaci skládek nesmí být překročen ukazatel třídy vyluhovatelnosti II, podle vyhlášky č. 383/2001 Sb. a kal nesmí vykazovat nebezpečné vlastnosti. Při použití kalu na terénní úpravy nesmí být překročen ukazatel vyluhovatelnosti třídy I a kal nesmí vykazovat nebezpečné vlastnosti, hlavně infekčnost.

Použití čistírenských kalů při výrobě rekultivačních podorničních substrátů případně orničních vrstev je další cestou zhodnocení. Čistírenské kaly zde slouží jako zdroj organických látek. Dalšími přísadami jsou výkopová zemina, jemné frakce z recyklace stavebních sutí, štěrk, písek, dřevo, kompost a pod. Substráty mohou být vyráběny přímo na místě aplikace nebo předem na vybraném místě, ze kterého jsou po smísení přísad transportovány k rekultivaci [4]. Pohled na provádění rekultivace na obr. 18.





Obr. 18 Rekultivace – MEGA a.s [40]

### 3.3 Kompostování

Kompostování je způsob využití biodegradabilních materiálů k výrobě organického hnojiva – kompostu. Při tomto postupu probíhá přeměna organických látek pomocí aerobních a anaerobních procesů. Při kompostování je především nutné připravit odpadu podmínky intenzivního aerobního rozkladu. Jedná se tedy o princip zpracování kalů nebo tuhých odpadů aerobním biologickým rozkladem organických látek především účinkem termofilních mikroorganismů. Kal je míchán s plnivem, která slouží ke zvýšení porézity pro dobrou aeraci, k redukci obsahu vlhkosti a ke zlepšení poměru C : N. Často jsou všechny tři funkce kombinovány v jednom produktu např. sláma, dřevěná kůra nebo domovní odpad.

Kompostování představuje svým způsobem recyklaci kalů, protože umožňuje vrátit látky do přirozených potravních cyklů. Rozkladem dochází ke zneškodňování škodlivých látek nebo se mění na nové; zároveň se až o 30 % zmenšuje objem odpadů a eliminuje rozmnožování patogenních mikroorganismů.

Produktem je kompost, hygienicky nezávadný materiál humusovitého charakteru. Rozkladem organických látek vzniká energie ve formě tepla a hmota se udržuje samovolně při teplotách mezi 50 – 60 °C. Proces destrukce organických látek v kompostu představuje kvalitativní změny jako důsledek činnosti mikroflóry [4].

U kompostování je výhodné, že vzniká skladovatelný a prodejný produkt. Navíc ve srovnání např. se spalováním je kompostování spojeno s nízkými náklady. Naopak nevýhodou tohoto způsobu využití kalů je potřeba přídavného materiálu, potřeba velkých ploch pro skladování. Proces kompostování bývá také často spojován se zdrojem zápachu a v porovnání s přímou aplikací na pole je i ekonomicky náročnější. Příklad kompostování je uveden na obr. 19.



Obr. 19 Překopávač kompostu [13]

### 3.4 Termické zpracování kalů

Termické technologie sloužící i při zpracování jiných druhů odpadů představují stále využívanější postupy. Přes energetickou náročnost je nutno zdůraznit, že odstraňují pevný odpad jako takový a často poskytují využitelné produkty. Nelze ovšem přehlédnout, že jsou zdrojem plyných emisí a odpadních vod z vypírky plynů. Výhřevnost kalu závisí na obsahu organické složky a obsahu sušiny. Výhřevnost sušiny vyhnilého kalu je cca  $11 \text{ MJ.kg}^{-1}$  [41], kdy obsah organických složek v tomto kalu je v rozmezí cca 37 – 54 %.

Kaly z čištění odpadních vod lze spalovat v různých spalovacích zařízeních:

- 1) v cementárnách
- 2) teplárnách, elektrárnách a spalovnách TKO
- 3) speciálních spalovněch odvodněného kalu

Přidávání kalu v malém podílu nepůsobí vážné problémy, protože výhřevnost a obsah popela v kalech a v hnědém uhlí je přibližně stejná. Z teoretického hlediska lze použít kaly odvodněné do cca 10 % k spalovanému hlavnímu palivu – uhlí. Obvykle se však nepřekračuje 5 % podíl. Jeden z hlavních důvodů pro omezení spalování kalů je nutnost zajistit, aby zvýšené množství vody přivedeného do spalovacího procesu kotle nezapříčinilo snížení teploty spalování a dále, aby nebyla zhoršena původní kvalita produktů spalování [18].

#### ad1) Využití kalů v cementárnách

Ze zahraničních zkušeností se jako nejvhodnější technologie pro energetické využití kalů jeví jeho použití při výrobě cementu, tedy při výpalu cementářského slinku. Tato metoda byla vyvinuta v Japonsku a má následující výhody:

- úplné odstranění všech toxických organických látek v důsledku vysoké teploty vypalování ( $>1000 \text{ °C}$ );
- těžké kovy jsou vázány do cementářského slinku a nemohou být vyluhovány;
- úspora uhlí a surovin;
- snížení emisí  $\text{CO}_2$  z fosilních paliv;

- bezodpadové zpracování kalu;
- je možno zpracovávat nejenom sušený, ale v určité míře i odvodněný kal.

Pro udržení vlastností cementu je možno sušeným kalem nahradit část primárního paliva (uhlí), přičemž použitý kal musí být vysušen na cca 85 - 95%.

Pro výpal cementářského slinku je v ČR používána suchá technologie výpalu. Tato technologie patří k vysokoteplotním technologiím. V praxi se tedy teplota plamene pohybuje mezi 1250 – 1450 °C.

Lze říci, že technologie výpalu cementářského slinku je schopna zachytit a vázat větší část škodlivin (S, Cl, alkálie) a těžkých kovů.

Kaly se v cementárnách nelikvidují, nýbrž druhotně energeticky a materiálově využívají. Využívání odpadů jako alternativ paliv v cementárnách je možno akceptovat pouze v případě, pokud je ekologicky výhodnější než jiná technologie. Ekologická výhodnost musí být posouzena z několika hledisek a srovnána s jinými způsoby využití daných odpadů. Pohled na cementářskou pec na obr. 20.



Obr. 20 Cementářská pec v cementárně Dotternhausen [42]

### ad2) Spoluspalování kalů v teplárnách, elektrárnách a spalovnách TKO

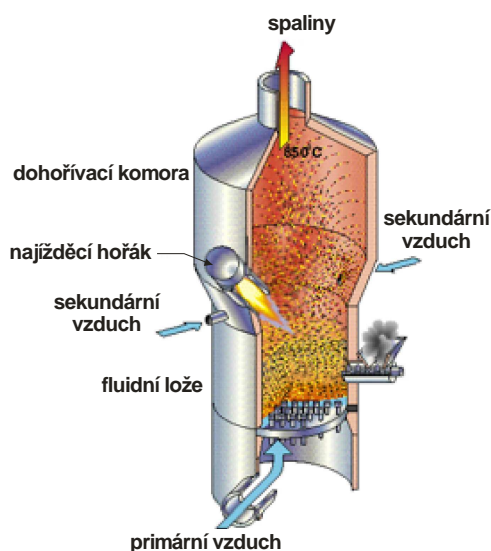
Jednou možností je spalování odvodněného kalu z ČOV. Kal může být spoluspalován s primárním palivem (nebo odpadem), množství přidaného odvodněného kalu se obvykle pohybuje do 5 % spotřeby primárního paliva (nebo odpadu). Takto malý podíl odvodněného kalu nemá významný vliv na proces hoření. Tato varianta ovšem není preferována ze strany provozovatelů těchto zařízení.

Druhou možností je využití nízkopotenciálního odpadního tepla procesu spalování (kolem cca 200 °C) k předsušení kalů v sušárně kalu. Princip je založen na identifikaci vhodného místa s dostatečným tepelným tokem, který je mařen. Využití odpadního tepla z procesů tepláren, elektráren a spaloven se jeví jako perspektivní metoda vedoucí ke zvýšení celkové energetické efektivity zařízení.

### ad3) Speciální spalovny kalu na principu fluidního lože

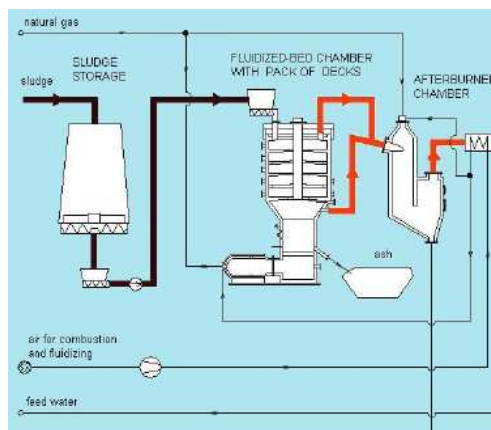
Přímé spalování kalů je obvykle prováděno ve fluidních kotlích, v nichž je fluidní lože tvořeno křemičitým pískem. Odvodněný nebo sušený kal je čerpán do fluidního lože, kde dochází k dosušení (odpaření vody) vznícení a hoření. Teplota nad ložem se obvykle pohybuje v rozmezí 850 až 950 °C. Lehčí organický podíl

odchází ve spalinách, zatímco případný těžší podíl a větší, nespalitelné inertní kusy propadají skrz fluidní pískové lože a jsou odstraňovány ze dna spalovny. Spalovna kalu pracující na principu fluidního lože vykreslena na obr. 21.



**Obr. 21** Spalovna kalu pracující na principu fluidního lože [6]

S výhodou při spalování průmyslových kalů např. z provozu výroby papíru a celulózy využíváme princip etážové pece v kombinaci s fluidním ložem, kde dochází k předsušení kalu na jednotlivých etážích spalinami odcházejícími z fluidního lože. Kombinace etážové pece s fluidním ložem zobrazena na obr. 22.



**Obr. 22** Kombinace etážové pece s fluidním ložem [6]

Využití koncepce fluidního lože je technicky i provozně ověřeno a jedná se nejvyužívanější metodu přímého termického zpracování kalů.

### 3.5 Skládkování

Tato metoda byla před vstupem do EU v ČR značně využívána, a to především pro technologickou a finanční nenáročnost. Současně je však ukládání

kalů na skládky omezeno zákonem č. 185/2001 Sb. A rovněž vyhláškou č. 383/2001 Sb.

Skládkování představuje ukládání kalů (nebo jiných tuhých odpadů) soustředěných na vybraných místech – řízených skládkách. Jsou to v dnešní době technická zařízení provozovaná za určitých provozních podmínek a kontroly vlivu na životní prostředí. Moderní skládka musí být vybavena těsnícím a drenážním systémem, zařízením na příjem, hutnění a ošetření odpadu, příp. systémem na jímání skládkového plynu (bioplyn). Po ukončení provozu skládky je nutná její technická a biologická rekultivace. Na skládky se ukládají jen kaly, které překračují mezní hodnoty právních předpisů a proto je nelze jinak využít [17].

Cílem Evropské unie je upravit odpadovou legislativu postupně tak, aby bylo skládkování biodegradabilních materiálů odpadů (včetně kalů) v budoucnosti zakázáno [16].

### **3.6 Alternativní a méně používané metody využití kalů**

#### **3.6.1 Náhrada výrobní suroviny – materiálová recyklace na výrobě cihel**

Má příznivé podmínky pro suché i vlhčené materiály, ale vyžaduje dokonalou homogenizaci surovin s přísávkem kalu.

#### **3.6.2 Výroba bílkovinného krmného koncentrátu**

V této oblasti se prováděly pokusy s aktivovaným kalem. Jeho bakteriální složení podmiňuje vysoký obsah bílkovin, nutričních prvků, stopových prvků a vitamínů.

#### **3.6.3 Vermikompostování**

Spočívá v nasazení velkého množství určitého druhu žížal (*Lumbricidae*, *Eisenia Foetida*, *Perionix Excavatus*), které svým metabolismem součásti kompostu zpracovávají ve vysoce hodnotné hnojivo s vysokým obsahem huminových a fulvokyselin, hormonů a enzymů.

#### **3.6.4 Výroba pelet**

Pelety jsou ekologické bio palivo vyrobené z obnovitelných surovin (dřevní odpad sláma), je obohacené o čistírenské kaly, které zde slouží pro zlepšení soudržnosti produktu. Technologie výroby spočívá ve smíchání dřevěné štěpky, slámy a kalů. Směs se zhomogenizuje a stabilizuje aerobní fermentací, pak se dosouší a lisuje do pelet nebo granuluje.

#### **3.6.5 Využití kalů pro intenzivní pěstování biomasy k produkci bioplynu**

Na zemědělsky horších pozemcích se produkuje fytomasa s využitím stabilizovaných čistírenských kalů jako hnojiva. Sklizená fytomasa se skladuje a případně zakonzervuje nebo jinak upraví a ve vhodnou dobu ji přidáváme do stabilizační nádrže ČOV (což je prakticky bioplynová stanice) ke zvýšení produkce bioplynu. Ten se pak v kogeneračních jednotkách přemění na elektrickou energii a tepelnou energii ve formě teplé vody.

#### **3.6.6 Pyrolýza – zplyňování kalů**

Jednou z alternativních možností tepelné degradace kalů je jejich zplyňování. Zplyňování kalů je přeměna usušeného kalu v plynné palivo prostřednictvím

zplyňovacího média, kterým může být vzduch, popř. kyslík. Zplyňování je složitý chemický proces, kde jsou rozhodující reakce mezi pevnou látkou a vzduchem

### **3.6.7 Mokrý oxidace kalu – přídatné palivo**

Při tomto procesu dochází k oxidaci spalitelných látek z roztoku či suspenze, pokud je k dispozici energie umožňující intenzivní oxidaci. Oxidaci způsobuje kyslík rozpouštěný v suspenzi za zvýšené teploty a zvýšení tlaku [16].

### **3.6.8 Solidifikace**

Jedná se o speciální případ fyzikálně – chemického zpevnování stabilizací na pevný produkt. Roztok, suspenze a kal se převede na stabilní zrno (blok, tvárnice), čímž se zlepší manipulovatelnost a výrazně omezí vyluhovatelnost původního odpadu. Zamezí se tím migrace nebezpečných složek do životního prostředí a umožní bezpečné ukládání na skládky [16].

## 4. Desintegrace

Kapitola č. 4 byla zpracována s využitím literatury [19], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29] a [30].

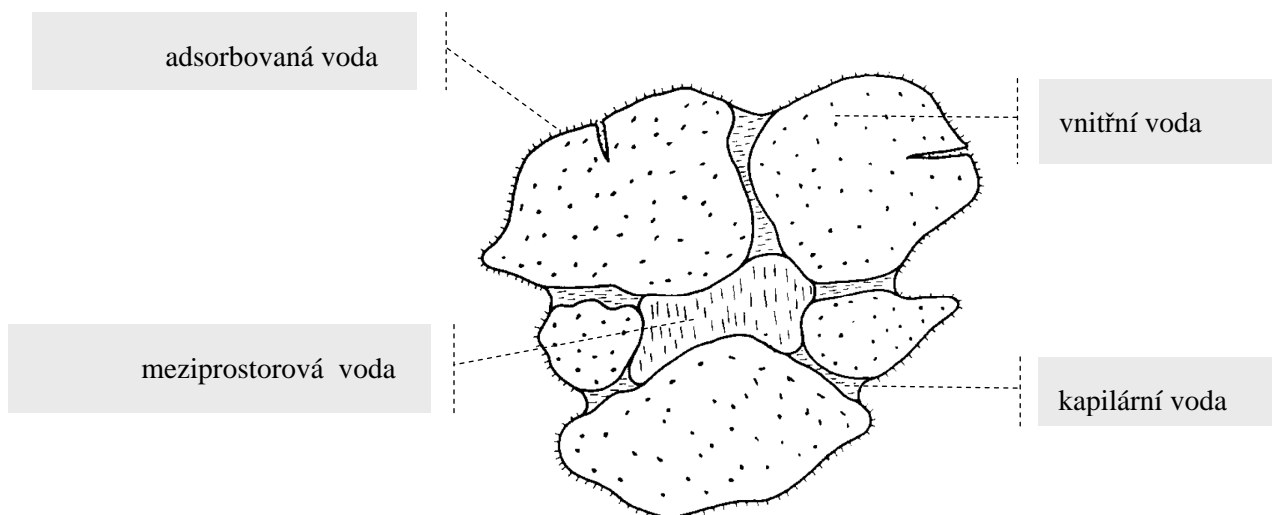
Čištění odpadních vod s procesem aktivace kalu, generuje velký přebytek kalů. Navíc díky přísnějším limitům na čištění odpadních vod, produkce kalů stále narůstá. Například v roce 2000 byla produkce kalů v EU odhadovala na 8,9 miliónů tun, v roce 2005 už se produkce odhaduje v rozmezí 15 - 20 miliony tun sušené hmoty. Skladování tohoto druhu odpadu je předmětem mnoha vážných sporů ať už společenských, ekonomických, či enviromentálních. Nakládání s kaly obsahující těžké kovy může vést k ohrožení životního prostředí, pokud jsou využity v zemědělství nebo pro rekultivace. Proto se stalo urgentní záležitostí nalezení řešení za účelem snížení produkce kalů, podporovat zhodnocení kalu v oblasti jeho produkce a neprodukovat pouze odpad, ale také materiál, který může být jednoduše opětovně použit.

Vzhledem k tomu, že výhřevnost kalu a tedy i energetická bilance procesu spalování je silně závislá na stupni odvodnění kalu, je třeba maximalizovat obsah sušiny v kalu při minimální energetické náročnosti na odstranění vody.

Pro energetické využití kalů se jeví tento problém jako klíčový a maximalizace stupně odvodnění kalu je základním prostředkem ke zvýšení efektivity všech variant energetického využití kalu.

V zásadě je možné rozlišovat čtyři druhy vody obsažené v kalu (viz. obr. 23). Jedná se o:

- meziprostorovou vodu – může být odstraněna gravitačním zahušťováním,
- kapilární vodu – může být odstraněna na filtrech, kalolisech nebo odstředivkách,
- adsorbovanou vodu a vnitřní vodu – může být odstraněna sušením,



Obr. 23 Rozložení vody ve struktuře kalu [6]

Pro zlepšení biologické rozložitelnosti kalů a zvýšení stupně odvodnění byla vyvinuta řada metod úpravy kalu, jejichž společnou charakteristikou je desintegrace – rozbití vloček a částic kalu. Současně dochází také k rozrušení struktury buněk mikroorganismů aktivovaného kalu a uvolnění buněčného obsahu do roztoku. Desintegrace tedy slouží ke zmenšení velikosti původních částic kalu a zvýšení koncentrace rozpuštěných organických látek (CHSK) v kapalně fázi. Vzhledem ke zvětšenému povrchu částic dochází k větší přístupnosti při následném biologickém rozkladu, buněčný obsah – buněčný lyzát stimuluje další biologický rozklad působením uvolněných enzymů a růstových faktorů.

Desintegrace se především zaměřuje na rozbití buněk mikroorganismů přebytečného aktivovaného kalu, kde je oproti primárnímu kalu obtížnější dosáhnout biologického rozkladu organického podílu.

Při porušení buněčné stěny dochází k uvolnění obsahu buněk do roztoku, tj. k tvorbě buněčného lyzátu (uvolněný obsah buněk mikroorganismů následkem rozrušení buněčných stěn).

Princip intenzifikace procesu dezintegrací je založen na tom, že již přidání malého množství buněčného lyzátu značně urychlí anaerobní i aerobní biologický rozkladný proces. Buněčný lyzát působí stimulačně buď přímo (enzymy v něm obsažené přímo způsobují lýzy dalších mikrobiálních buněk) nebo nepřímo (je zdrojem růstových faktorů, které stimulují činnost přítomných mikroorganismů). To má za následek celkové urychlení probíhajících biodegradačních reakcí, což znamená zkrácení doby reakce. Mnohem větší množství organických látek je rozloženo za stejnou dobu, čímž se také sníží množství zbývajících nerozloženého materiálu.

Jedním z hlavních přínosů desintegrace je podstatně zvýšená produkce bioplynu, což činí celý proces energeticky výhodnějším, při současném snížení množství produkovaného kalu.

Technicky lze desintegraci provést několika způsoby:

- mechanické metody – mezi tyto metody zahrnujeme desintegraci a mletí tuhých látek přítomných v substrátu různými druhy mlýnů, vysokotlakým homogenizátorem, ultrazvukem, lyzátovací centrifugou a pod.,
- fyzikální metody – fyzikální desintegrace je prováděna ultrazvukem, zmrazováním, rozmrazováním, termickou hydrolýzou, Cambi procesem, ionizujícím zařízením a plazmovými pulsy apod.,
- chemické metody – mezi tyto metody je zahrnuta hydrolýza minerálními kyselinami nebo alkáliemi, také lze provést destrukci složitých organických látek (např. proces KREPRO), ozonizace, oxidace  $H_2O_2/O_2$ , mokrá oxidace apod.,
- biologické metody – do biologických metod je zařazena enzymová nebo mikrobiální předúprava – ukazuje se jako slibný způsob do budoucna, zejména pro specifické substráty (celulóza, liknín),



## 4.1 Mechanická desintegrace

### 4.1.1 Desintegrace buněk mletím v kulovém mlýnu

Vysokorychlostní kulový mlýn je složen z válcové mělníci komory, která má vertikální nebo horizontální polohu. Komora obsahuje rotující disky uložené na hřídeli poháněné motorem (míchadlo) a je téměř úplně naplněna mělníci korálky ze skla nebo umělé hmoty. Rotační pohyb míchadla uvádí do pohybu kuličky a upravovaný materiál. Vlivem vzájemných srážek kuliček a jejich nárazů na stěnu mlecí komory dochází k desintegraci mikroorganismů střížnými a tlakovými silami. Při tomto procesu dochází k uvolnění velkého množství tepla. Při kontinuálním procesu dochází k zachycení kuliček sítím, zatímco suspenze proudí dále skrz mělníci komoru. Účinnost tohoto desintegračního procesu závisí na množství vložené energie, hydrodynamice míchání, rozměru kuliček, geometrii mlecí komory, teplotě procesu, hustotě upravované suspenze a zatížení.

### 4.1.2 Desintegrace v dispersních a koloidních mlýnech

Tato metoda je především využívána pro desintegraci slabě vázaných aglomerátů a emulzí. Je založena na principu vysoké rychlosti střížných sil a způsobuje rozemletí upravovaného materiálu na jednotlivé částičky o velikosti 1  $\mu\text{m}$ . Vlivem vysoké disipace energie dochází ke značnému zvýšení teploty. Koloidní mlýny jsou sestaveny z rotoru a statoru, mezi nimiž je vzdálenost minimálně 25  $\mu\text{m}$ . Rotor má tvar kužele s hladkým nebo vroubkovaným povrchem a otáčí se přibližně rychlostí 3 600 ot./min.

### 4.1.3 Vysokotlaká homogenizace

Vysokotlaký homogenizátor sestává z vícestupňového čerpadla a homogenizačního ventilu. Čerpadlo nasává suspenzi do pístového válce, kde je následně stlačena na tlak několika stovek barů, při průtoku několika kubických metrů za hodinu. Následně suspenze prochází skrz štěrbinou, při čemž dochází ke snížení tlaku pod mez evaporace tekutiny, a rychlost tekutiny roste na 300 m/s. Když kavitační bubliny prasknou, gradient tlaku je zaveden do tekutiny a ten lokálně vyvolá teplotu stovek stupňů Celsia a tlakovou vlnu  $500 \times 10^5 \text{ Pa}$ . Proces destrukce buněk při vysokém tlaku je skoro téměř nezávislý na koncentraci biomasy.

### 4.1.4 Kavitace

Jedná se o velmi účinnou metodu desintegrace buněk za současného zachování vlastností zpracované hmoty. Desintegrace je dosaženo protlačováním zmrzlé buněčné pasty přes malou štěrbinu. Proces je veden za velmi vysokého tlaku (550 MPa) a nízké teploty (-27 až -25  $^{\circ}\text{C}$ ). Po průchodu dýzou a uvolnění tlaku dochází v důsledku velkého tlakového rozdílu k roztržení buněk. Tuto metodu rozrušování buněk střížnými silami lze aplikovat na široký okruh biologických materiálů, včetně buněk s pevnou buněčnou stěnou.

### 4.1.5 Vysokovýkonná pulsní metoda

Vysokovýkonná pulsní metoda je elektro-hydraulická metoda. Kal je upravován vysokým napětím (až 10 kV). Při tomto napětí dojde k výboji mezi dvěma elektrodami s periodou pulsu 10 ms. To vyvolává šokové vlny v kalu, které zapříčiní destrukci buněčných stěn. Následuje okamžité uvolnění organických látek.

#### 4.1.6 Desintegrace biomasy mixováním

Dochází k mechanické destrukci buněčných stěn. Rozsah desintegrace roste s rostoucími otáčkami a časem a dále závisí na koncentraci nerozpuštěných látek v kalu.

#### 4.1.7 Desintegrace biomasy zařízeními pracujícími na principu nožů

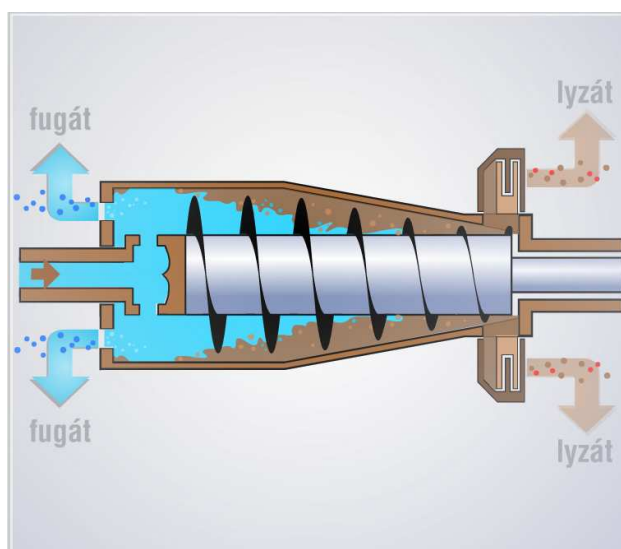
Proud kalů prochází přes přepážku se třemi až čtyřmi rotujícími noži. K desintegraci samotnými noži se tudíž podílí i střížné síly. Mechanický desintegrační stupeň je zařazen před anaerobní reaktor. Zlepšení anaerobní rozložitelnosti přibližně o 25 %.

#### 4.1.8 Desintegrace v zahušťovací odštědivce s integrovaným zařízením pro destrukci buněk

Při centrifugaci kalů obsahujících buňky mikroorganismů (přebytečný aktivovaný kal, anaerobně stabilizovaný kal) dochází k desintegraci určitého malého množství buněk, jejichž obsah se dostává do kapalné fáze. Posílení a využití tohoto procesu je principem lyzátovací centrifugy.

Vhodnou konstrukční úpravou centrifugy lze využít nadbytek kinetické energie centrifugy k většímu rozbití buněk mikroorganismů, obsažených v centrifugovaném kalu. Centrifuga je sestavena z desintegračního (lyzovacího) zařízení umístěného do proudu vstupujícího zahuštěného aktivovaného kalu. Tím lze dosáhnout destrukce podstatně většího množství buněk a vytvořit potřebné množství lyzátu a to vše bez zvýšení elektrického příkonu centrifugy. Destrukce buněk probíhá jako vedlejší proces při zahušťování biomasy, není zapotřebí speciálních samostatných zařízení.

Výhodou toho, že lyzace probíhá v centrifuze v oblasti zahuštěného kalu je, že nedochází k ovlivnění jakosti centrátu. Další výhodou této úpravy je, že lyzátovací zařízení může být namontováno dodatečně i do centrifug, které jsou již v provozu a tak je možno stávající zahušťovací centrifugu přeměnit na lyzátovací. Množství rozbitých buněk závisí na parametrech centrifugy (počet otáček, průměr bubnu a pod.), na druhu rozrušovacího zařízení a na druhu a kvalitě biomasy (zpracovávaného aktivovaného kalu). Kal zahuštěný lyzátovací centrifugou je dále podroben anaerobní stabilizaci. Princip lyzátovací odštědivky je patrný z obr. 24.



Obr. 24 Schéma principu funkce lyzátovací odštědivky (LYSATEC) [43]

## 4.2 Fyzikální metody

### 4.2.1 Ultrazvukové a radiační metody

V současnosti se jedná se o jednu z nejvíce perspektivních metod pro redukování produkce kalů. Kal je podroben ultrazvukovým vlnám za účelem zvýšit schopnost biologického rozpadu před anaerobním vyhníváním nebo recyklací v provzdušňovací nádrži. Působení ultrazvuku na fyzikálně-chemické vlastnosti kalu způsobuje uvolnění organických komponent: COD, proteinů, nukleových kyselin, polysacharidů, zmenšuje velikost vločky a zvyšuje biologický rozpad.

Těžké kovy obsažené v odpadních vodách jsou z důvodu své vysoké toxicity značně znepokojujícím faktorem i vzhledem k minerálním látkám obsažených v odpadních vodách. ČOV jsou odpovědny za zproštění životního prostředí od těžkých kovů. Nicméně navržená kritéria pro biologické čištění odpadních vod jsou hlavně zaměřena na odstranění organických částic organismy aktivovaných kalů. Odstranění těžkých kovů v těchto systémech bylo (a je) považováno za postranní přínos. Během ultrazvukové vibrace a dodatečnému biodegradačnímu kroku, dochází k ovlivnění především organických částic a konečné množství odpadního aktivovaného kalu klesá. Minerální a/nebo nebiodegradační komponenty jako těžké kovy, nejsou ovlivněny a mohou se akumulovat v kalu a nebo být uvolněny v kapalné fázi.

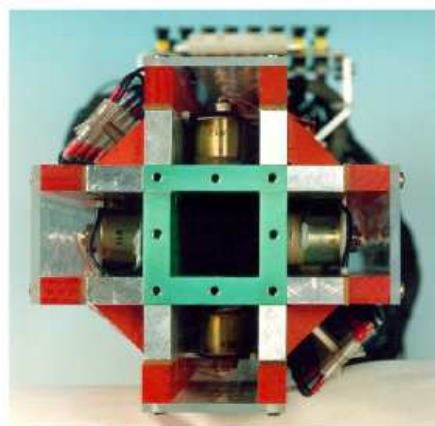
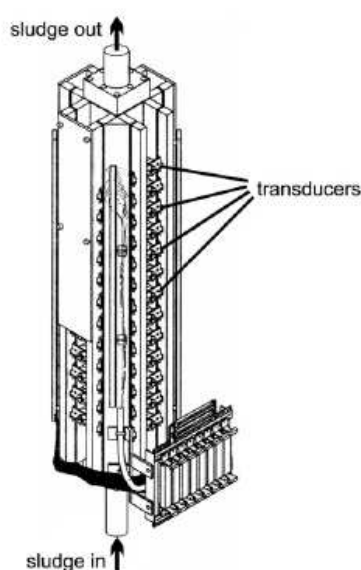
Působení ultrazvukových vln na kapalinu způsobuje periodické stlačování a uvolňování média. Nad určitým prahem intenzity dochází ke kavitaci, přičemž se tvoří bubliny plynu, které se nejprve zvětšují a pak prudce, během několika mikrosekund, prasknou. Toto prasknutí vytváří velmi silné hydromechanické střížné síly v médiu obklopujícím bublinu. Pokud působíme ultrazvukem pouze po krátkou dobu, dochází jedině k deaglomeraci vloček kalu bez destrukce buněčných stěn. Delší působení hydrodynamické střížné síly produkované ultrazvukovou kavitací poruší buněčné membrány a jiné buněčné struktury a rozpuštěné organické látky jsou uvolněné do roztoku. Mechanické síly jsou nejefektivnější při frekvencích 20 – 100 kHz. Teplota a tlak uvnitř praskajících bublin může vzrůst až na 5 000 K a na několik stovek atmosfér. Tyto extrémní podmínky mohou vyvolat termickou destrukci látek obsažených uvnitř těchto bublin a vznik velmi reaktivních hydroxylových radikálů. Příklad ultrazvukového reaktoru uveden na obr. 25.

#### Legenda:

Sludge in – kal vstupující

Sludge out – kal vystupující

Transducers - snímače



**Obr. 25** Schéma hlavního ultrazvukového reaktoru (STN ATLAS Elektronik) [26]

## 4.2.2 Termická desintegrace

Termickou úpravou čistírenských kalů dochází k hydrolýze tuhých buněčných komponent. Vysoká teplota naruší buňky a způsobí hydrolýzu proteinů, uhlovodíků, tuků a dalších makromolekul vylučovaných z buňky. Působením termické úpravy se však mohou rozpouštět, popř. mohou vznikat sloučeniny, které nejsou biologicky rozložitelné. Termická předúprava rozbije stěny a zpřístupní proteiny biologickému rozkladu. Čím vyšší množství kalu, které je předstabilizováno aerobně, tím více proteinů je v kalu a tím vyšší je produkce plynu po termické předúpravě.

Metoda rychlé termické kondicionace biomasy - Materiál určený k tepelné úpravě (přebytečný aktivovaný kal, surový kal a anaerobně stabilizovaný kal) se v termickém reaktoru podrobí krátkému ohřevu (řádově několik jednotek až desítek sekund) při teplotě 100 – 200 °C a tlaku 0,1 – 1,3 MPa. Vlivem destrukce buněk organismů a vylití buněčného obsahu do roztoku, dojde k náhlému uvolnění tlaku a poklesu teploty. Vzhledem ke krátké době působení vysoké teploty nedochází k úplné inaktivaci enzymů a stimulačních faktorů, přestože stupeň desintegrace buněk je vysoký. Technologicky lze proces stimulace anaerobního rozkladu kalů uspořádat tak, že anaerobní reaktor I. Stupně je ohříván teplem z rychlé termické předúpravy. Teplo vnesené do reaktoru s upraveným kalem při správně zvoleném dávkovacím poměru postačí na ohřev systému.

Zmrazování biomasy - K nevratným změnám ve struktuře vloček dochází opakovaným zmrazováním a rozmrazováním buněčné hmoty. Během vytváření krystalků ledu a následného tání v buňce dochází k roztrhnutí buněčných obalů. Tím postupně mohou vznikat větší a větší krystaly, které způsobují i větší destrukci buněk. Do roztoku se uvolňuje vázaná voda, vločky jsou kompaktnější a tím se výrazně zlepšují odvodňovací vlastnosti kalu.

## 4.3 Chemické metody

### 4.3.1 Rozklad kyselinami a louhy

K destrukci některých buněk se používají minerální kyseliny a zásady v různých koncentracích, kdy 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.

Úprava buněk alkáliemi je razantní metoda, kdy při vysokých hodnotách pH média buňky ztrácí životaschopnost a nemohou udržovat vnitřní napětí. To vede k prasknutí buňky a uvolnění buněčného materiálu do roztoku, čímž v roztoku vzrůstá koncentrace proteinů. Když se pH v kalu zvýší, povrch buněk se nabije negativně. Vzniká elektrostatický odpor, který způsobuje desorpci některých částí extracelulárních polymerů. Alkálie reagují s buněčnými stěnami několika způsoby, jedním z nich je saponifikace lipidů buněčné stěny, která vede k rozpuštění membrány. Vysoké koncentrace alkálií vyvolávají mnoho degradací včetně denaturace bílkovin. Tato metoda směřuje jak k rozrušení buněčné stěny, tak k rozbití uvolněných produktů.

### 4.3.2 Detergenty

Pro stabilitu vnější membrány Gram-negativních buněk je velmi důležitá přítomnost některých dvojmocných kationtů, zvláště  $Mg^{2+}$ . Účinnou složkou

detergentů je aniont kyseliny ethylendiamintetraoctové ( $\text{EDTA}^{4-}$ ), který vytváří vazbu s hořečnatými ionty, čímž dochází k destabilizaci nebo dokonce odstranění vnější membrány.

### 4.3.3 Rozpouštědla

Destrukčně na buněčné stěny mikroorganismů působí také organická rozpouštědla jako butanol a horký toluen. Toluén přidaný do biomasy se absorbuje do lipidů buněčných stěn. Dochází k nabobtnání a následnému prasknutí buňky. Účinnost procesu je závislá na teplotě a koncentraci rozpouštědla. Metoda je široce aplikovatelná, nevyžaduje konstrukci specializovaných zařízení a nezanáší zpracovávanou suspenzi cizími ionty. Použitá činidla jsou navíc poměrně levná.

### 4.3.4 Ozonace

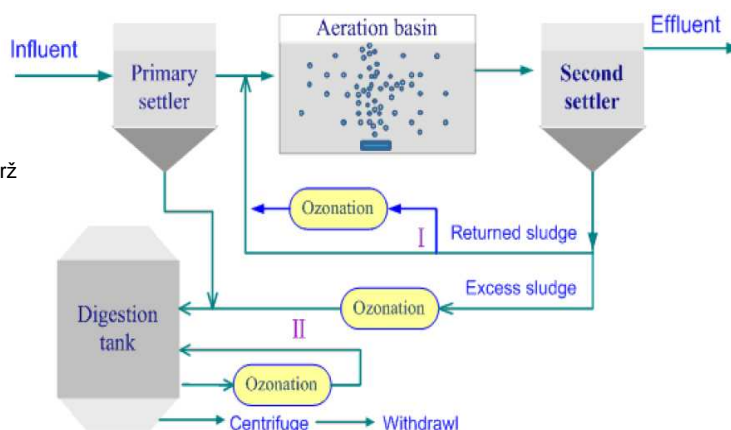
Ozonace kalů je jedna z nejefektivnějších metod k desintegraci kalů. Je dobře zdokumentováno, že množství kalů na výstupu může být značně sníženo pomocí parciální ozonace přebytečného aktivovaného kalu. Ozonace také zlepšuje usazovací vlastnosti kalu a redukuje bobtnání a pění. V Japonsku a některých zemích EU už tato metoda byla úspěšně zavedena do praxe a je nadějným procesem v redukcí kalů.

Ozón je silný oxidant a působí na široké spektrum organických a neorganických chemických sloučenin. Dále silně působí na stěny buněk a může zabít mikroorganismy obsažené v aktivovaném kalu a dále oxidovat organické látky uvolněné z buněk. Proces ozonace kalů je obecně popsán jako postupná dekompoziční reakce desintegrace vločky, rozpouštění, a následná oxidace uvolněných organických částic na oxid uhličitý (mineralizace). Jednoduše se předpokládá, že jeden kyslíkový atom z  $\text{O}_3$  reaguje s oxidantem. To znamená, že 48 g ozonu může stechiometricky rozložit 16 g COD (Chemical Oxidation Demand) (mineralizace). Nicméně zjištěná mineralizace je obvykle nižší než tato hodnota. Při ozonaci také dochází ke snížení počtu patogenních organismů.

Ozón se při anaerobní stabilizaci kalů používá buď k předúpravě přebytečného aktivovaného kalu před jeho vstupem do anaerobního reaktoru nebo se ozonaci podrobí část anaerobně stabilizovaného kalu, který se po ozonizaci vrací zpět do anaerobního reaktoru (viz. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**).

#### Legenda:

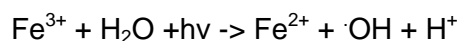
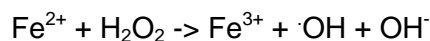
- Influent – přítok
- Primary settler – primární usazovák
- Aeration basin – provzdušňovací nádrž
- Sekond settler – sekundární nádrž
- Effluent – výtok
- Returned sludge – vrácený kal
- Excess sludge – přebytečný kal
- Ozonation – ozonace
- Digestion tank – vyhnivací nádrž
- Centrifuge – odstředivka
- Withdrawal - výstup



Obr. 26 Aplikace ozonace pro při redukcí kalů [30]

### 4.3.5 Solární photo-Fenton reakce

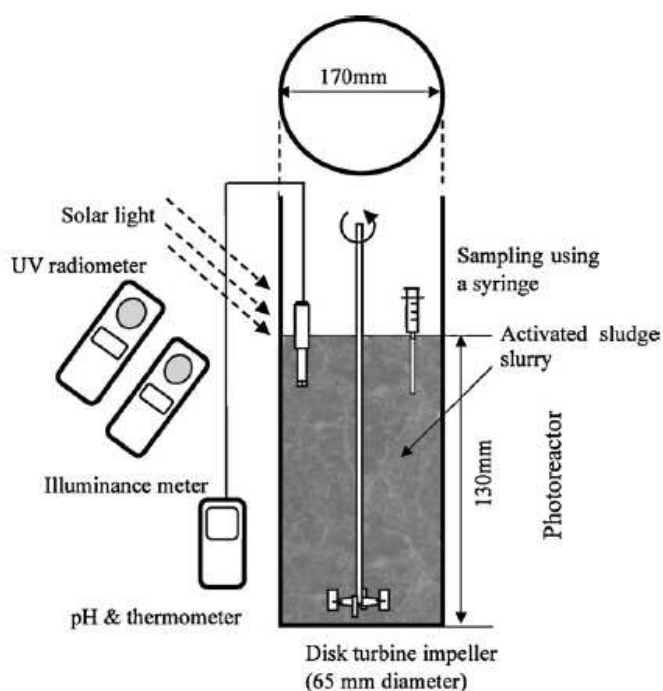
Fentonová reakce byla hlavně používána ke zvýšení odvodnění kalů. Aplikace photo-Fenton reakce (katalytická aktivace  $\text{H}_2\text{O}_2$  s železitými soli) k minimalizaci výstupu aktivovaného kalu mineralizuje část aktivovaného kalu na oxid uhličitý a vodu mimo to rozpouští část aktivovaných kalů na biodegradabilní organické části. Jedná se o kombinaci Fenton procesu a světelné energie, sestávající ze dvou reakcí.



Tyto dvě oxidačně-redukční reakce v photo-Fenton procesu se opakují a produkují  $\cdot\text{OH}$  radikály, které napadají mikroorganismy v přebytečném kalu. Photo-Fenton reakce ničí bakteriální membrány buněk, rozpouští jemné částice biomasy a transformuje je do rozpustných sloučenin jako proteiny, lipidy a polysacharidy. Mrtvé buňky jsou stále nepoškozené a nepoužitelné pro další mikroorganismy jako zdroj energie. Desintegrace buněk uvolňuje buňky obsažené v médiu, tudíž poskytuje autochtonní substrát, který obsahuje organickou náplň. Nejvhodnější světelný zdroj pro tento proces je UV záření, při kterém se dosahuje největších hodnot desintegrace aktivovaného kalu, ale vzhledem k ekonomické náročnosti jsou především využívány solární paprsky. Schéma zařízení pro solární photo-Fenton reakci je uvedeno na obr. 27.

#### Legenda:

- Solar light – solární světlo
- UV radiometer – UV radiometr
- Illuminance meter – luxmetr
- Disk turbine impeller – diskové míchadlo
- PH & thermometer – pH a teploměr
- Activated sludge spurry – aktivovaný kal kašovitý
- Sampling using syringe – vzorkování používající stříkačku



Obr. 27 Schéma zapojení zařízení pro Solární photo-Fenton reakci [29]

## 4.4 Biologické metody

### 4.4.1 Enzymatická lyze a autolýza

Při předúpravě kalů pomocí enzymů dochází k porušení vazeb v buněčných stěnách. Enzymově katalyzovaná reakce rozštěpí sloučeniny buněčné stěny, dokonce Gram-pozitivní bakterie s pevnou a odolnou buněčnou stěnou mohou být

desintegrované pomocí enzymů. Autolýza probíhá při běžné teplotě prostředí. Z důvodu, že jsou enzymy obsaženy ve vnitrobuněčném obsahu je výhodné enzymatickou lyzi kombinovat s mechanickou desintegrací. Enzymy po uvolnění mechanickou desintegrací způsobují další desintegraci buněk. Jako nejúspěšnější pro úpravu primárního kalu se zdá využití enzymů s vysokým obsahem lignocelulózních materiálů. Aplikace enzymů do přebytečného aktivovaného kalu může vést k rychlé degradaci enzymů samotných, dříve než dojde k enzymatické hydrolýze.

#### 4.4.1 Lysozomy

Většina živočišných buněk obsahuje specializované sekreční váčky zvané lysozomy. Jsou obaleny jedinou membránou a obsahují škálu enzymů schopných hydrolyticky štěpit makromolekuly. V lysozomech jsou rozkládány nejen opotřebované molekuly buňky ale také cizorodé struktury jako bakterie, které se po pohlčení buňkou dostávají do váček obklopených membránou, nazývaných vakuoly. Vakuoly tohoto typu mohou splynout s lysozomem, což umožní smíšení obsahu vakuoly a lysozomu uvnitř společné membrány. Při zániku buňky její lysozomy prasknou a uvolní enzymy, které pak katalyzují hydrolytický rozklad složek mrtvé buňky. Právě tyto enzymy jsou původem vysoké stimulační aktivity lyzátu a lze jich použít při přípravě lyzátu k rozrušení buněk mikroorganismů přítomných ve zpracovávaném kalu. Využívá se i schopnosti lysozomů živých buněk rozkládat bakterie.

## 4.6 Porovnání způsobů desintegrace

Za nejvýhodnější metodu pro přípravu lyzátu lze považovat tu, která vykazuje nejvyšší účinnost destrukce a dává neaktivnější lyzát. Nejlepší výsledky z hlediska aktivity lyzátu vykazují metody mechanické destrukce, opakované zmrazování a rozmrazování biomasy a ultrazvuková a hydrodynamická kavitace. Účinnost destrukce je v případě lyzátovací centrifugy relativně malá. Při použití chemických metod se zvyšuje polopropustnost buňky a podněcuje částečné uvolnění proteinů.

Společným rysem převážné většiny zmíněných metod předúpravy a desintegrace kalu je jejich vysoká náročnost na zařízení, vysoké náklady na pořízení a jejich dosavadní malá aplikovatelnost.

Tab. 2 uvádí přehled dosud provozně zkušných metod desintegrace a jejich účinek na proces anaerobní stabilizace kalů.

Metoda desintegrace	Dosahovaná účinnost desintegrace [%]	Zvýšení stupně rozkladu [%]
Lyzátovací zahušťovací centrifuga	2,5 - 15	20
Homogenizátor	až 25*	30
Ultrazvuk	až 40*	30
Kulový mlýn	až 30*	20
Termická kondicionace (170 °C)	až 40*	30 - 40

\* účinnost lyzace závisí na vložené energii

**Tab. 2** Zvýšení účinnosti anaerobní stabilizace kalů desintegrací [19]

Všechny dosud popsané metody destrukce buněk mikroorganismů nebo rozemletí kalů vyžadují speciální samostatné zařízení a jsou energeticky náročné.

Výjimku tvoří pouze lyzátovací zahušťovací centrifuga, která je dvojúčelovým zařízením, jejíž primární funkcí je zahušťování a vedlejším desintegrace – lyzace. To činí metodu desintegrace kalu investičně nejefektivnější ze všech dnes známých desintegračních metod. Lyzátovací zahušťovací centrifuga dosáhla v dnešní době široké provozní aplikace, další již provozně aplikovanou metodou je termické metoda. Nadějnou metodou je desintegrace ultrazvukem, která je již především v zahraničí (zejména v Rakousku a Německu) také provozně aplikována, avšak jejímu většímu rozšíření brání vysoké investiční a provozní náklady.



## 5. Návrh provozní jednotky pro tlakovo-termickou desintegraci kalu

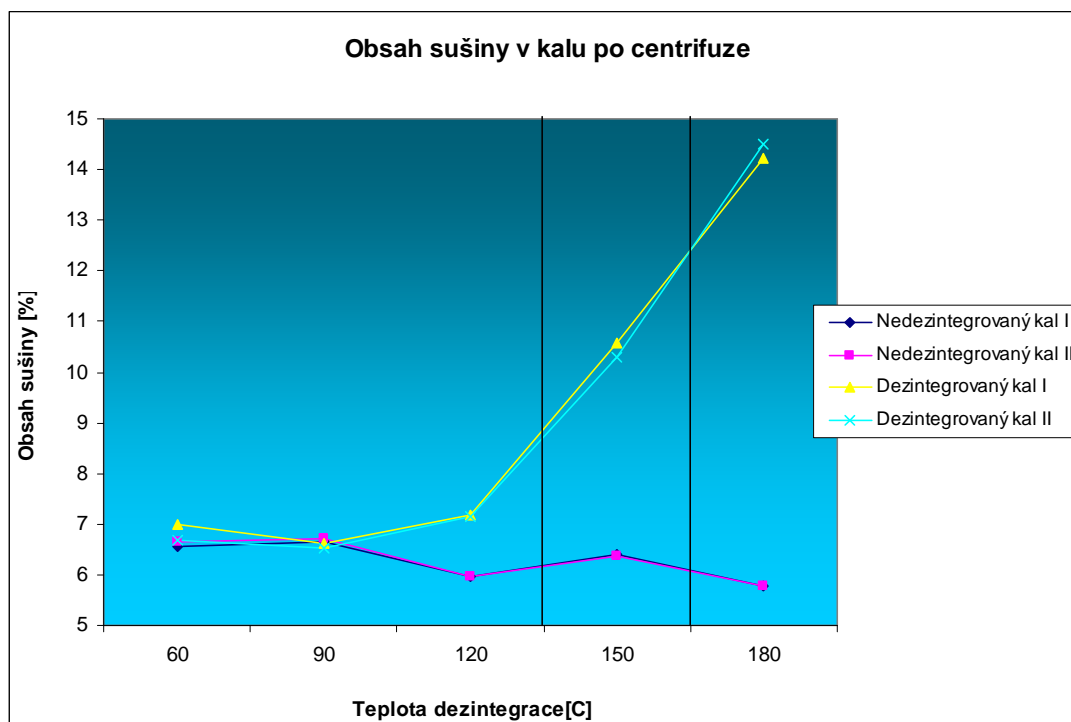
Hodnoty (tab. 3) jsou zadány na základě provedeného laboratorního experimentu, s ohledem na provozní údaje ČOV.

Požadovaná teplota desintegrace	150	[°C]
Tlak	1	[MPa]
Výkon odstředivky	3	[m <sup>3</sup> /hod]
Provoz odstředivky	25	[hod/týden]
Měrné teplo kalu	22	[kJ/kg.K]

Tab. 3 Hodnoty vyplývající ze zadání

### 5.1 Varianty zpracování

Dle dat získaných z experimentálních měření viz [34] a dat vyplývajících ze zadání bylo navrženo několik konceptů desintegrační jednotky. Podle naměřených hodnot viz graf 2., byla jako ekonomicky (při vyšší teplotě významně rostou náklady na ohřev) a také desintegračně nejvýhodnější zvoleno pásmo teplot okolo 150 °C, z grafu vyplývá, že okolo teploty 150 °C dosahujeme dostatečně vysokých hodnot desintegrace.



Graf 2. Obsah sušiny kalu po laboratorní centrifugaci [34]

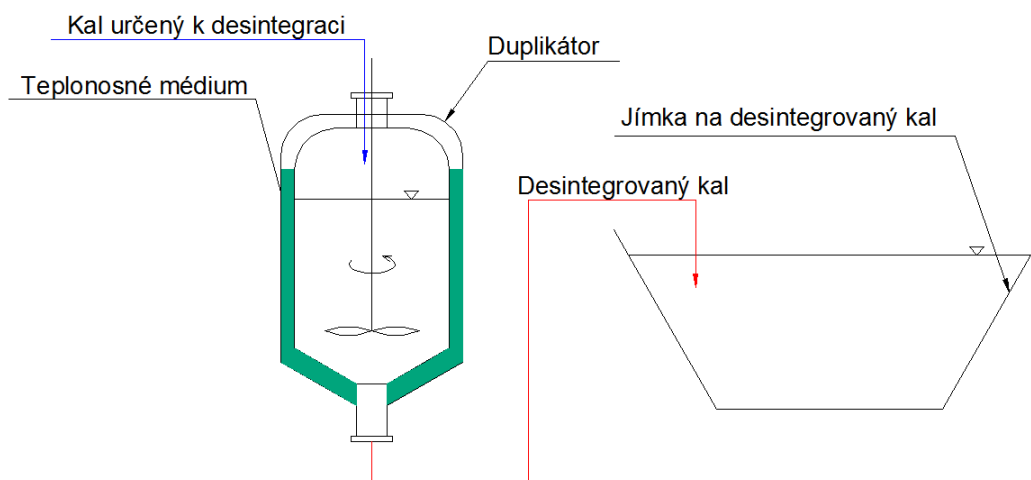
Vzhledem k tomu, že se jedná o doposud neodvodněný kal je přibližně z 94 až 96 % složen z vody, proto bylo nutné do požadavků na desintegrační jednotku určit tlak při němž kal nedosáhne varu. Pomocí softwaru Steam Tables byl zvolen tlak 1 Mpa, při němž kal i s jistou rezervou není schopen dosáhnout varu. Hodnoty získané pomocí Steam Tales jsou uvedeny v tab. 4

Tlak	1	[MPa]
Teplota	150	[°C]
Teplota nasycení	179,8	[°C]
Entalpie	632,5	[kJ/kg]
Entropie	1,8	[kJ/kg.°C]

**Tab. 4** Hodnoty získané pomocí Steam Tables

Při řešení následovalo postupné navrhování způsobů konstrukce desintegrační jednotky. Přičemž důraz byl nejvíce kladen na ekonomiku provozu a jednoduchost provedení.

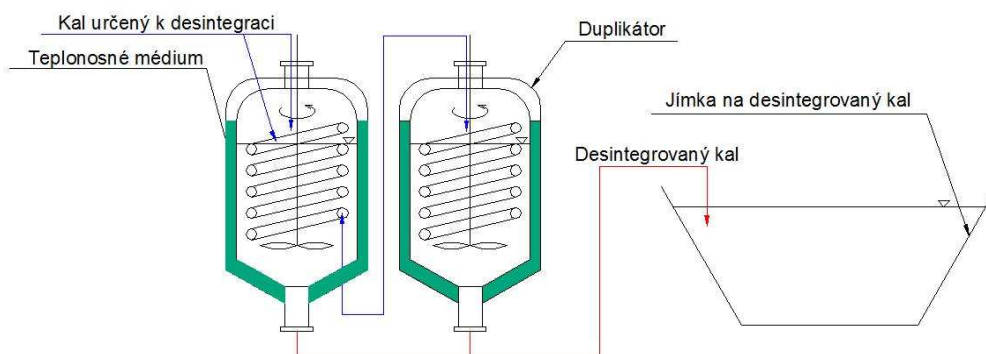
- a) První varianta konstrukce desintegrační jednotky spočívala v duplikátoru s míchadlem v kterém by se ohříval kal teplonosným médiem (olej) a odtud by už desintegrováný kal proudil do jímký, kde by byl ochlazen na teplotu 90 °C a nižší, při níž by mohl postoupit na odstředivku. Tato metoda byla zavržena z důvodu velkých tepelných ztrát, protože nedocházelo k žádnému využití tepla z již desintegrováného kalu. Schéma tohoto návrhu je zobrazeno na obr. 28.



**Obr. 28** Schéma první varianty

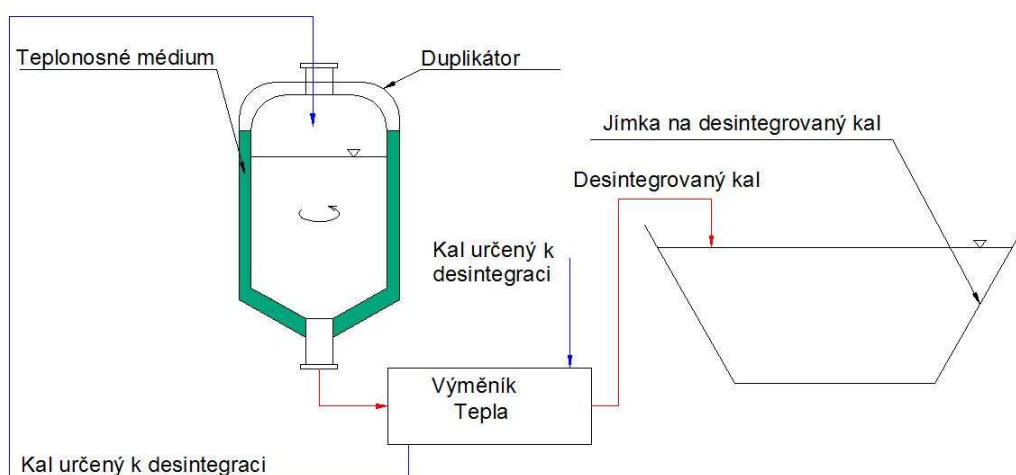
- b) Druhá metoda zahrnovala dvě duplicitní tlakové nádoby (dále TN) s mícháním a spirálou sloužící k výměně tepla mezi desintegrováním kalu a kalu před desintegrací. V tomto případě se nejednalo o kontinuální provoz. Oba duplikátory spolu byly propojeny a po desintegraci došlo k ohřátí nedesintegrováného kalu ve spirále desintegrováním kalu, přičemž

desintegrovaný kal současně byl ochlazován na požadovanou hodnotu. Ohřátý nedesintegrovaný kal poté proudil do druhého duplikátoru, kde došlo k doohřátí na stanovenou teplotu desintegrace, přičemž desintegrovaný kal z prvního duplikátoru byl vypuštěn do jímky. Tento proces nebyl zvolen z důvodu malého využití tepla při ochlazování, složitosti a ekonomickým nárokům vzhledem k použití dvou duplikátorů. Nekontinuální provoz taktéž klade větší nároky na TN, vzhledem k neustálým změnám teploty a tlaku. Schéma je zobrazeno na obr. 29.



**Obr. 29** Schéma druhé varianty

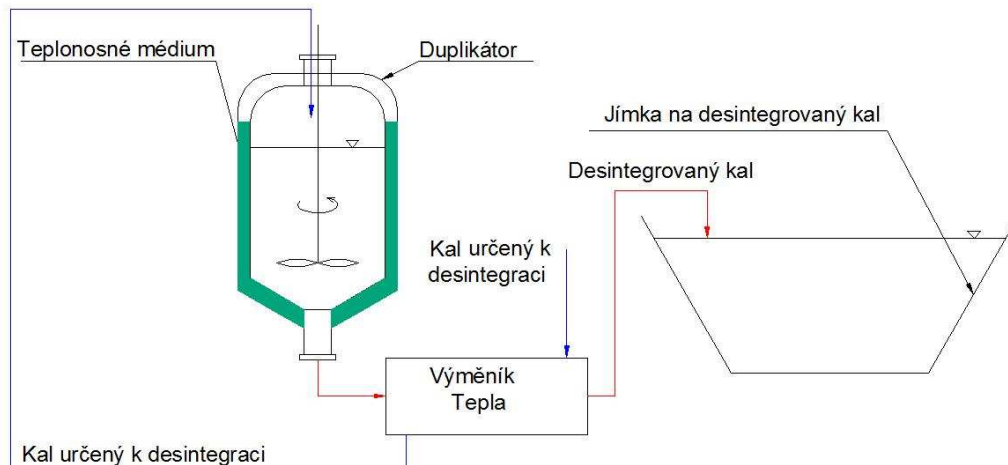
- c) Ve třetím konceptu byla uvažována jedna duplicitní nádoba, kde se uvažovalo, že míchání bude prováděno kontinuálním provozem desintegrace. Do duplikátoru by se neustále vpuštělo a současně také vypouštělo stejné množství kalu. Přičemž na duplikátor by byl napojen tepelný výměník, který by předával teplo z desintegrovaného kalu na kal proudící do tlakové nádoby. Tato varianta byla zavržena, protože se nakonec zdálo nereálné, aby při kontinuálním provozu desintegrace přitékající a odtékající kal dosáhl požadovaných hodnot. Schéma tohoto návrhu je zobrazeno na obr. 30.



**Obr. 30** Schéma třetí varianty

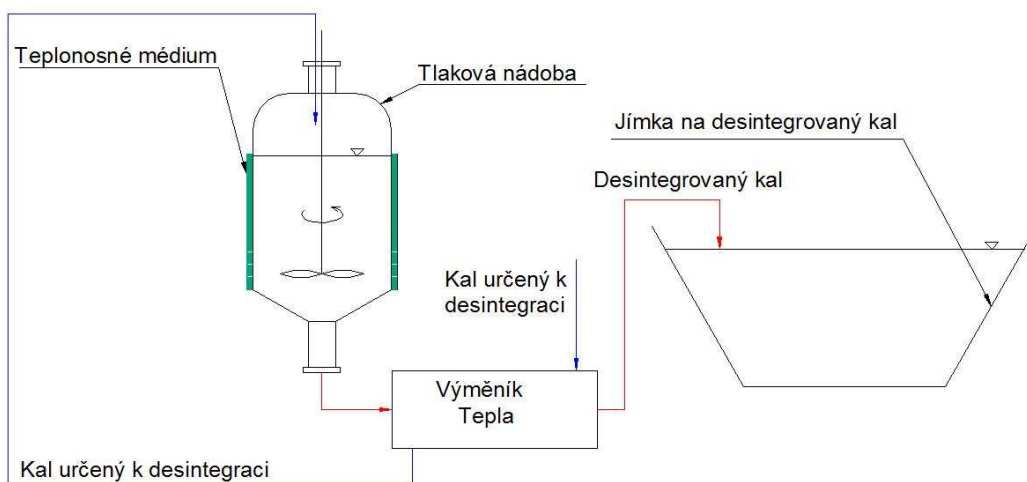
- d) Jako čtvrtá varianta byl uvažován duplikátor s mechanickým mícháním a kontinuálním provozem, přičemž desintegrovaný kal stejně jako ve třetí variantě

předával své teplo v tepelném výměníku nedesintegrovanému kalu (schéma na obr. 31). Toto provedení bylo zvoleno jako doposud nejvýhodnější ovšem vzhledem k složitosti provedení duplikátoru a nemožnosti ovlivňovat proudění teplosného média byla konstrukce jednotky po rozpravě s Ing. Richardem Nekvasilem, Ph.D. upravena.



Obr. 31 Schéma čtvrté varianty

- e) Jako finální koncept byla zvolena TN s míchadlem. Pro ohřev kalu v nádobě bylo zvoleno navaření kanálek pro proudění teplonosného média po obvodě pláště do výšky hladiny desintegrovaného kalu, ve kterých bude dosaženo lepší kontroly nad teplonosným médiem. Stejně jako ve variantě „d“ a „c“ dochází k výměně tepla mezi desintegrovaným kalem a nedesintegrovaným kalem ve výměníku tepla. Schéma je zobrazeno na obr. 32.



Obr. 32 Schéma finální varianty

## 5.2 Navržení předběžných rozměrů tlakové nádoby a teploty teplonosného média

Podle experimentálně zjištěné doby ohřevu kalu v laboratořích na požadovanou teplotu, bylo přepočítáno jak velký objem musí mít tlaková nádoba, aby při kontinuálním provozu dokázala ohřát všechny kal. Muselo se uvažovat s určitou

dobou zdržení kalu v nádobě, protože při desintegraci 75 m<sup>3</sup> nemohla být nádoba pro kontinuální provoz příliš malá. Například při výpočtu se dospělo k tomu, že při kontinuálním provozu dojde k desintegraci zhruba 1 litru kalů za osm sekund, což by znamenalo, že v nádobě o objemu 100 litrů by došlo k výměně celého objemu kalů přibližně za 14 minut. Při této době není možné, aby se objem uvnitř nádoby dokázal zahřát na požadovanou teplotu.

Proto byl objem tlakové nádoby zvolen 2 m<sup>3</sup> (tab. 5), přičemž kal bude vyplňovat zhruba 1,8 m<sup>3</sup>. Zde dojde k výměně celého objemu zhruba během 3 až 4 hodin, vzhledem ke zvolené teplotě teplotního média. To byl další problém se kterým se při návrhu muselo počítat, protože výška teploty teplotního média zásadně ovlivňuje čas nutný k ohřevu kalu uvnitř tlakové nádoby. Podle naměřených hodnot viz [34], bylo patrné, že například při teplotě 180 °C desintegrovaný kal vykazuje značně rozdílné vlastnosti vzhledem k ostatním teplotám desintegrace. Proto jako teplota teplotního média byla zvolena hodnota 160 °C, která by při správném míchání neměla nijak zásadně ovlivnit desintegraci u stěny nádoby a zároveň by mělo dojít ke snadnějšímu ohřevu kalu než při teplotě 150 °C.

Zvolené parametry:

Objem TN	2	[m <sup>3</sup> ]
Objem kalů obsažených v TN	1,8	[m <sup>3</sup> ]
Teplota teplotního média	160	[°C]

**Tab. 5** Empiricky zvolené parametry

### 5.3 Výpočet potřebné doby k ohřevu kalu v tlakové nádobě dle předběžně určených rozměrů

Dle [22], [23] byl proveden výpočet doby nutné k ohřevu kalu uvnitř tlakové nádoby na desintegrační teplotu.

Zvolené hodnoty viz tab. 6.

Vnitřní průměr tlakové nádoby	$D_v$	1,2	[m]
Otáčky míchadla	N	100	[ot/min]
Průměr míchadla	$D_i$	0,4	[m]
Množství teplotosného média	$m_o$	2500	[l/hod]
Průřez kanálku, kterým proudí teplotosné médium		0,0214 x 0,1	[m <sup>2</sup> ]
Součinitel tření pro olej	$\lambda$	0,118	[ - ]
Dynamická viskozita	$\eta$	$1.11 \cdot 10^{-3}$	[ Pa.s ]
Teplota vstupujícího kalu	$T_1$	70	[°C]
Teplota desintegrace	$T_2$	150	[°C]

**Tab. 6** Zvolené hodnoty

Nejprve bylo nutné navrhnout rozměry kanálků na obvodě pláště a předběžně určit jaké množství teplotosného média bude proudit systémem. Dle [31] bylo jako teplotosné médium zvoleno médium na bázi aromatických uhlovodíků DOWTHERM (DIFENYLOVÁ SMĚS – DIFYL). Dále byl pomocí zadaných a vyhledaných parametrů k použitému médiu pro přenos tepla, vypočítán koeficient přestupu tepla  $\alpha$  v kanálkách na obvodě tlakové nádoby. Pro výpočet koeficientu přenosu tepla uvnitř TN vzhledem k nízké viskozitě (hodnoty viskozity byly určeny experimentálně viz. Příloha č.1) nebyly zahrnuty žádné viskozitní korekce. Pouze se počítal geometrický korekční faktor TN a byly vyhledány hodnoty konstant pro náš způsob míchání, které bylo nutné dosadit do výpočtu Nusseltova čísla, z něž se posléze přepočítal koeficient přestupu tepla tlakové nádoby. Při výpočtu celkového koeficientu přestupu tepla nebyla zahrnuta tepelná rezistivita pláště nádoby, ani kanálků z důvodu malého vlivu na výsledek. Hodnota tohoto koeficientu byla poté dosazena do transformované rovnice pro přenos tepla a byl zjištěn potřebný čas (tab. 7) pro zahřátí objemu kalu umístěného v TN. Celý výpočet je uveden v příloze č. 7.

Čas potřebný k ohřevu 1,8 m <sup>3</sup> kalů	t	3,7	[hod]
Celkový součinitel přestupu tepla	U	273,5	[W/m <sup>2</sup> .K]
Nusseltovo číslo	Nus	17 926	[ - ]
Reynoldsovo číslo	Rey	17 926	[ - ]
Prandtlovo číslo	Pr	9,8	[ - ]

**Tab. 7** Čas potřebný k ohřevu kalů

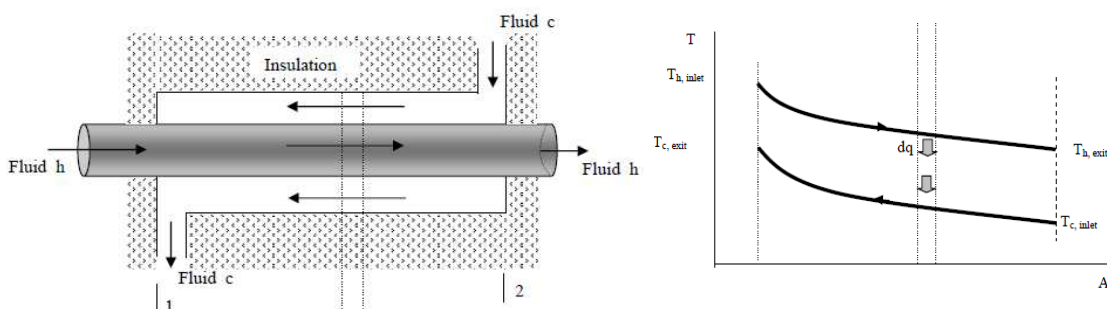
## 5.4 Výpočet tepelného výměníku

K tepelným výpočtům pro návrh tepelného výměníku byl využit software Maple 11. Pro výměnu tepla byl pro náš návrh vyhodnocen jako nejvhodnější výměník tepla typ „trubka v trubce“ (obr. 33).



**Obr. 33** Výměník tepla „trubka v trubce“ [10]

Nejdříve bylo zapotřebí zadat rovnice geometrie výměníku tepla, ze kterých bylo potřebné stanovit hydraulické průměry trubkového a mezitrubkového prostoru. Bylo zvoleno indexování „1“ pro trubkový prostor (TP) a „2“ pro mezitrubkový prostor (MP). Dále byly zadány rovnice pro výpočet Reynoldsova čísla a rychlosti toku. Dosazením rychlosti toku z rovnice kontinuity dostáváme vyjádření Reynoldsova čísla pomocí hmotnostního průtoku. Vzhledem k tomu, že se jedná o laminární tok bylo potřebné určit je-li možné zanedbat vliv současné volné konvekce. Podmínka pro zanedbání stanovuje, že hodnota součinu Grashofova (Gr) a Prandtlova (Pr) čísla musí být menší než  $2 \times 10^5$ . V našem případě po vyčíslení hodnot Pr a Gr a jejich následném součinu vyplývá, že volná konvekce se významně uplatňuje a musí být proto zahrnuta při výpočtu Nusseltova čísla. Následně je zapotřebí vyjádřit přenosovou rovnici, přičemž je v našem případě uvážováno s protiproudým uspořádáním toku (znázorněno na obr. 34).



**Obr. 34** Schéma protiproudého uspořádání toku [10]

Pro součinitel prostupu tepla je uvažováno se zanášením na obou stranách. Poté byl vyjádřen součinitel přestupu tepla v TP i MP z Nusseltova čísla pro laminární tok. Následně bylo dosazeno do přenosové rovnice součinitele přestupu a prostupu tepla, čímž se získá přenosová rovnice v komplexním tvaru. Následovalo vyjádření vztahů pro délku výměníku z komplexní přenosové rovnice. Dalším potřebným bodem je určení tlakových ztrát v TP a MP. Při návrhu výměníku bylo uvažováno, že bude zhotoven z nových trubek o standardní drsnosti. Následně byly zadány všechny potřebné parametry za stanovených teplot pro výpočet výměníku tak, aby bylo možné vyčíslit hodnoty. Dále byly vyhledány hodnoty součinitele zanášení pracovních látek (viz. [32]) a známé parametry výměníku tepla (viz. [21]). Z dispozičního hlediska byla jako vhodná délka trubek zvolena délka 2,5 m.

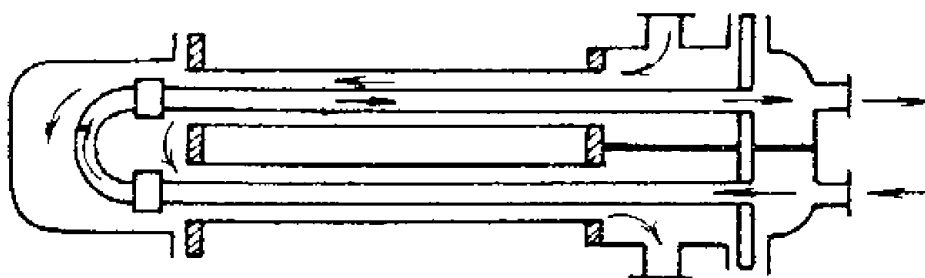


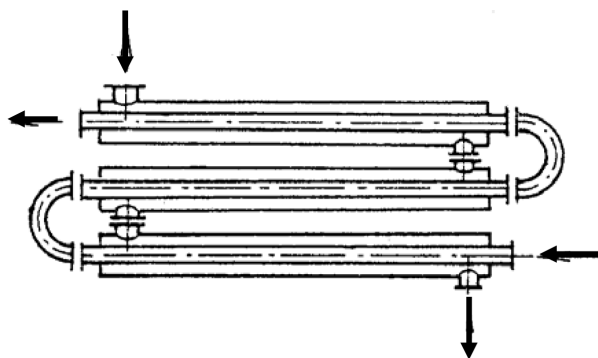
Vstupní hodnoty pro výpočet viz tab. 8.

Parametr	Zkratka	TP	MP	Jednotka
Průtok	m	0,124	0,124	[m <sup>3</sup> /s]
Dovolená tlaková ztráta (zvolena empiricky)	dP	140 000	120 000	[Pa]
Teplota na vstupu	t	150	10	[°C]
Teplota na výstupu	t	90	70	[°C]
Dynamická viskozita	$\eta$	0,06	0,174	[kg/m.s]
Střední dynamická viskozita	$\eta_w$	0,0851	0,0851	[kg/m.s]
Součinitel roztažnosti	$\beta$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	[-]
Hustota	$\rho$	943,1	988	[kg/m <sup>3</sup> ]
Měrné teplo	$c_p$	4 171,4	4 058,6	[kJ/kg.K]
Měrné teplo střední	$c_{p, str}$	4 105,6	4 049,2	[kJ/kg.K]
Součinitel zanášení	$R_z$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	[m <sup>2</sup> KW <sup>-1</sup> ]
Délka trubek	$L_{t0}$	2,5	2,5	m

**Tab. 8** Hodnoty vstupních parametrů

Poté došlo k ověření správnosti tepelné bilance. Z čehož vyplynulo, že bilance je provedena dostatečně přesně. Volba konstrukčního uspořádání výměníku byla provedena na základě rozdílu středních teplot. Je možné použít buď provedení U modulu (rozebíratelné provedení - obr. 35) nebo provedení přímé (nerozebíratelné - obr. 36).


**Obr. 35** Výměník tepla „trubka v trubce“ v rozebíratelném provedení [12]



**Obr. 36** Výměník tepla „trubka v trubce“ v nerozebíratelném provedení [12]

V našem případě vyšel rozdíl středních teplot vyšší než 20 °C, proto je nutno volit uspořádání, které umožní rozdílnou tepelnou dilataci trubek a pláště – to umožňuje provedení U modulu (rozebíratelné). Následně se vyjádřil logaritmický teplotní spád v TP i MP.

Vzhledem k tomu, že obvyklá praxe je navrhovat výměník tepla co nejjednodušší, byla pro začátek zvolena jen jedna vnitřní trubka a až průběh výpočtu ukáže, zda volba byla správná, pokud ne, počet trubek se bude zvyšovat. Při předběžné volbě rozměru vnitřní i vnější trubky musíme vycházet z požadavku laminárního proudění a uzpůsobit tomu „nástřel“ Reynoldsova čísla. To pak v závislosti na průměrech, rychlostech, podélných a tlakových ztrátách upravujeme tak, abychom dosáhli co nejvhodnějších rozměrů (tab. 9).

Při výpočtu za laminárního toku, jsme pro iteračně zvolené Reynoldsovo číslo dosáhli parametrů:

Parametr	Zkratka	Vnitřní trubka	Vnější trubka	Jednotka
Iteračně zvolené Reynoldsovo číslo	$Re_y$	159,47	15,9	[ - ]
Rychlost toku	$u$	0,60	0,18	[m/s]
Vnitřní průměr	$d_1/D_1$	0,017	0,036	[m]
Vnější průměr	$d_2/D_2$	0,019	0,04	[m]
Navržená tloušťka stěny	$st$	0,002	0,002	[m]

**Tab. 9** Návrh rozměrů trubek

Dále byly z katalogu [44] podle normy DIN 17 458 zvoleny nejbližší vyšší normalizované rozměry trubek pro předem vypočítané parametry trubek. viz tab. 10.

Parametr	Zkratka	Vnitřní trubka	Vnější trubka	Jednotka
Vnitřní průměr	d1/D1	0,02	0,04272	[m]
Vnější průměr	d2/D2	0,024	0,04826	[m]
Tloušťka stěny	st	0,002	0,00277	[m]

**Tab. 10** Rozměry dle normy DIN 17 458

Následně po zadání rozměrů dle normy DIN 17 458 byl z potřebné plochy výměny tepla vypočítán počet rovných sekcí (sériových výměníků) a zkontrolovány tlakové ztráty (tab. 11). Rovné sekce byly následně přepočítány na tzv. U moduly.

Délka trubek	$L_t$	26,08	[m]
Počet rovných sekcí	$N_v$	10	[-]
Počet U modulů		5	[-]
Tlakové ztráty v TP	$\Delta P_1$	91 801	[Pa]
Tlakové ztráty v MP	$\Delta P_2$	95 137	[Pa]
Výsledná rychlost toku v TP	$u_1$	0,58	[m/s]
Výsledná rychlost toku v MP	$u_2$	0,17	[m/s]
Potřebná plocha výměny tepla	A	1,7	[m <sup>2</sup> ]
Výkon	Q	31,24	[kW]

**Tab. 11** Výsledky kontrolního výpočtu

Pro předehřev kalu před desintegrační jednotkou byl navržen výměník tepla „trubka v trubce“, který bude mít 5 U modulů o celkové délce trubek  $L_t = 26,08$  m, plochy výměny tepla  $A = 1,7$  m<sup>2</sup> a výkonu  $Q = 31,24$  kW.

## 5.5 Návrh tlakové nádoby a její pevnostní výpočet

Požadavky na tlakovou nádobu jsou uvedeny v tab. 12.

Vnitřní průměr TN	$D_v$	1,2	[m]
Vnější průměr hrdla pro odvod kalu	$d_i$	0,024	[m]
Vnější průměr hrdla víka	$d_{eb}$	0,055	[m]
Výška pláště	$x_l$	1,45	[m]
Délka tyče míchadla	$x_m$	1,6	[m]

**Tab. 12** Parametry tlakové nádoby

Výpočet byl proveden Softwarem dodaným firmou SANT ' AMBROGIO S.I. sr1 – Miláno, Italy.

Nejprve bylo zapotřebí stanovit ke zvolené oceli 17 240 dovolené napětí z materiálových charakteristik (viz tab. 13) oceli určených normou [21].

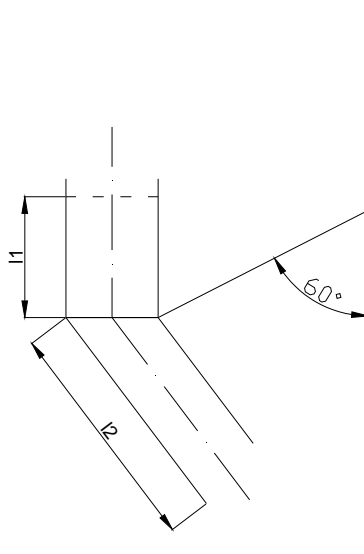
Mez kluzu	$R_{p1,0/t}$	172	[MPa]
Mez pevnosti	$R_{m/t}$	420	[MPa]
Svarový součinitel	$z$	0,7	[ - ]

**Tab. 13** Parametry zvolené oceli 17 240

Výpočet je softwarem prováděn dle [20]. Tloušťka stěny pláště tlakové nádoby je vypočtena ze zadaných parametrů přetlaku uvnitř nádoby, dovoleného napětí a svarového součinitele, přičemž dovolené napětí ještě muselo být transformováno z důvodu, že se jedná o pevnostní třídu 4. Ta je využívána pro běžné strojírenské součásti, které nejsou extrémně namáhány. Následně byl rozměr při zvážení možných nepřesností a rozdílech v drsnostech zaokrouhlen vyšší hodnotu. Poté bylo jako dno nádoby zvoleno pro svojí jednoduchost kuželové dno. Kde byla vypočítána tloušťka dna a následně opět zaokrouhlena na vyšší hodnotu. Následoval výpočet délky ovlivněných oblastí, kde musí být použita větší tloušťka stěny (znázorněno na obr. 37). Výpočet je uveden v příloze č.2 a jeho výsledky viz tab. 14.

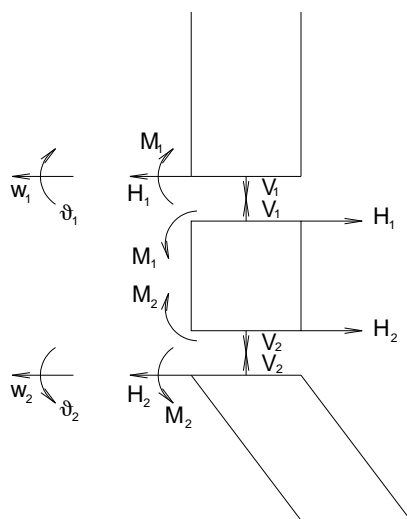
Dovolené napětí	$f_D$	126	[MPa]
Tloušťka stěny TN	$e$	8	[mm]
Tloušťka pláště kónického dna	$e_{con}$	13	[mm]
Ovlivněná oblast pláště (spoj pláště - kónické dno)		240	[mm]
Ovlivněná oblast pláště (spoj pláště - kónické dno)		164	[mm]
Ovlivněná oblast dno (spoj kónické dno – hrdlo)		25	[mm]
Ovlivněná oblast hrdlo (spoj kónické dno – hrdlo)		11	[mm]
Tloušťka pláště v ovlivněné oblasti		10	[mm]
Tloušťka kužele v ovlivněné oblasti		15	[mm]
Tloušťka hrdla v ovlivněné oblasti		5,5	[mm]

**Tab. 14** Parametry pevnostního výpočtu tlakové nádoby



**Obr. 37** Znárodnění délek ovlivněných oblastí

Při pevnostním výpočtu jsou nejprve stanoveny rovnováhy sil a deformační podmínky (viz. obr. 38). Poté jsou vyjádřeny empirické vztahy pro natočení a posunutí. Postupným výpočtem dochází k výpočtu všech neznámých parametrů a určení všech zatížení na kuželové dno (viz příloha č.3).



**Obr. 38** Znáornění rovnováhy sil

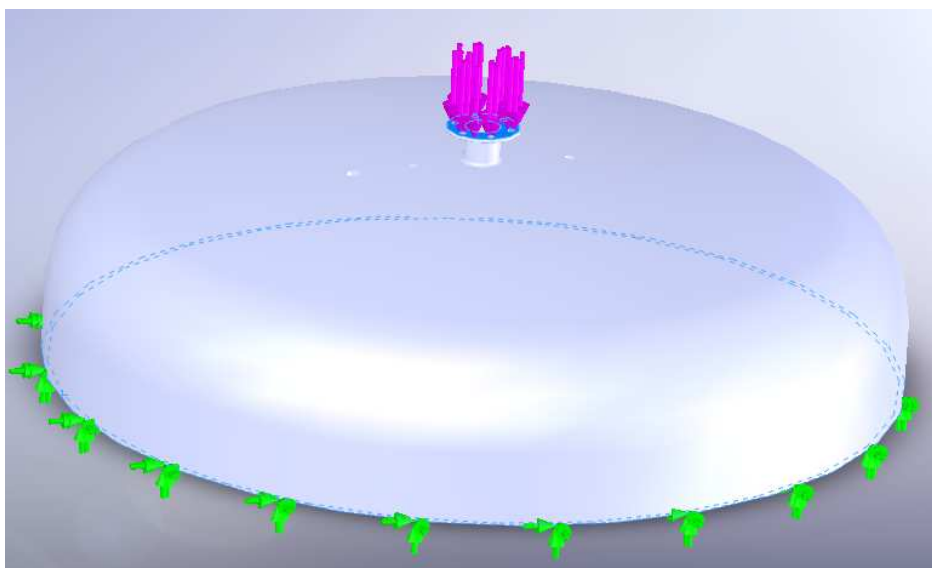
Postup návrhu výpočtu toroidního víka nádoby je obdobný jako výpočet kuželového dna. Je taktéž proveden softwarem dle normy [20]. Při výpočtu se jako jediný otvor kontroloval otvor hrdla, v němž bude umístěno mechanické těsnění pro míchadlo. Ostatní otvory mohou být pro své malé rozměry při výpočtu zanedbány. Z výpočtu vychází, že otvor nemusí být podle [20] považován za kritickou oblast a může v něm být uloženo mechanické těsnění. Hodnoty výpočtu jsou uvedeny viz příloha č. 4. Parametry toroidního víka viz tab. 15.

Tloušťka toroidního víka	$e_n$	8	[mm]
Vnitřní rádius zaoblení víka	$r$	1000	[mm]
Hmotnost míchadla a el. motoru		~30	[kg]

**Tab. 15** Parametry toroidního víka

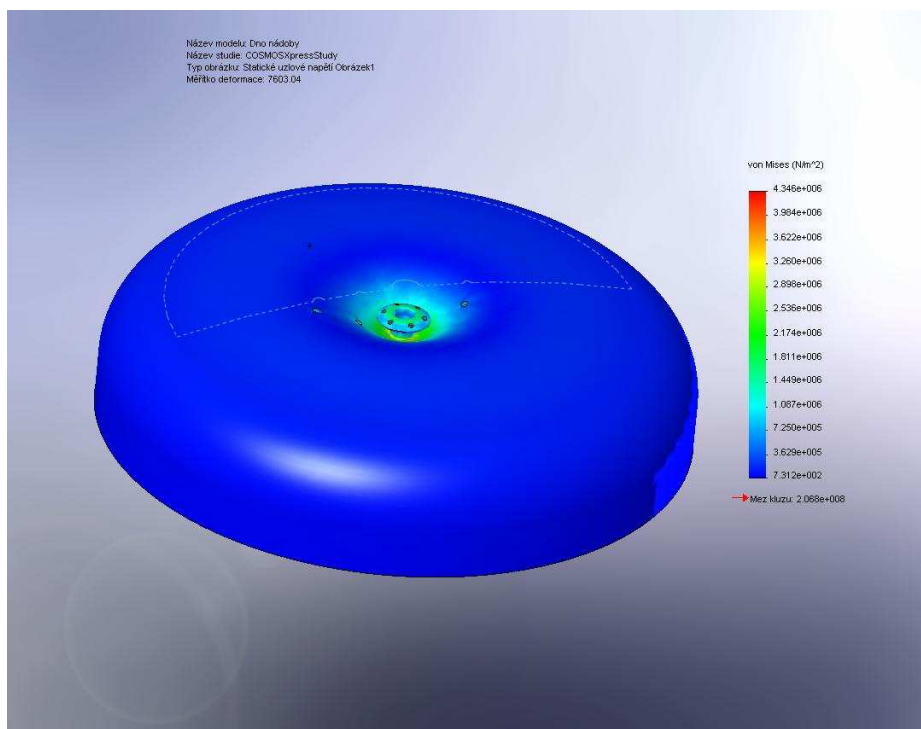
Na toroidním víku byl následně proveden pevnostní výpočet na kontrolu hrdla a víka proti hmotnostnímu zatížení míchadlem a elektrickým motorem. Model víka byl vytvořen programem SolidWorks, kontrolní výpočty byly poté provedeny aplikací COSMOSXpressStudy.

Znázornění sil působících na toroidní víko je ukázáno na obr. 39.

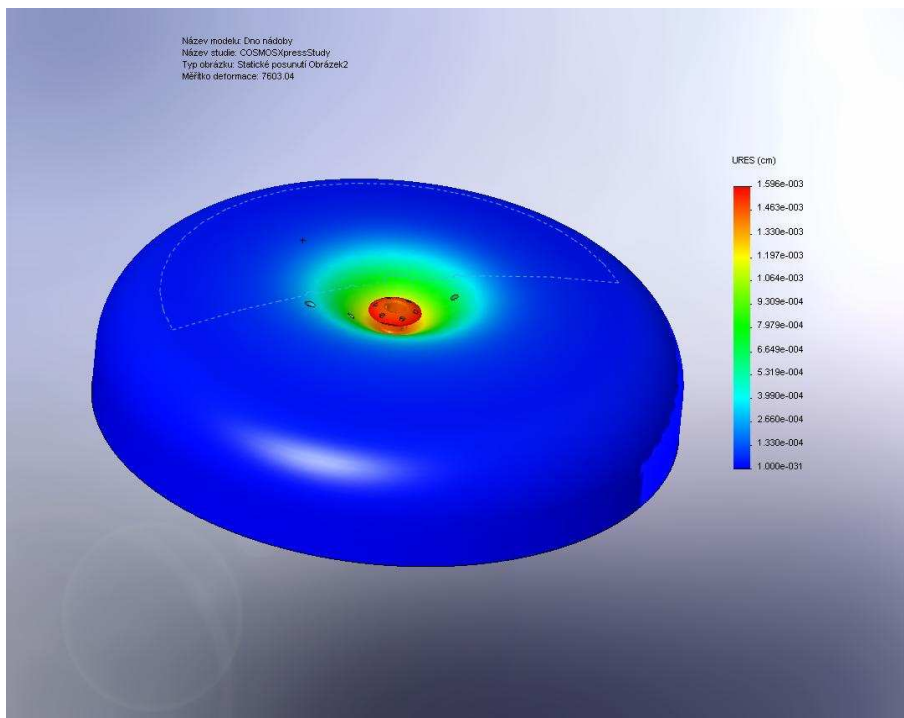


**Obr. 39** Znázornění sil působících na toroidní víko

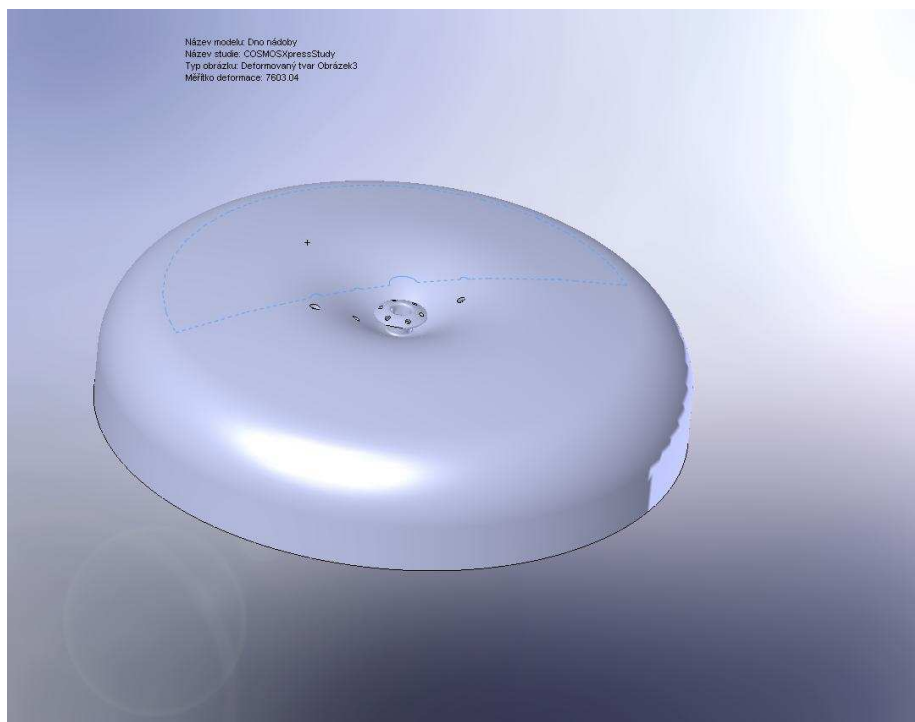
Dále jsou na obrázcích znázorněny modely zobrazující minimální a maximální možné napětí (obr. 40), minimální a maximální posuv (obr. 41), znázornění deformace po překročení maximálních hodnot (obr. 42) a provedení kontroly návrhu (obr. 43). Na obrázcích jsou barevně vyznačeny hodnoty dovolených minimálních hodnot - modrá až po maximální možné hodnoty – červená, tak jak by působily na víko, deformace tvaru na obrázcích jsou záměrně přehnané.



**Obr. 40** Znázornění minimálního a maximálního napětí

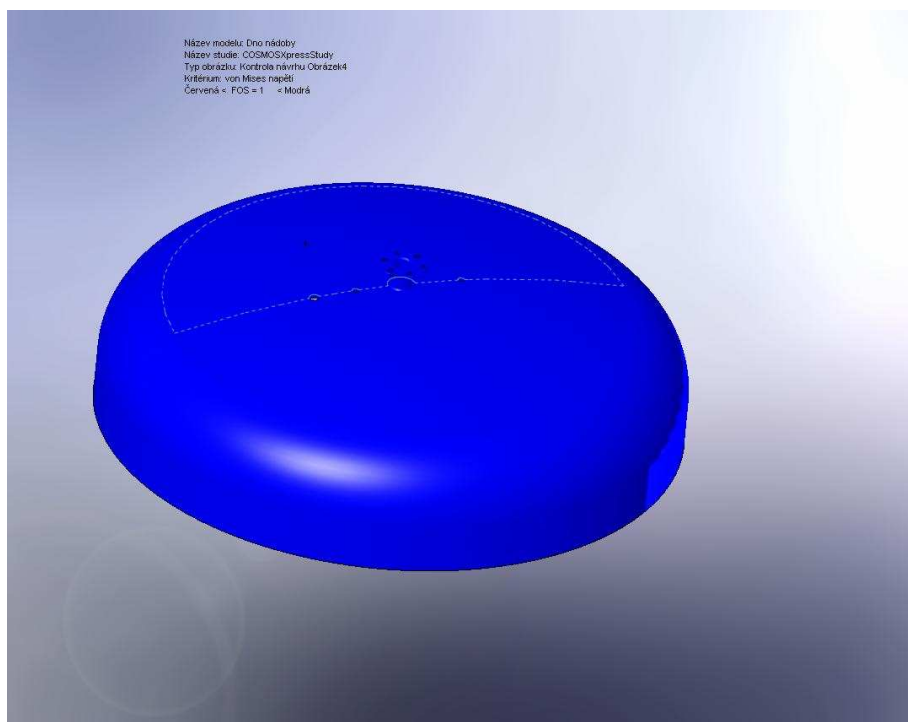


**Obr. 41** Znáznornění minimálního a maximálního posuvu



**Obr. 42** Znáznornění deformace po překročení maximálních hodnot





**Obr. 43** Kontrola návrhu

Z obr. 43 je zřejmé, že vzhledem k modré barvě po celé ploše víka zatížení motoru a míchadla je dokonale rozloženo po toroidní ploše a nezpůsobuje žádné deformace.

Kanátky sloužící pro proudění teplotnosného média jsou především navrženy tak, aby proud kapaliny v nich nebyl příliš silný ani slabý. Tloušťka stěny je vypočítána v závislosti na tlaku uvnitř kanálků a následně je zvolen normalizovaný rozměr. Umístění kanálků je po celém obvodu pláště do výšky hladiny desintegrovaných kalů. Z důvodů větší plochy přenosu tepla jsme zvolili oproti půlválcovému profilu kanálků profil obdélníkový, tvořený svařením plechů ohnutých do tvaru „L“. Tyto kanálky mohou současně sloužit jako výztuha pláště tlakové nádoby. Protože primárně slouží k ohřevu a jejich význam výztuhy není v našem případě uvažován, bylo pro výpočet pouze potřeba vypočítat minimální tloušťku plechu, ze kterého se budou vyrábět. Parametry kanálků viz příloha č.5 a tab. 16.

Průřez kanálku		100 x 21.4	[mm <sup>2</sup> ]
Tloušťka stěny	$e'$	3	[mm]
Přetlak uvnitř kanálku	$P_c$	0.5	[MPa]

**Tab. 16** Parametry kanálků

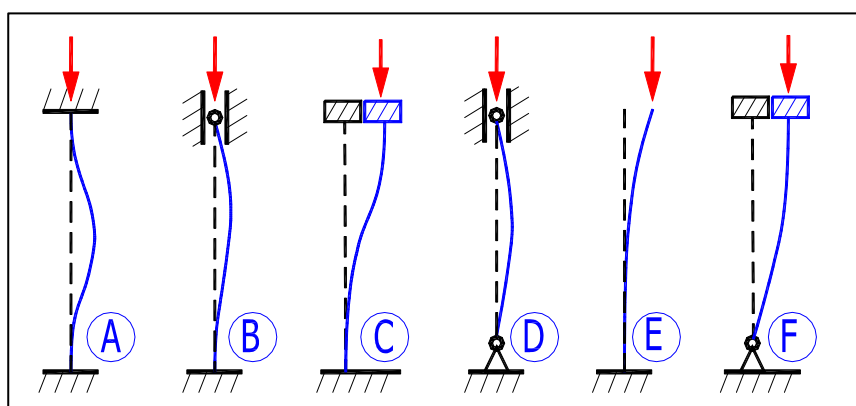
Nakonec byla provedena kontrola podpor tlakové nádoby na vzpěr. Při řešení bylo využito softwaru MITCalc.

V našem případě uvažujeme podporu jako „dlouhý“ nosník (z materiálu 17 240) u nichž k poruše dochází mnohem dříve než napětí přesáhne dovolené

napětí materiálu. K poruše dochází vybočením prutu a jeho zborcením. Dlouhé nosníky se řídí podle Eulerova vzorce v oblasti pružného vzpěru. Byl zvolen "U" profil.

$$F_{CR} = \pi^2 \cdot E \cdot \frac{I_x}{L_{eff}^2} \quad (1)$$

Dle (obr. 44) je zřejmé, že se v našem případě uložení jedná o variantu „C“, a volíme proto příčný koeficient redukované délky.



Obr. 44 Druhy uložení prutů

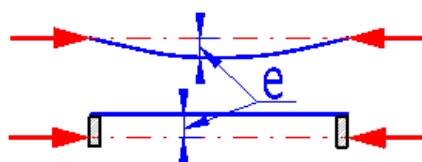
Zadané údaje pro výpočet tab. 17.

Skutečná délka prutu	L	1500	[mm]
Axiální síla	F	*40 000	[N]
Koeficient bezpečnosti	SF	5	[ - ]
Stupeň excentricity	$\mu$	0,25	[ - ]
Koeficient redukované délky		1,2	[ - ]
Mez kluzu v tahu	$\sigma_y$	186	[MPa]
Počet noh		4	[ - ]

\*Záměrně byla z důvodu bezpečnosti zvolena větší axiální síla než předpokládáme.

Tab. 17 Parametry pro výpočet prutu na vzpěr

Stupeň excentricity viz obr. 45 byl zvolen dle doporučených hodnot pro ocelové konstrukce.

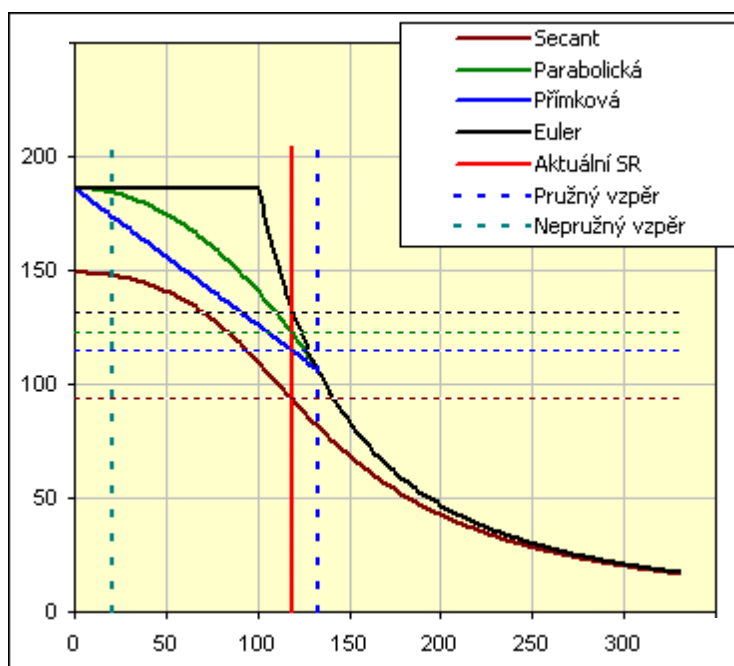

**Obr. 45** Znáznornění stupně excentricity

Vypočítané parametry tab. 18.

Prifil U – nejbližší možný dle výp.		60	[ - ]
*Štíhlostní poměr	SR( $\lambda$ )	119,3	[ - ]
Kritické napětí Euler	$\sigma_c$	131,7	[MPa]
Kritické napětí Tetmajer	$\sigma_c$	114,4	[MPa]
Kritické napětí Johnson	$\sigma_c$	121,68	[MPa]
Kritické napětí –secant metoda	$\sigma_c$	92,9	[MPa]
Prostý tlak	$\sigma$	18,56	[MPa]
Koeficient bezpečnosti	SF	10,02	[ - ]
Max. F (Euler)	$F_{max}$	14 191	[N]
Max. F (Johnson)	$F_{max}$	13 111	[N]
Max. F (Secant)	$F_{max}$	10 005	[N]

**Tab. 18** Vypočítané hodnoty vzpěru

\*Štíhlostní poměr (viz graf 3) určuje v jaké oblasti vzpěru (prostý tlak, nepružný vzpěr, pružný vzpěr) nosník je a tím i kontrolní metodu možnou pro zjištění koeficientu bezpečnosti. V grafu je aktuální štíhlostní poměr vyznačen červenou svislou čarou.



**Graf 3. Aktuální štíhlostní poměr**

Z vypočtených parametrů je zřejmé, že profil U - 60 vyhovuje všem požadavkům na zatížení.

Kontrola svaru:

Parametry potřebné pro kontrolu koutového svaru viz tab. 19.

Síla působící na svarový spoj	$F_i$	5 000	[N]
Tloušťka svaru	$a_s$	5	[mm]
Délka svaru	$l$	100	[mm]
Dovolené napětí	$[\sigma]$	142	[MPa]

**Tab. 19** Parametry pro kontrolu koutového svaru

Výpočty:

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{F_i}{a \cdot l} \quad (2)$$

$$[\tau] = \frac{2}{3} \cdot [\sigma] \quad (3)$$

$$\tau < [\tau] \quad (4)$$

Vypočítané hodnoty viz tab. 20.

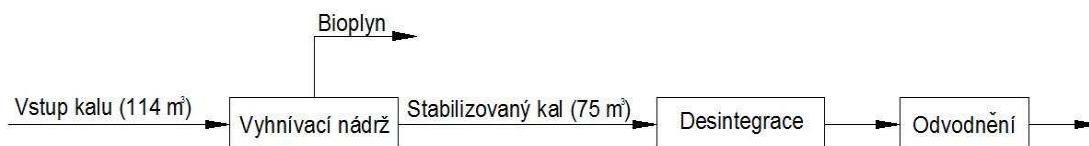
Dovolené smykové napětí	$[\tau]$	94.6	[MPa]
Smykové napětí	$\tau$	10	[MPa]

**Tab. 20** Hodnoty napětí ve svaru

Z výpočtů je zřejmé, že zvolené parametry svaru jsou vyhovující.

## 5.6 Začlenění desintegrační jednotky do procesu zpracování kalu a finální schéma desintegrační jednotky

Umístění desintegrace v procesu zpracování kalu je uvažováno za vyhnívacími nádržemi (procesem stabilizace). Při tomto umístění desintegrační jednotky slouží desintegrace pouze k odvodnění kalu. Schéma procesu zpracování kalu viz obr. 46.



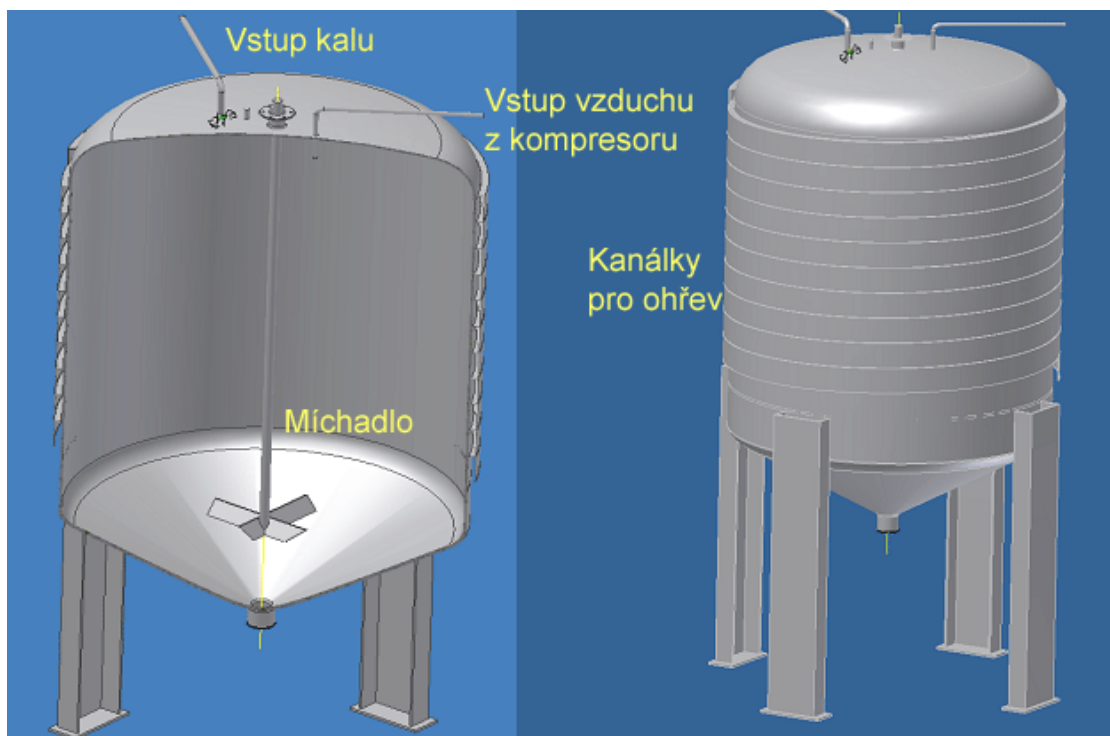
**Obr. 46** Schéma procesu zpracování kalu

Zařízení tvořící desintegrační jednotku jsou uvedeny v tab. 21. Tlaková nádoba, výměník tepla a diatermický ohříváč oleje byly zvoleny na základě tepelných výpočtů. Elektromotor byl vybrán pro potřebný výkon k provozu míchadla. Z důvodu dosažení potřebného počtu otáček je nutné využití frekvenčního výpočtu. Pojistný ventil i kompresor byly vybrány na základě přetlaku v tlakové nádobě 1 MPa.

Tlaková nádoba	2 m <sup>3</sup>
Výměník tepla	5 U modulů
Zařízení pro ohřev oleje	Diatermický ohříváč oleje
Elektromotor	Jednofázový
Frekvenční měnič	Sinamics G110 6SL3211- 0AB12-5
Míchadlo	Čtyř lopatkové
Mechanické těsnění	MR680M
Pojistný ventil	P15 217 540
Kompresor	SKS 9/200/12

**Tab. 21** Použitá zařízení v desintegrační jednotce

Desintegrační jednotka je tvořena tlakovou nádobou (obr. 47). Ve které je kal zahříván na 150 °C, čímž dochází k jeho desintegraci. Ohřívání kalů je rozděleno na dvě části. Nejprve dojde k ohřátí teplotnosného média v diatermickém ohříváči oleje. Poté ohřátý olej proudí do kanálků umístěných na plášti tlakové nádoby, čímž dojde k ohřátí kalu. Po desintegraci postupuje kal do výměníku tepla, kde předá část své tepelné energie nedesintegrovanému kalu, který následně proudí do tlakové nádoby. Celý tento proces je kontinuální. Na víku tlakové nádoby je umístěn elektromotor. Elektromotor slouží k pohonu míchadla umístěného uvnitř tlakové nádoby. Vzhledem k přetlaku uvnitř nádoby musí být pro těsnění míchadla použito mechanické těsnění. Víko je opatřeno pojistným ventilem. Pro udržení požadovaného tlaku  $P = 1 \text{ MPa}$  slouží pístový kompresor.



Obr. 47 3D návrh desintegrační jednotky

## 6. Energetická bilance

### 6.1 Výpočet tepla potřebného pro ohřev

Na základě tepelných bilancí provedených při návrhu tlakové nádoby a výměníku tepla byla provedena bilance celého procesu. Bilance byla provedena pro dobu jedné hodiny. Hodnoty pro výpočet tepelné bilance jsou vyjádřeny v tab. 22.

Při sestavování bilance byly uvažovány následující hodnoty s použitím [10], [31], [23]:

Objemový průtok teplonosného média	$m_1$	0,69	[kg/s]
Měrné teplo teplonosného média	$c_{p1}$	1,59	[kJ/kg.K]
Rozdíl teplot teplonosného média	$\Delta T_{10}$	*38	[K]
Objemový průtok kalu	$m_2$	0,124	[kg/s]
Měrné teplo kalu	$c_{p2}$	2	[kJ/kg.K]
Rozdíl mezi vstupní a výstupní teplotou nedesintegrováného kalu ve výměníku tepla	$\Delta T_{2k}$	60	[K]

**Tab. 22** Hodnoty pro výpočet tepelné bilance

\* vzhledem k tomu, že je použit výměník tepla a kal je tudíž ohříván z teploty  $T_{10} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ , rozdíl teplot  $\Delta T_2$  byl počítán z:

$$m_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_2 = m_2 \cdot c_{p2} \cdot \Delta T_1 \quad (5)$$

$$\Delta T_2 = T_{2o} - T_{1o} \quad (6)$$

Pro výpočet energie potřebné k ohřátí teplonosného média na teplotu  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  předpokládáme, že kal je vzhledem k využití výměníku tepla ohříván z teploty  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  na teplotu  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Energie potřebná pro první cyklus (kdy se uvažuje teplota kalu  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) se vzhledem ke kontinuálnímu procesu zanedbává.

$$Q_{TN} = m_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T_1 \quad (7)$$

Energie získaná výměnou tepla mezi desintegrováním kalu a nedesintegrováním kalu ve výměníku tepla.

$$Q_V = m_2 \cdot c_{p2} \cdot \Delta T_2 \quad (8)$$

Výsledné hodnoty viz tab. 23.

Energie získaná v desintegrační jednotce od teplotního média	41,68	[kW]
Energie získaná ve výměníku tepla	31,24	[kW]

**Tab. 23** Tepelná bilance

## 6.2 Příkon míchadla

Aby došlo k rovnoměrnému prohřátí kapaliny uvnitř tlakové nádoby je potřebné neustálé míchání kalů. Proto, aby bylo možné zvolit ideální elektromotor pro míchadlo, bylo nejprve zapotřebí vypočítat potřebný příkon.

Při výpočtu příkonu byly s využitím [33] uvažovány hodnoty viz tab. 24.

Příkonové kritérium	$P_0$	3	[-]
Otáčky míchadla	$n$	1,67	[ot/s]
Hustota kalů	$\rho$	916,9	[kg/m <sup>3</sup> ]
Průměr míchadla	$D_i$	0,4	[m]

**Tab. 24** Parametry míchadla

Výpočet příkonu míchadla:

$$P = P_0 \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D_i^5 \quad (9)$$

Příkon míchadla	0,13	[kW]
-----------------	------	------

**Tab. 25** Příkon míchadla

## 6.3 Příkon kompresoru

Příkon kompresoru je v energetické bilanci možné zanedbat vzhledem k tomu, že kaly se při zahřátí rozpínají a tím samy za pomoci bezpečnostního ventilu udržují požadovaný tlak. Kompresor je potřeba využít pouze na začátku desintegračního cyklu.

## 6.4 Produkce bioplynu

Výpočet je zaměřen na jednoduchou energetickou bilanci výroby tepla, která potřeby ČOV pokrývá. Taktéž je proveden výpočet náročnosti ohřevu směsného surového kalu přivedeného do metalizačních nádrží.



Výchozí podklady:

<b>Směsný surový kal (SSK)</b>			
Objem přivedeného SSK	$V_{tSSK}$	114	[m <sup>3</sup> /týden]
Obsah sušiny		4	[%]
Organický podíl v sušině		67	[%]
Hustota (SSK)	$\rho_{SSK}$	1020	[kg/m <sup>3</sup> ]
Teplota vstupující vody	$T_1$	10	[°C]
Teplota fermentace	$T_2$	35	[°C]
Energie na ohřev 1 m <sup>3</sup> vody o 1 °C		1,163	[kWh/m <sup>3</sup> ]
<b>Bioplyn</b>			
CH <sub>4</sub>		63,41	[objem %]
Specifická produkce	$V_{spec}$	0,6	[m <sup>3</sup> ]

**Tab. 26** Podklady k produkci bioplynu [36]

Výpočty:

Produkce sušiny SSK za týden :

$$m_{sSS} = V_{tSSK} \cdot \rho_{SSK} \cdot 0,04 \quad (10)$$

Produkce bioplynu za týden:

$$V_{tBP} = m_{sSS} \cdot V_{spec} \cdot 0,67 \quad (11)$$

Výhřevnost bioplynu:

$$Q_n = Q_{CH_4} \cdot 0,6341 \quad (12)$$

Výpočty vztažené na 1 t sušiny SSK:

Množství bioplynu:

$$V_{1B} = 1000 \cdot V_{spec} \cdot 0,67 \quad (13)$$

Energetický obsah bioplynu:

$$Q_{1B} = V_{1B} \cdot Q_n \quad (14)$$

Energie nutná pro ohřev SSK přicházejícího do metalizační nádrže za týden:

$$Q_{tSSK} = V_{tSSK} \cdot 1,163 \cdot (T_2 - T_1) \quad (15)$$

Výsledky této bilance jsou zobrazeny v tab. 27.

Produkce sušiny SSK za týden	4,65	[t/týden]
Produkce bioplynu za týden	1869,8	[m <sup>3</sup> /týden]
Výhřevnost bioplynu	22,70	[MJ/m <sup>3</sup> ]
Množství bioplynu vztažené na jednu tunu sušiny	402,00	[m <sup>3</sup> ]
Energetický obsah bioplynu vztažený na jednu tunu sušiny	2,53	[MWh]
Energetický obsah bioplynu za týden	11,8	[MWh]
Energie nutná pro ohřev metalizačních nádrží za týden	1,06	[MWh]
Zbylá energie bioplynu	10,74	[MWh]

**Tab. 27** Výsledky bilance produkce bioplynu

## 7. Návratnost investic

Pro vyčíslení návratnosti investic je nejprve nutné stanovení pořizovacích nákladů (tab. 28) na potřebná zařízení desintegrační jednotky. Dále je zapotřebí stanovit energetickou náročnost celého desintegračního procesu. Vzhledem k úsporám na likvidaci kalu se následně přepočítá návratnost investic.

### 7.1 Přibližné pořizovací náklady

U zařízení vyrobených z nerezové oceli (tepelný výměník, TN) počítáme s cenou 350 Kč/kg.

Zařízení	Typ	Cena	
Tlaková nádoba	2 m <sup>3</sup>	250	[tis Kč]
Výměník tepla		250	[tis Kč]
Diatermický ohříváč oleje	GARIONI NAVAL - TH	220	[tis Kč]
Elektromotor	SIEMENS 1LA7 080-8AB1x	3,4	[tis Kč]
Frekvenční měnič	Sinamics G110 6SL3211- 0AB12-5	2,9	[tis Kč]
Olej	DOWTHERM 1 000 I	40	[tis Kč]
Kompresor	SKS 9/200/12	27,4	[tis Kč]
Projekt		80	[tis Kč]
Další náklady spojené se stavením desintegrační jednotky (montáž, těsnění, rozvody, armatury, řízení regulace a podobně)		200	[tis Kč]
<b>Celkem</b>	<b>Σ</b>	<b>1073,7</b>	<b>[tis Kč]</b>

**Tab. 28** Náklady na desintegrační jednotku

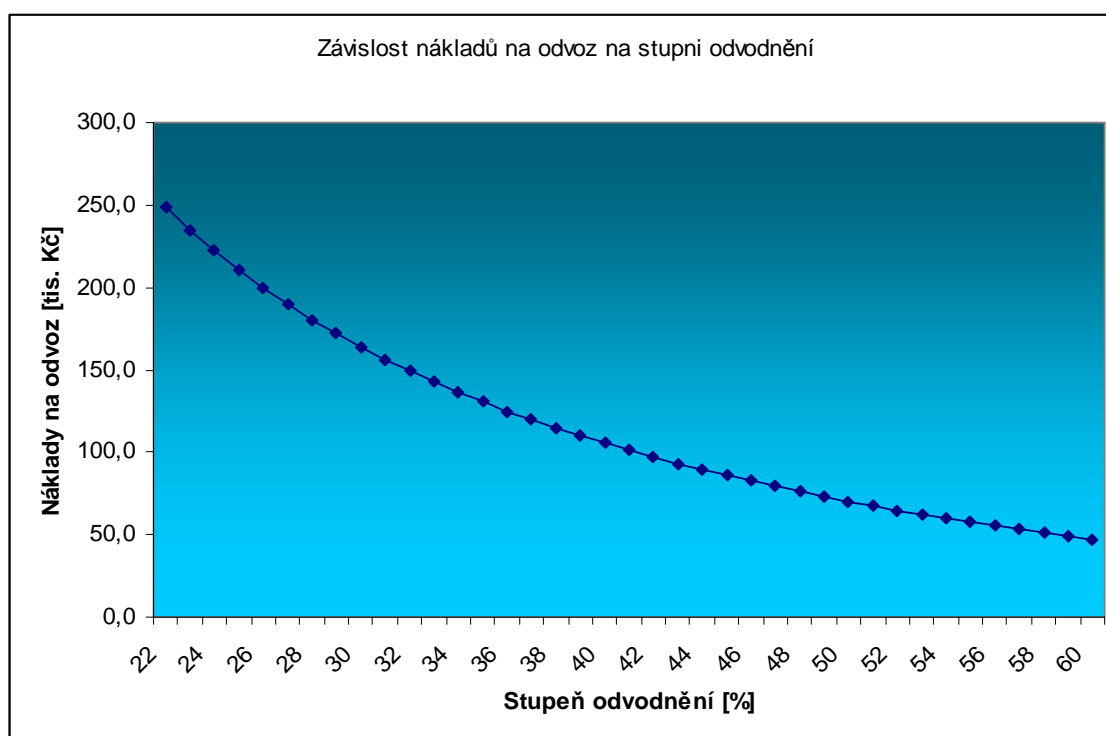
Do nákladů nepočítáme stavbu podloží pod jednotkou. Vzhledem k rozměrům desintegrační jednotky uvažujeme s umístěním zařízení na již vybudované a nevyužívané ploše v areálu ČOV.

## 7.2 Úspory za odvoz kalů ročně

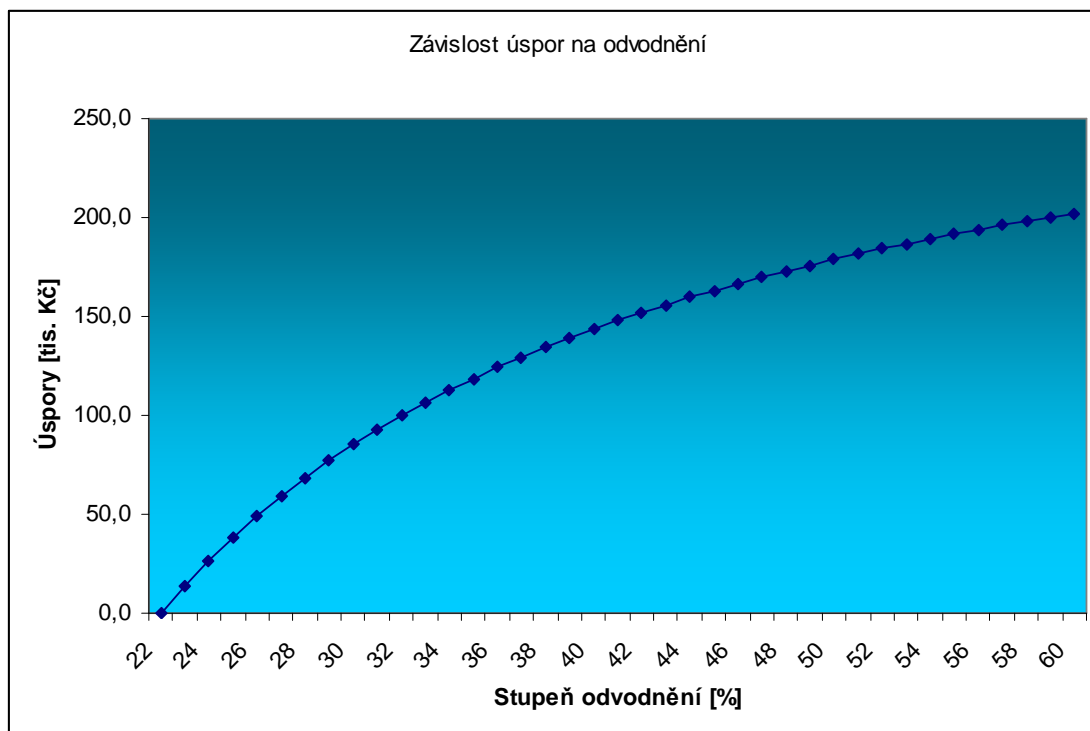
Kalu ke zpracování (s uvažováním 4% sušiny)	75	[tun]
Týdnů	52	[ - ]
Cena za odvoz kalů	450	[Kč/tun]

**Tab. 29** *Produkce kalů*

Dle [34], byla zpracována (příloha č.9) závislost nákladů na odvoz a stupně odvodnění viz graf 4. a závislost úspor na stupni odvodnění. Bylo uvažováno s hodnotami viz tab. 29.



**Graf 4.** *Závislost nákladů na odvoz na stupni odvodnění*



**Graf 5.** Závislost úspor na stupni odvodnění

Vzhledem k tomu, že se jednalo o laboratorní experiment není uvažována maximální naměřená hodnota odvodnění (přibližně 60 %), ale je uvažována v praxi reálnější hodnota (40 %). Závislost úspory (tab. 30) za odvoz kalů na stupni odvodnění je patrná viz graf 5.

Úspora na nákladech za odvoz kalů při stupni odvodnění 40 %	143,6	[tis. Kč/rok]
---	-------	---------------

**Tab. 30** Úspora za odvoz kalů při stupni odvodnění 40 %

### 7.3 Ekonomická bilance procesu

Při sestavování energetické bilance vycházíme z předpokladu, že na ČOV není využívána kogenerační jednotka. Bioplyn z procesu vyhřívání kalu není nijak zpracováván a je pouze spalován hořáky, jeho využití pro desintegraci nezpůsobuje žádné ekonomické ztráty pro čistírnu odpadních vod. Proto náklady na ohřev můžeme považovat jako nulové. Je tedy potřeba zohlednit pouze nároky na provoz míchadla.

Teplo potřebné pro ohřev TN	$Q_{TN}$	41,68	[kW]
Počet pracovních hodin ročně	h	8 736	[h]

**Tab. 31** Vstupní data pro energetickou a ekonomickou bilanci ohřevu

Vzhledem k tomu, že je v procesu využit výměník tepla je možné energii jím získanou odečíst od energie potřebnou pro ohřev oleje (počítána pomocí hodnot viz tab. 31). Počítáme s nepřetržitým kontinuálním provozem. Proto roční spotřeba tepelné energie je rovna:

$$E_{1,d} = Q_{TN} \cdot h \quad (16)$$

Energie potřebná pro ohřev oleje	364,1	[MWh]
Energie potřebná pro ohřev oleje se započítáním 5 % tepelných ztrát	384,8	[MWh]
Zbývá tepelná energie získaná z bioplynu na ČOV	558,5	[MWh]

**Tab. 32** Energetická bilance ohřevu

Z tab. 32 je zřejmé, že bioplyn z ČOV je schopen pokrýt potřeby pro ohřev kalu. Proto není nutné kombinovat bioplyn se zemním plynem z rozvodných sítí.

Výpočet nákladů na provoz míchadla, byl proveden za pomoci hodnot viz tab. 33.

Příkon míchadla za rok (tab. 25)	P	1,1	[MWh]
Distribuční cena el. energie		2 122,99	[Kč/MWh]
Náklady na provoz míchadla celkem		2,4	[tis. Kč]

**Tab. 33** Náklady na provoz míchadla

Celková ekonomická bilance:

Náklady na provoz míchadla	2,4	[tis Kč]
Úspora za odvoz kalů	- 143,6	[tis Kč]
<b>Návratnost ročně</b>	<b>141,2</b>	[tis Kč]
Pořizovací náklady na zařízení	1 073	[tis Kč]
<b>Doba návratnosti</b>	<b>7,6</b>	[roků]

**Tab. 34** Ekonomická bilance procesu s kogenerací

Z výsledné ekonomické bilance (tab. 34) vyplývá, že provoz zařízení vede k návratnosti po 7,6 letech provozu a to bez uvažování veškerých výdajů na údržbu zařízení.

## 8. Závěr

Vzhledem k neustálému nárůstu produkce kalů z ČOV je nutné hledat ekonomicky a ekologicky výhodná řešení jejich minimalizace. Z tohoto hlediska se varianta jejich desintegrace před odvodněním jeví jako dobrá možnost minimalizace celkové produkce.

V diplomové práci byla řešena tlakově-termická desintegrace. Tato metoda byla zvolena z důvodu snahy využít co největší množství energie vznikající na ČOV. Z výsledků experimentálního měření [34] zřetelně vyplývá, že dochází k účinné desintegraci buněk kalu. Při následném odstředění, proto dochází ke snadnějšímu odvodnění kalu. Stupeň odvodnění vzrostl při experimentu přibližně o 37 %. Rozdíl v těchto hodnotách ukazuje na významné snížení objemu produkce kalů.

Snížení stupně odvodnění kalů by nemělo být chápáno pouze jako faktor, který významně snižuje jeho celkový objem a tím náklady na odvoz, ale mělo by být uvažováno i jako zvýšení jakosti kalu. Vzhledem k menšímu obsahu vody v kalu významně vzrůstá možnost jeho využití v termických procesech.

Zásadním parametrem pro posuzování termicko-tlakové desintegrace je ovšem její energetická náročnost.

Při použití desintegrační jednotky na ČOV, která nevyužívá kogenerační jednotky je návratnost zhruba 7,6 let. Pokud bychom ovšem uvažovali využití této desintegrační jednotky na ČOV, kde je využito kogenerace, byla by návratnost pořizovacích nákladů mnohonásobně vyšší.

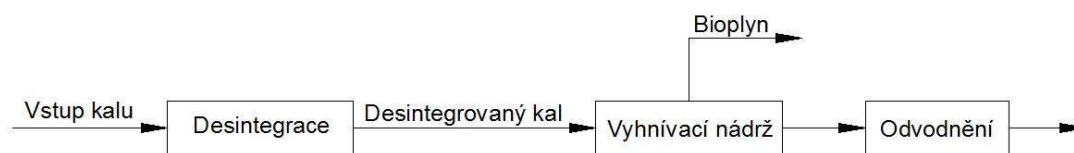
Dalším významným parametrem pro posuzování desintegrace je způsob začlenění desintegrační jednotky do procesu zpracování kalů.

V diplomové práci je uvažováno s umístěním desintegrační jednotky za proces stabilizace (obr. 48)



**Obr. 48** Schéma umístění desintegrační jednotky – za stabilizací

Jako lepší varianta se však jeví umístění desintegrační jednotky před proces stabilizace (obr. 49). Důvodem je zvýšení rozložitelnosti kalu, které vede k nárůstu produkce bioplynu a současně k vyššímu stupni odvodnění. Další výhodou je možnost desintegrovaný teplý kal (o teplotě cca 90 °C) řízeně dávkovat do vyhnivacích nádrží. Odpadá nutnost ohřevu kalu ve vyhnivacích nádržích.



**Obr. 49** Schéma umístění desintegrační jednotky – před stabilizací

Vzhledem k tomu, že energetické požadavky a nároky na každou čistírnu se v budoucnu budou neustále zvyšovat a postupně budou všechny ČOV s vysokou pravděpodobností dotlačeny k pořízení kogenerační jednotky, je na snadě otázka, zda je desintegrace kalu termicko-tlakovou (popřípadě všemi mechanickými metodami) tím vhodným řešením problému desintegrace. Vhodnou alternativou mechanických typů desintegrace by v budoucnu vzhledem ke svým nárokům měly být spíše biologické popřípadně chemické metody.[38]



## Použitá literatura

- [1] Brtna, F. Čistírenské kaly – současnost a budoucnost. Brno 2007. Bakalářská práce na FSI v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Boráň.
- [2] Sbírka zákonů ČR
- [3] Boráň, J. Příprava kalů z ČOV pro jejich energetické využití. Brno 2003. Diplomová práce na FSI v Brně. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Hartig, Ph.D.
- [4] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 8/2008 [online]. Dostupné z [http://www.eru.cz/user\\_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/OZ/C\\_R\\_8-2008\\_OZE-KVET-DZ.pdf](http://www.eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/OZ/C_R_8-2008_OZE-KVET-DZ.pdf)
- [5] Statistická ročenka České republiky 2007 [online]. Praha: Český statistický úřad, 2008. Zveřejněno dne: 1. 3. 2008. [cit. 2. března 2009]. Dostupné z <http://www.czso.cz/csu/2007edicniplan.nsf/kapitola/10n1-07-2007-0300>
- [6] Boráň, J. Zpracování kalů z čistíren odpadních vod s energetickým využitím. Brno 2008. Disertační práce na FSI v Brně. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [7] Kalové hospodářství čistíren odpadních vod, [online]. Praha: VŠCHT Praha. Zveřejněno dne: 2. 10. 2007.[cit. 20. listopadu 2008]. Dostupné z [http://web.cscht.cz/starad/COV\\_Skripta\\_Kal\\_hosp.doc](http://web.cscht.cz/starad/COV_Skripta_Kal_hosp.doc)
- [8] Bednařík V, Vondruška M. Čistírenské kaly – extenzivní odpadová komodita, [online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. [cit. 20. listopadu 2008]. Dostupné z <http://home.tiscali.cz/ekoporadenstvi/odborne%20clanky.htm>
- [9] Volejník, T. Vliv specifické spotřeby flokulantu na odvoditelnost čistírenského kalu. Brno 2008. Diplomová práce na FSI v Brně. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Boráň. Ph.D.
- [10] Heat Exchange[online], zveřejněno dne 7. 4. 2007. [cit. 23. dubna 2009]. Dostupné z [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Tubular\\_heat\\_exchanger.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Tubular_heat_exchanger.png)
- [11] Singh, R. Design of tubular heat exchanger [online]. 2006. [cit. 24. dubna 2009] Dostupné z [http://rpaulsingh.com/teaching/LectureHandouts/Handout\\_Tubular%20Heat%20Exchanger.pdf](http://rpaulsingh.com/teaching/LectureHandouts/Handout_Tubular%20Heat%20Exchanger.pdf)
- [12] Jegla, Z. Cvičení na FSI v Brně: Trubkové výměníky tepla typu trubka v trubce. Zimní semestr 2007.
- [13] Zpracování kalů – multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů. [cit. 23. dubna 2009]. Dostupné z <http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy2005/Bara/postupy.html>
- [14] Dohányos M, Koller J, Strnadová N. Čištění odpadních vod. 1. vydání. Praha, 1998. 177 s. ISBN 80-7080-207-3
- [15] Vymazal, J. Kořenové čistírny odpadních vod [online]. [cit. 20. prosince 2008]. Dostupné z <http://kcov.wz.cz/KCOV.php>

- [16] Dobráková, M. Analýzy způsobů nakládání s kaly z čistíren komunálních odpadních vod. Brno 2004
- [17] Kupec, J. Zpracování odpadních vod a čistírenských kalů. Zlín :Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně: UTB – Academia Centrum Zlín, 2002. ISBN 80-7318-058-8.
- [18] KOLEKTIV, sborník referátů. Možnosti využití kalů z ČOV v zemědělství. Vydání 1. Praha: VÚVR, 2000. ISBN 80-238-5333-3 .
- [19] Dohányos M, Kutil V, Hartig K. Minimalizace produkce čistírenských kalů. Klatovy 2004. ISBN 80-239-3950-5.
- [20] EN 13445-3: Unfired pressure vessels – Part3: Design. London: British Standards Institution, 2002. 707s.
- [21] ČSN 41 7240: Korozivzdorná austenitická ocel. Praha: Český normalizační institut, 1973.
- [22] Hewitt G, Shires L, Bott T. Process Heat Transfer. London 1994. ISBN - 10 0849399181.
- [23] Kolektiv. Sbírka příkladů z chemického inženýrství. Praha 1978.
- [24] N. Commenges-Bernole, J. Margaeire. Adsorption of heavy metals on sonicated activated sludge. Ultrasonics Sonochemistry. France 2008.
- [25] M. Salsabil, A. Prorot, M. Casellas, C. Dagot. Pre-treatment of activated sludge: Effect of sonication on aerobic and anaerobic sugestibility. Chemical Engineering Journal. France 2008.
- [26] K. Nickel, U. Neis. Ultrasonic disintegration of biosolids for improved biodegradation. Ultrasonic Sonochemistry 14 (2007) 450 -455. Hamburg 2007.
- [27] J. Laureát, M. Casellas, C. Dagot. Heavy metals uptake by sonicated activated sludge: Relation with floc surface properties. Journal of Hazardous Materials.
- [28] I. Dogan, F. Sanin. Alkaline Solubilization and Microwave Irradiation as a Combined Sludge Disintegration and Minimization Metod.
- [29] M. Tokumura, H. Katoh, T. Katoh, H. Znad, Y. Kawase. Solubilization of excess sludge in activated sludge process usány the solar photo-Fenton reaction. Journal of Hazardous Materiále.
- [30] L. Chu, S. Yan, X. Xing, X. Sun, B. Jurcik. Progress and perspectives of sludge ozonation as a powerful pretreatment Metod for minimization of excess sludge production.
- [31] Šesták J. Transportní a termodynamická data pro výpočet aparátů a strojního zařízení. České vysoké učení technické v Praze, 1981.
- [32] D. Kukulka, R. Baier, J. Mollendorf. Factors Associated with Fouling in the Process Industry.
- [33] Medek J. Hydraulické pochody. VUT FSI Brno, 2000. ISBN 80 – 214 – 0563 – 5
- [34] Žerava Z. Vliv termické dezintegrace kalu na jeho další zpracování. Brno 2009. Diplomová práce na FSI v Brně. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Boráň, Ph.D
- [35] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 11/2008 [online]. [cit. 23. dubna 2009]. Dostupné z

- [http://www.eru.cz/user\\_data/files/Statistika%20teplo/P%C5%99edb%C4%9B%C5%BE%C3%A9%20ceny%20tepel%C3%A9%20energie%20v%20%C4%8CR%20-%202009%20-%2026.%203.%202009.pdf](http://www.eru.cz/user_data/files/Statistika%20teplo/P%C5%99edb%C4%9B%C5%BE%C3%A9%20ceny%20tepel%C3%A9%20energie%20v%20%C4%8CR%20-%202009%20-%2026.%203.%202009.pdf)
- [36] Niesner, J. Anaerobní stabilizace čistírenského kalu a využití bioplynu. Brno 2007. Bakalářská práce na FSI v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lucie Houdková.
- [37] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 10/2008 [online]. [cit. 23. dubna 2009]. Dostupné z [http://www.eru.cz/user\\_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/ER%20CR\\_10\\_2008.pdf](http://www.eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/ER%20CR_10_2008.pdf)
- [38] V. Pelenc, J. Schumann, J. Euler, M. Gerhardt. Die optimierung der Klärschlammfäulung durch hydrolytische Enzyme: ein Fallbeispiel [online]. [cit. 23. dubna 2009]. Dostupné z [http://www.methaconcept.de/images/Fachbeitrag\\_Ruesselsheim\\_29.03.2007.pdf](http://www.methaconcept.de/images/Fachbeitrag_Ruesselsheim_29.03.2007.pdf)
- [39] KUNST – Čistírny odpadních vod [online]. [cit. 23. dubna 2009]. Dostupné z <http://www.kunst.cz/typizovana-vyroba/cov-kunst/>
- [40] MEGA -.Rekultivace skládek – hrubé terénní úpravy [online]. [cit. 23. března 2007]. Dostupné z <http://www.mega.cz/rekultivace-skladek-hrube-terenni-upravy.html>
- [41] K. Sýkora, M. Sedláček, J. Kinkor, M. Michalová, V. Gaierová, J. Čejka. Řešení kalového hospodářství ÚČOV Praha ve vztahu na zisk OZE [online]. [cit. 23. dubna 2009]. Dostupné z <http://www.e-voda.cz/uploads/assets/casopisy/voda-2007-10.pdf>
- [42] Rohrbach Zement – Dotternhausen [online]. [cit. 23. dubna 2007]. Dostupné z <http://www.planet-schule.de/wissenspool/geomorphologie/inhalt/wissen/jurassic-alb-der-schwaebische-oelschiefer/oelschiefer-nach-1945.html>
- [43] Animace funkce lyžátovací odstředivky [online]. [cit. 23. ledna 2009] . Dostupné z <http://www.lysatec.com/popup.php?&jist=5450&lang=cz&cont=va&ident=50>
- [44] Armat spol. s.r.o. Nerezové trubky bezešvé [online]. [cit. 23. března 2009] . Dostupné z <http://www.armat.cz/nerezove-trubky-bezesve.html>
- [45] Kolektiv. Spalování kalů z čistíren odpadních vod.CICERO Ostrava, 2003.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Zjednodušené schéma ČOV [3] .....	9
Obr. 2 Dešťová zdrž .....	10
Obr. 3 Strojní česle jemné .....	10
Obr. 4 Usazovací nádrž (ČOV Šumperk) .....	11
Obr. 5 Aktivační nádrž (ČOV Šumperk) .....	12
Obr. 6 Princip flotace [13].....	13
Obr. 7 Úbytek organické hmoty v sušině při anaerobní stabilizaci [7] .....	14
Obr. 8 Schéma konfigurace autotermní termofilní aerobní stabilizace [7].....	15
Obr. 9 Kalové pole [13].....	17
Obr. 10 Sitopásový lis [13].....	17
Obr. 11 Komorový lis [13].....	18
Obr. 12 Membránový lis [13] .....	19
Obr. 13 Schéma šnekové odstředivky [13].....	19
Obr. 14 Kogenerační jednotka (ČOV Šumperk) .....	20
Obr. 15 Plynojemy (ČOV Modřice) .....	21
Obr. 16 Typizovaná malá ČOV (KUNST) [39] .....	22
Obr. 17 kořenová čistírna odpadních vod [15].....	22
Obr. 18 Rekultivace – MEGA a.s [40].....	25
Obr. 19 Překopávač kompostu [13] .....	26
Obr. 20 Cementářská pec v cementárně Dotternhausen [42] .....	27
Obr. 21 Spalovna kalu pracující na principu fluidního lože [6].....	28
Obr. 22 Kombinace etážové pece s fluidním ložem [6] .....	28
Obr. 23 Rozložení vody ve struktuře kalu [6].....	31
Obr. 24 Schéma principu funkce lyzátovací odstředivky (LYSATEC) [43] .....	34
Obr. 25 Schéma hlavního ultrazvukového reaktoru (STN ATLAS Elektronik) [26].....	35
Obr. 26 Aplikace ozonace pro při redukci kalů [30].....	37
Obr. 27 Schéma zapojení zařízení pro Solární photo-Fenton reakci [29] .....	38
Obr. 28 Schéma první varianty.....	42
Obr. 29 Schéma druhé varianty.....	43
Obr. 30 Schéma třetí varianty.....	43
Obr. 31 Schéma čtvrté varianty .....	44
Obr. 32 Schéma finální varianty .....	44
Obr. 33 Výměník tepla „trubka v trubce“ [10].....	47
Obr. 34 Schéma protiproudého uspořádání toku [10] .....	48
Obr. 35 Výměník tepla „trubka v trubce“ v rozebíratelném provedení [12].....	49

Obr. 36	Výměník tepla „trubka v trubce“ v nerozebíratelném provedení [12].....	50
Obr. 37	Znázornění délek ovlivněných oblastí .....	53
Obr. 38	Znázornění rovnováhy sil .....	54
Obr. 39	Znázornění sil působících na toroidní víko .....	55
Obr. 40	Znázornění minimálního a maximálního napětí.....	55
Obr. 41	Znázornění minimálního a maximálního posuvu .....	56
Obr. 42	Znázornění deformace po překročení maximálních hodnot .....	56
Obr. 43	Kontrola návrhu .....	57
Obr. 44	Druhy uložení prutů .....	58
Obr. 45	Znázornění stupně excentricity.....	59
Obr. 46	Schéma procesu zpracování kalu .....	61
Obr. 47	3D návrh desintegrační jednotky .....	62
Obr. 48	Schéma umístění desintegrační jednotky – za stabilizací .....	71
Obr. 49	Schéma umístění desintegrační jednotky – před stabilizací.....	72

## Seznam tabulek

Tab. 1 Limitní hodnoty koncentrace těžkých kovů [13].....	24
Tab. 2 Zvýšení účinnosti anaerobní stabilizace kalů desintegrací [19] .....	39
Tab. 3 Hodnoty vyplývající ze zadání .....	41
Tab. 4 Hodnoty získané pomocí Steam Tables.....	42
Tab. 5 Empiricky zvolené parametry .....	45
Tab. 6 Zvolené hodnoty.....	46
Tab. 7 Čas potřebný k ohřevu kalů.....	47
Tab. 8 Hodnoty vstupních parametrů .....	49
Tab. 9 Návrh rozměrů trubek.....	50
Tab. 10 Rozměry dle normy DIN 17 458 .....	51
Tab. 11 Výsledky kontrolního výpočtu .....	51
Tab. 12 Parametry tlakové nádoby.....	52
Tab. 13 Parametry zvolené oceli 17 240 .....	52
Tab. 14 Parametry pevnostního výpočtu tlakové nádoby.....	53
Tab. 15 Parametry toroidního víka .....	54
Tab. 16 Parametry kanálků .....	57
Tab. 17 Parametry pro výpočet prutu na vzpěr .....	58
Tab. 18 Vypočítané hodnoty vzpěru.....	59
Tab. 19 Parametry pro kontrolu koutového svaru .....	60
Tab. 20 Hodnoty napětí ve svaru .....	61
Tab. 21 Použitá zařízení v desintegrační jednotce.....	61
Tab. 22 Hodnoty pro výpočet tepelné bilance .....	63
Tab. 23 Tepelná bilance .....	64
Tab. 24 Parametry míchadla .....	64
Tab. 25 Příkon míchadla .....	64
Tab. 26 Podklady k produkci bioplynu [36].....	65
Tab. 27 Výsledky bilance produkce bioplynu .....	66
Tab. 28 Náklady na desintegrační jednotku .....	67
Tab. 29 Produkce kalů.....	68
Tab. 30 Úspora za odvoz kalů při stupni odvodnění 50 % .....	69
Tab. 31 Vstupní data pro energetickou a ekonomickou bilanci ohřevu .....	69
Tab. 32 Energetická bilance ohřevu .....	70
Tab. 33 Náklady na provoz míchadla .....	70
Tab. 34 Ekonomická bilance procesu s kogenerací.....	70

## Seznam grafů

Graf 1. Zpracování kalů z ČOV v ČR [5].....	23
Graf 2. Obsah sušiny v kalu po centrifuze [34].....	41
Graf 3. Aktuální štíhlostní poměr .....	60
Graf 4. Závislost nákladů na odvoz na stupni odvodnění .....	68
Graf 5. Závislost úspor na stupni odvodnění .....	69

## Seznam příloh

Příloha č.1 – Závislost viskozity na otáčkách a teplotě	81
Příloha č.2 - Pevnostní kontrola a návrh pláště	83
Příloha č. 3 - Pevnostní kontrola a návrh kuželového dna	84
Příloha č.4 - Pevnostní kontrola a návrh toroidního víka	86
Příloha č.5 - Pevnostní kontrola a návrh kanálků	89
Příloha č.6 – Návrh výměníku tepla	90
Příloha č.7 – Výpočet nutné doby ohřevu kalů	97
Příloha č.8 – Návrh tlakové nádoby	100
Příloha č.9 – Náklady a úspory v závislosti na odvodnění	107



## Příloha č.1 – Závislost viskozity na otáčkách a teplotě

Meas. Point	Time	Temperature	Speed	Speed	Speed	Speed
			120[l/min]	100[l/min]	80[l/min]	60[l/min]
[ ]	[s]	[°C]	Viscosity	Viscosity	Viscosity	Viscosity
			0,1602	[Pas]	[Pas]	0,2446
1	2	68,76	0,1572	0,1907	0,1938	0,2424
2	4	68,68	0,1559	0,1875	0,1917	0,2410
3	6	68,62	0,1547	0,1881	0,1913	0,2401
4	8	68,55	0,1539	0,1868	0,1903	0,2397
5	10	68,46	0,1535	0,1857	0,1896	0,2392
6	12	68,67	0,1528	0,1847	0,1896	0,2384
7	14	68,68	0,1532	0,1844	0,1893	0,2378
8	16	68,54	0,1526	0,1831	0,1888	0,2380
9	18	68,55	0,1518	0,1825	0,1888	0,2373
10	20	68,58	0,1517	0,1820	0,1887	0,2367
11	22	68,64	0,1511	0,1817	0,1881	0,2369
12	24	69,31	0,1509	0,1809	0,1878	0,2370
13	26	69,17	0,1507	0,1805	0,1876	0,2359
14	28	68,90	0,1508	0,1804	0,1871	0,2365
15	30	68,85	0,1504	0,1796	0,1876	0,2356
16	32	69,19	0,1501	0,1792	0,1873	0,2354
17	34	69,29	0,1500	0,1785	0,1866	0,2354
18	36	69,04	0,1498	0,1777	0,1867	0,2348
19	38	68,75	0,1493	0,1775	0,1865	0,2349
20	40	68,66	0,1491	0,1767	0,1867	0,2343
21	42	68,76	0,1489	0,1764	0,1864	0,2340
22	44	68,93	0,1488	0,1759	0,1862	0,2346
23	46	68,92	0,1486	0,1755	0,1860	0,2340
24	48	68,79	0,1484	0,1753	0,1858	0,2337
25	50	68,71	0,1483	0,1748	0,1860	0,2338
26	52	68,64	0,1480	0,1747	0,1858	0,2334
27	54	68,83	0,1478	0,1741	0,1855	0,2331
28	56	68,79	0,1477	0,1741	0,1858	0,2332
29	58	68,68	0,1476	0,1740	0,1854	0,2329
30	60	69,22	0,0528	0,1736	0,1850	0,0848

Meas. Point	Time	Temperature	Speed 120[l/min]	Speed 100[l/min]	Speed 80[l/min]	Speed 60[l/min]
			Viscosity	Viscosity	Viscosity	Viscosity
[ ]	[s]	[°C]	0,0557	[Pas]	[Pas]	[Pas]
1	2	68,76	0,0550	0,0660	0,0716	0,0869
2	4	68,68	0,0547	0,0652	0,0707	0,0861
3	6	68,62	0,0545	0,0649	0,0701	0,0859
4	8	68,55	0,0544	0,0647	0,0700	0,0855
5	10	68,46	0,0542	0,0648	0,0699	0,0855
6	12	68,67	0,0541	0,0647	0,0696	0,0856
7	14	68,68	0,0540	0,0645	0,0697	0,0854
8	16	68,54	0,0539	0,0646	0,0696	0,0853
9	18	68,55	0,0539	0,0645	0,0694	0,0853
10	20	68,58	0,0538	0,0642	0,0695	0,0854
11	22	68,64	0,0537	0,0642	0,0693	0,0854
12	24	69,31	0,0537	0,0640	0,0692	0,0853
13	26	69,17	0,0536	0,0637	0,0693	0,0851
14	28	68,90	0,0536	0,0636	0,0692	0,0852
15	30	68,85	0,0536	0,0635	0,0691	0,0851
16	32	69,19	0,0536	0,0631	0,0692	0,0851
17	34	69,29	0,0535	0,0631	0,0691	0,0850
18	36	69,04	0,0534	0,0629	0,0690	0,0852
19	38	68,75	0,0534	0,0626	0,0691	0,0849
20	40	68,66	0,0532	0,0625	0,0691	0,0849
21	42	68,76	0,0531	0,0623	0,0689	0,0849
22	44	68,93	0,0530	0,0621	0,0689	0,0851
23	46	68,92	0,0530	0,0620	0,0690	0,0848
24	48	68,79	0,0529	0,0620	0,0689	0,0849
25	50	68,71	0,0529	0,0618	0,0695	0,0848
26	52	68,64	0,0529	0,0617	0,0701	0,0848
27	54	68,83	0,0528	0,0617	0,0697	0,0847
28	56	68,79	0,0529	0,0615	0,0694	0,0847
29	58	68,68	0,0528	0,0615	0,0692	0,0849
30	60	69,22	0,0528	0,0615	0,0698	0,0848

## Příloha č.2 - Pevnostní kontrola a návrh pláště

Software by SANT'AMBROGIO S.I. srl - Milano,Italy - EN Rev. 2.01-Bft/NTs

CYLINDRICAL SHELL POS.: 1

According to EN 13445-3 Ed. 2002 up to issue 28 (Clause 7 - 8)

\* Design temperature  $T = 160.0 \text{ } ^\circ\text{C}$

\* MATERIAL :(Rec.Nr 101) X5CrNi18-10 EN 10028-7;  $\leq 75 \text{ mm}$

\* NOMINAL DESIGN STRESS-DESIGN (Testing group 4) (Base:Rp1t)  $f = 124.80 \text{ MPa}$

\* NOMINAL DESIGN STRESS-AT ROOM TEMPERATURE  $f_A = 156.00 \text{ MPa}$

\* NOMINAL DESIGN STRESS-HYDRAULIC TEST (base: Rp1)  $f_{test} = 260.00 \text{ MPa}$

----- CHECK UNDER INTERNAL PRESSURE (EN 13445-3 Clause 7.4.2)-----

Design pressure  $p' = 1.000 \text{ MPa}$

Test pressure  $pt' = 1.548 \text{ MPa}$

Overpressure due to static head - Design  $ph' = 0.000 \text{ MPa}$

Overpressure due to static head - test  $pht' = 0.000 \text{ MPa}$

Calculation pressure - Design  $p = ph' + p' = 1.000 \text{ MPa}$

calculation pressure - Test  $pt = pht' + pt' = 1.548 \text{ MPa}$

Shell internal diameter  $Di = 1200.00 \text{ mm}$

Joint efficiency  $z = 0.70$

Corrosion allowance  $c = 0.00 \text{ mm}$

Wall undertolerance ( $f_M + f_E$ )  $f = 0.20 \text{ mm}$

Adopted thickness  $e_n = 8.00 \text{ mm}$

\* DESIGN :  $e = p \cdot (Di + 2c + 2f) / (2 \cdot f \cdot z - p) + c + f = 7.110 \text{ mm}$

\* TEST :  $e = pt \cdot (Di + 2f) / (2 \cdot f_{test} - pt) + f = 3.784 \text{ mm}$

----- PRESSURES -----

MAX. DESIGN PRESSURE - INTERNAL = 1.128 MPa

MAX. TEST PRESSURE - INTERNAL = 3.357 MPa

## Příloha č. 3 - Pevnostní kontrola a návrh kuželového dna

Software by SANT'AMBROGIO S.I. srl - Milano,Italy -EN Rev. 2.00-xchB/NTS  
CONICAL HEAD POS.:2  
According to EN 13445-3 Ed. 2002 up to issue 28 (Clause 7 -8)

\* Design temperature  $T = 160.0$  °C  
 \* MATERIAL : (Rec.nr 101) x5CrNi18-10 EN 10028-7;  $\leq 75$  mm  
 \* NOMINAL DESIGN STRESS-DESIGN  $f = 124.80$  MPa  
 \* NOMINAL DESIGN STRESS-AT ROOM TEMPERATURE  $f_A = 156.00$  MPa  
 \* NOMINAL DESIGN STRESS-HYDRAULIC TEST  $f_{test} = 260.00$  MPa

----- CHECK UNDER INTERNAL PRESSURE (EN 13445-3 Clause 7.6) -----

Design pressure	$p' =$	1.000 MPa
Test pressure	$pt' =$	1.548 MPa
Overpressure due to static head - Design	$ph' =$	0.000 MPa
Overpressure due to static head - Test	$pht' =$	0.000 MPa
Calculation pressure - Design	$p = ph' + p' =$	1.000 MPa
Calculation pressure - Test	$pt = pht' + pt' =$	1.548 MPa
Inside diameter of the cone - large end	$Di =$	1200.00 mm
Inside diameter of the cone - small end	$di =$	20.00 mm
Semi angle of the cone	$\varnothing =$	60.00 Deg
Joint efficiency	$z =$	0.70
Thickness of cylinder at large end	$e_{1n, large} =$	12.00
Thickness of cone at large end	$e_{2n, large} =$	13.00
Thickness of cylinder at small end	$e_{1n, small} =$	5.00
Thickness of cone at small end	$e_{2n, small} =$	12.00
Thickness of the cone	$en =$	13.00 mm
Corrosion allowance	$c =$	0.00 mm
Wall undertolerance	$f =$	0.20 mm

----- DESIGN -----

Mean diameter of the cone at large end	$Dc = Di + e_{1n} + c + f$	=	1212.200 mm
Calc. diameter	$Dk = Dc - e_1 - 2(r + c + f)(1 - \cos(\varnothing)) - l_2 \sin(\varnothing)$	=	1047.288 mm
$e_{con} + c + f = p \cdot Dk / (2 \cdot f \cdot z - p) \cdot (1 / \cos(\varnothing)) + c + f$		=	12.257 mm
$e_{cyl} + c + f$ (from shell calculation)		=	8.000 mm

\* CHECK OF JUNCTION AT LARGE END (with knuckle)

Min. length along the cone	$1.4 \cdot l_2 = 1.4 \cdot \sqrt{(Dc \cdot e_2) / \cos(\varnothing)}$	=	239.960 mm
Min. length along the cyl.	$1.4 \cdot l_1 = 1.4 \cdot \sqrt{Dc \cdot e_1}$	=	163.673 mm
Min. length along the cone	$0.7 \cdot l_2 = 0.7 \cdot \sqrt{(Dc \cdot e_2) / \cos(\varnothing)}$	=	119.980 mm
Min. length along the cyl.	$0.5 \cdot l_1 = 0.5 \cdot \sqrt{Dc \cdot e_1}$	=	58.454 mm
Knucle internal radius	$r + c + f =$	=	5.2000
$\beta = 1/3 \cdot \sqrt{Dc / (e_j')} \cdot \tan(\varnothing) / (1 + (1/\sqrt{\cos(\varnothing)})) - 0.15$		=	2.3297
$ro = 0.028 \cdot (r + c + f) / (\sqrt{Dc \cdot e_j'}) \cdot (\varnothing / (1 + 1/\sqrt{\cos(\varnothing)}))$		=	0.0310
$y = 1 + ro / (1.2 \cdot (1 + 2/ro))$		=	1.0035
$e_j = p \cdot Dc \cdot \beta / (2 \cdot f \cdot y)$		=	11.275 mm
Check of cylinder junction			
$e_1 + c + f = \text{Max}(e_j + c + f, e_{cyl} + c + f)$		=	11.475 mm
Check of cone junction			
$e_2 + c + f = \text{Max}(e_j + c + f, e_{con} + c + f)$		=	12.257 mm

Software by SANT'AMBROGIO S.I. srl - Milano,Italy -EN Rev. 2.00-tddB/NTS  
CONICAL HEAD POS.:2  
According to EN 13445-3 Ed. 2002 up to issue 28 (Clause 7 -8)

\* CHECK OF JUNCTION AT SMALL END

Mean diameter of the cone at small end	$Dc = di + e_{1n} + c + f$	=	25.200 mm
Min. length along the cone	$l_2 = \sqrt{(Dc \cdot e_{2a}) / \cos(a)}$	=	24.387 mm
Min. length along the cylinder	$l_1 = \sqrt{Dc \cdot e_{1a}}$	=	10.998 mm
$e_{1a} = e_{1n, small} - c - f$		=	4.800 mm
$e_{2a} = e_{2n, small} - c - f$		=	11.800 mm
$s = e_{2a} / e_{1a}$		=	2.458
$\tau = 1 + \sqrt{s \cdot ((1 + s^2) / (2 \cdot \cos(\varnothing)))}$		=	5.161
$\beta_h = 0.4 \cdot \sqrt{Dc / e_{1a}} \cdot \tan(\varnothing) / \tau + 0.5$		=	0.808
$P_{amm} = 2 \cdot f \cdot z \cdot e_{1a} / (Dc \cdot \beta_h)$		=	41.210 MPa

----- TEST -----

Mean diameter of the cone at large end	$Dc = Di + e_{1n} + f$	=	1212.200 mm
Calc. diameter	$Dk = Dc - e_1 - 2(r + f)(1 - \cos(\varnothing)) - l_2 \sin(\varnothing)$	=	1067.802 mm
$e_{con} + f = pt' \cdot Dk / (2 \cdot f - pt') \cdot (1 / \cos(\varnothing)) + f$		=	6.577 mm
$e_{cyl} + f$ (from shell calculation)		=	8.000 mm

* CHECK OF JUNCTION AT LARGE END (with knuckle)			
Min. length along the cone	$1.4 \cdot l_2 = 1.4 \cdot \check{S}((Dc \cdot e_2) / \cos(\epsilon)) =$		210.019 mm
Min. length along the cyl.	$1.4 \cdot l_1 = 1.4 \cdot \check{S}(Dc \cdot e_1) =$		148.506 mm
Min. length along the cone	$0.7 \cdot l_2 = 0.7 \cdot \check{S}((Dc \cdot e_2) / \cos(\epsilon)) =$		105.009 mm
Min. length along the cyl.	$0.5 \cdot l_1 = 0.5 \cdot \check{S}(Dc \cdot e_1) =$		53.038 mm
Knucle internal radius	$r+f =$		5.2000
$\beta = 1/3 \cdot \check{S}(Dc/ej') \cdot \tan(\epsilon) / (1 + (1/\check{S}(\cos(\epsilon)))) - 0.15$	$=$		2.5829
$ro = 0.028 \cdot (r+f) / (\check{S}(Dc \cdot ej') \cdot (\epsilon / (1 + 1/\check{S}(\cos(\epsilon))))$	$=$		0.0341
$y = 1 + ro / (1.2 \cdot (1 + .2/ro))$	$=$		1.0041
$ej = pt \cdot Dc \cdot \beta / (2 \cdot f_{test} \cdot y)$	$=$		9.282 mm
$e_{1+f} = \text{MAX}(e_{j+f}, e_{cyl+f})$	$=$		9.482 mm
Check of cone junction			
$e_{2+f} = \text{MAX}(e_{j+f}, e_{con+f})$	$=$		9.482 mm
* CHECK OF JUNCTION AT SMALL END			
Mean diameter of the cone at small end	$Dc = d_i + e_{1a} + f$	$=$	25.200 mm
Min. length along the cone	$l_2 = \check{S}((Dc \cdot e_{2a}) / \cos(a))$	$=$	24.387 mm
Min. length along the cylinder	$l_1 = \check{S}(Dc \cdot e_{1a})$	$=$	10.998 mm
$e_{1a} = e_{1n,small} - f$	$=$		4.800 mm
$e_{2a} = e_{2n,small} - f$	$=$		11.800 mm
$s = e_{2a} / e_{1a}$	$=$		2.458
$\tau = 1 + \check{S}(s \cdot ((1+s^2) / (2 \cdot \cos(\epsilon))))$	$=$		5.161
$\beta h = 0.4 \cdot \check{S}(Dc/e_{1a}) \cdot \tan(\epsilon) / \tau + 0.5$	$=$		0.808
$P_{amm} = 2 \cdot f_{test} \cdot e_{1a} / (Dc \cdot \beta h)$	$=$		122.648 MPa
----- PRESSURES -----			
MAX. DESIGN PRESSURE - INTERNAL		$=$	1.066 MPa
MAX. TEST PRESSURE - INTERNAL		$=$	2.233 MPa
- INTERNAL: $1.43 \cdot P'$		$=$	1.430 MPa
CONE - INTERNAL: $1.25 \cdot P' \cdot f_A / f$		$=$	1.562 MPa

## Příloha č.4 - Pevnostní kontrola a návrh toroidního víka

Software by SANT'AMBROGIO S.I. srl - Milano, Italy - EN Rev. 2.01-MDZB/NTS  
 CHECK OF TORISPHERICAL END POS.: 3  
 According to EN 13445-3 Ed. 2002 up to issue 28 (clause 7 -8)

\* Design temperature  $T = 160.0$  °C  
 \* MATERIAL (Rec.Nr 101) x5CrNi18-10 EN 10028-7;  $\leq 75$  mm  
 \* NOMINAL DESIGN STRESS-DESIGN (Testing group 4) (base:Rp1t)  $f = 124.80$  MPa  
 \* NOMINAL DESIGN STRESS-AT ROOM TEMPERATURE  $f_A = 156.00$  MPa  
 \* NOMINAL DESIGN STRESS-HYDRAULIC TEST (base: Rp1)  $f_{test} = 260.00$  MPa

Head outside diameter  $De = 1216.00$  mm  
 Inside spherical radius  $R = 1000.00$  mm  
 Corrosion allowance  $c = 0.00$  mm  
 Knuckle inside radius  $r = 150.00$  mm  
 Joint efficiency  $z = 0.700$   
 Adopted thickness  $e = 8.00$  mm  
 Wall undertolerance  $t = 0.200$  mm  
 Height of skirt  $hc = 150.000$  mm  
 Thickness of skirt  $ec = 8.000$  mm

----- CHECK TO INTERNAL PRESSURE (EN 13445-3 clause 7.5) -----

Design pressure  $p' = 1.000$  MPa  
 Test pressure  $pt' = 1.548$  MPa  
 Overpressure due to static head - Design  $ph' = 0.000$  MPa  
 Overpressure due to static head - test  $pht' = 0.000$  MPa  
 Calculation pressure - Design  $p = ph' + p' = 1.000$  MPa  
 Calculation pressure - Test  $pt = pht' + pt' = 1.548$  MPa  
 $Rp02t = 139.000$  MPa  
 $Rp02 = 210.000$  MPa

\* DESIGN :  
 $R' = R + c + t$   $R' = 1000.20$  mm  
 $D' = De - 2 * e + 2c + 2t$   $Di' = 1200.40$  mm  
 $es = p * R' / (2 * f * z - 0.5 * p) + c + t$   $= 5.94$  mm  
 $\beta = 0.8033$   
 $ey = \beta * p * (.75 * R' + .2 * D') / f + c + t$   $= 6.57$  mm

\* TEST :  
 $R' = R + t$   $R' = 1000.20$  mm  
 $D' = D - 2 * e + 2t$   $D' = 1200.40$  mm  
 $es = pt * R' / (2 * f_{test} - 0.5 * pt) + t$   $= 3.18$  mm  
 $\beta = 0.8435$   
 $ey = \beta * pt * (.75 * R' + .2 * D') / f_{test} + t$   $= 5.17$  mm  
 $fb_{test} = 1.6 * Rp02 / 1.05$   $= 320.00$  MPa  
 $eb = (.75 * R' + .2 * D') * (pt / (111 * fb_{test}) * (D' / (r + t))^{.825})^{(1/1.5)} + t$   $= 4.05$  mm

$P_{max}$  (for simplified assessment of fatigue life - clause 17)  $= 1.28$  MPa  
 Min. skirt thickness  $= 7.11$  mm

----- PRESSURES -----

MAX DESIGN PRESSURE - INTERNAL  $= 1.09$  MPa  
 MAX TEST PRESSURE - INTERNAL  $= 2.66$  MPa

Software by SANT'AMBROGIO S.I. srl - Milano, Italy - EN Rev. 2.01-udJB/NTs  
OPENING REINFORCEMENT pos.: 5  
According to EN 13445-3 Ed. 2002 up to issue 28 (Clause 9)

\* Design temperature  $T = 160.0 \text{ } ^\circ\text{C}$

\* MATERIAL (Rec.Nr 100) X5CrNi18-10 EN 10028-7;  $\leq 6 \text{ mm}$

\* NOMINAL DESIGN STRESS-DESIGN (Testing group 4) (base:Rp1t)  $fb = 124.80 \text{ MPa}$

\* NOMINAL DESIGN STRESS-AT ROOM TEMPERATURE  $fbA = 162.00 \text{ MPa}$

\* NOMINAL DESIGN STRESS-HYDRAULIC TEST (base: Rp1)  $fbTest = 270.00 \text{ MPa}$

\* HEAD DATA

Internal diameter  $Di = 1200.00 \text{ mm}$

Thickness  $en = 8.00 \text{ mm}$

Joint efficiency  $z = 0.70$

Corrosion allowance  $c = 0.00 \text{ mm}$

Wall undertolerance  $t = 0.20 \text{ mm}$

\* NOZZLE DATA

Type of connection : Set-On

Outside diameter  $deb = 55.00 \text{ mm}$

Thickness  $eb = 5.50 \text{ mm}$

Joint efficiency  $zb = 0.70$

Corrosion allowance  $cb = 0.00 \text{ mm}$

Wall undertolerance  $tb = 0.00 \text{ mm}$

Internal protruding  $lbi' = 0.00 \text{ mm}$

Useful length (Horizontal limit to nozzle O.D.)  $ls = 150.00 \text{ mm}$

Useful length (Vertical limit to shell O.D.)  $lb = 32.00 \text{ mm}$

Inclination : Radial

Angular coordinate  $\alpha = 0.00 \text{ } ^\circ$

Radial coordinate  $Z = 0.00 \text{ mm}$

Weld areas  $Afw = 0 \text{ mm}^2$

Nozzle calculat.thk. (design)  $eb^* = eb - cb - tb = 5.50 \text{ mm}$

Nozzle calculat.thk. (TEST)  $eb^* = eb - tb = 5.50 \text{ mm}$

Opening is not a critical area as defined in clause 17

----- PRESSURES -----

MAX DESIGN PRESSURE - INTERNAL = 1.80 MPa

MAX TEST PRESSURE - INTERNAL = 3.74 MPa

Software by SANT'AMBROGIO S.I. srl - Milano, Italy - EN Rev. 2.01-BOPB/NTs  
OPENING REINFORCEMENT pos.: 5  
According to EN 13445-3 Ed. 2002 up to issue 28 (Clause 9)

----- CHECK UNDER INTERNAL PRESSURE: DESIGN-----

Pressure  $p' = 1.000 \text{ MPa}$

Overpressure due to static head  $p'' = 0.000 \text{ MPa}$

Calculation pressure  $p = p' + p'' = 1.000 \text{ MPa}$

Calculation radius of head  $ris = R + c + t = 1000.20 \text{ mm}$

$ea,s = en - c - t = 7.80 \text{ mm}$

$lso = \text{SQR}((2 * ris + ea,s) * (ea,s)) = 125.16 \text{ mm}$

$ls' = \text{MIN}(lso, ls) = 125.16 \text{ mm}$

$lbo = \text{sqr}((deb - eb^*) * (eb^*)) = 16.50 \text{ mm}$

$lb' = \text{MIN}(lbo, lb) = 16.50 \text{ mm}$

$lbi' = \text{MIN}(0.5 * lbo, lbi) = 0.00 \text{ mm}$

$Aps = .5 * ris * (ls' + a) * ris / (.5 * ea,s + ris) = 76048.3 \text{ mm}^2$

$Apb = \text{See Fig. EN 13445-3 9.} = 529.7 \text{ mm}^2$

$Ap\acute{s} = (Deb - 2 * eb + 2 * cb + 2 * tb) / 2 * \text{Tan}(\acute{s}) = 0.0 \text{ mm}^2$

$Afs = \text{See Fig. EN 13445-3 9.} = 1019.1 \text{ mm}^2$

$Afb = \text{See Fig. EN 13445-3 9.} = 90.7 \text{ mm}^2$

$(Afs + Afw) * (fb - .5 * p) + Afb * (fb - .5 * p) = 134560 \text{ N}$

$(Aps + Apb + .5 * Ap\acute{s}) * p = 76578 \text{ N}$

----- CHECK UNDER INTERNAL PRESSURE: TEST -----

Pressure  $p' = 1.548 \text{ MPa}$

Overpressure due to static head	$p' =$	0.000	MPa
Calculation pressure	$p = p' + p'' =$	1.548	MPa
Calculation radius of head	$r_{is} = R + \lambda =$	1000.20	mm
$ea, s = e_n - \lambda$	$=$	7.80	mm
$l_{so} = \text{SQR}((2 * r_{is} + ea, s) * (ea, s))$	$=$	125.16	mm
$l_{s'} = \text{MIN}(l_{so}, l_s)$	$=$	125.16	mm
$l_{bo} = \text{sqr}((deb - eb) * (eb))$	$=$	16.50	mm
$l_{b'} = \text{MIN}(l_{bo}, l_b)$	$=$	16.50	mm
$l_{bi'} = \text{MIN}(0.5 * l_{bo}, l_{bi})$	$=$	0.00	mm
$A_{ps} = .5 * r_{is} * (l_{s'} + a) * r_{is} / (.5 * ea, s + r_{is})$	$=$	76048.3	mm <sup>2</sup>
$A_{pb} = \text{See Fig. EN 13445-3 9.}$	$=$	529.7	mm <sup>2</sup>
$A_{pS} = (Deb - 2 * eb + 2 * \lambda_b) / 2 * \text{Tan}(\delta)$	$=$	0.0	mm <sup>2</sup>
$A_{fs} = \text{See Fig. EN 13445-3 9.}$	$=$	1019.1	mm <sup>2</sup>
$A_{fb} = \text{See Fig. EN 13445-3 9.}$	$=$	90.7	mm <sup>2</sup>
$(A_{fs} + A_{fw}) (f_{test} - .5 * p) + A_{fb} (f_{test} - .5 * p)$	$=$	287709	N
$(A_{ps} + A_{pb} + .5 * A_{pS}) * p$	$=$	118543	N



## Příloha č.5 - Pevnostní kontrola a návrh kanálků

Software by SANT'AMBROGIO S.I. srl - Milano, Italy - EN-Rev. 2.00-ogFB/NTs  
HEATING/COOLING CHANNELS POS.: 7  
According to EN 13445-3 Ed. 2002 up to issue 28 (Clause 8.5.3.5)

Channel design temperature  $T_c = 160.00$  C  
Cylinder design temperature  $T_r = 160.00$  C

\* MATERIALS: (Testing group 4)

CHANNEL (Rec.Nr 100) X5CrNi18-10 EN 10028-7;  $\leq 6$  mm  
CYLINDER (Rec.Nr 101) X5CrNi18-10 EN 10028-7;  $\leq 75$  mm

\* NOMINAL DESIGN STRESSES (MPa)--Channel(fc)--cylinder(fr)-----  
base:Rp1t,Rp1

DESIGN	124.800	124.800
TEST	270.000	260.000

Channel design pressure	$P_c = 0.500$ MPa
Channel test pressure	$P_{test} = 0.781$ MPa
Channel internal width	$A = 100.00$ mm
Channel radial width	$b = 21.00$ mm
Channel corrosion allowance	$c_1 = 0.00$ mm
Channel undertolerance	$t_1 = 0.00$ mm
Channel adopted thickness	$e' = 3.00$ mm

Cylinder corrosion allowance	$c_2 = 0.00$ mm
Cylinder undertolerance	$t_2 = 0.20$ mm
Cylinder thickness	$e = 8.00$ mm

----- CHECK OF CYLINDER TO CHANNEL PRESSURE -----

$a = A + e' + c_1 + t_1$	$= 103.00$ mm
$e = a * (P_c / (3 * f_r))^{0.5} + c_1 + c_2 + t_2$	$= 3.96$ mm
$a = A + e' + t_1$	$= 103.00$ mm
$e_1 = a * (P_{test} / (3 * f_{rtest}))^{0.5} + t_2$	$= 3.46$ mm

----- CHECK OF CHANNEL -----

$C_3$ (from fig. 10.7-1)	$= 0.708$
$e' = C_3 * (b + c_1 + t_1) * (P_c / f_c)$	$= 2.98$ mm
$e_1' = C_3 * (b + t_1) * (P_{test} / f_{ctest})$	$= 2.53$ mm
$e'' = P_c * (D + b + 2 * c_1 + 2 * t_1) / (2 * f_c - P_c) + c_1 + t_1$	$= 2.48$ mm
$e_1'' = P_{test} * (D + b + 2 * t_1) / (2 * f_{ctest} - P_{test}) + t_1$	$= 1.79$ mm

## Příloha č.6 – Návrh výměníku tepla

> restart;

Návrh Výměníku tepla pro přehřev kalů vstupujících do desintegrační jednotky

Zvoleným výměníkem je výměník tepla typu "trubka v trubce".

Za výměník typu "trubka v trubce" se však považuje každý trubkový výměník tepla s neopřepážkovaným mezitrubkovým prostorem (MP).

Použité indexování:

- trubkovýTP)

- mezitrubkovýP)

### a) Geometrie

Plocha výměny tepla  $A$  a hydraulické průměry  $dh1$  a  $dh2$  definují vztahy:

> r1:=A=Pi\*nt\*(d1+2\*st)\*Lt:

r2:=dh1=(d1):

r3:=dh2=(D1^2-nt\*(d1+2\*st)^2)/(D1+nt\*(d1+2\*st)):

r3x:=d2=d1+2\*st:

r3y:=D2=D1+2\*st:

### b) Reynoldsova čísla a rychlosti toku

Reynoldsova čísla v TP (Rey1) a MP (Rey2) a rychlosti toku v TP ( $u1$ ) a MP ( $u2$ ) definují vztahy:

> r3a:=Rey[1]=u[1]\*dh1\*rho[1]/eta[1]:

r3b:=Rey[2]=u[2]\*dh2\*rho[2]/eta[2]:

> r3c:=u[1]=4\*m[1]/(rho[1]\*Pi\*nt\*d1^2):

r3d:=u[2]=4\*m[2]/(rho[2]\*Pi\*(D1^2-nt\*(d1+2\*st)^2)):

Dosažením rychlosti toku z rovnice kontinuity do Reynoldsova čísla dostaváme vyjádření Reynoldsova čísla pomocí hmotnostního průtoku, dále je vyjádřeno

Grashofovo číslo :

> r3e:=subs(r3c,r2,r3a):

r3f:=subs(r3d,r3,r3b):

r3g:=Pe[1]=u[1]\*cp[1]\*Lt/lambda[1]:

r3h:=subs(r3c,r2,r3g):

r3i:=Pe[2]=u[2]\*cp[2]\*Lt/lambda[2]:

r3j:=subs(r3d,r3,r3i):

r3k:=Gr\_1=(dh1^3)\*(rho[1]^2)\*9.81\*(beta[1])^60/(eta[w1]^2):

r3l:=Gr\_2=(dh2^3)\*(rho[2]^2)\*9.81\*(beta[2])^60/(eta[w2]^2):

r3m:=subs(r3c,r2,r3k):

r3n:=subs(r3c,r2,r3l):

### c) Součinitel prostupu tepla a přenosová rovnice

Přenosová rovnice je uváděna pro proudění uspořádané u tohoto výměníku dle vztahem:

> r4:=Q=k\*A\*dTln:

Součinitel prostupu tepla s uvážením zanesení na obou stranách (reprezentovaným součiniteli zanesení  $Rz1$  a  $Rz2$ ) má tvar:

>

r5:=k=1/(((d2/d1)\*(Rz1+1/alpha[1]))+((d2/(2\*lambda[t]))\*ln(d2/d1))+(Rz2+1/alpha[2])):

Dosadíme vyjádření součinitele prostupu tepla z rovnice r5 spolu s vyjádřením plochy výměny tepla z rovnice r1 a vyjádřením průměru  $d_2$  z rovnice r3x do přenosové rovnice r4 a dostaneme tak přenosovou rovnici v rozepsaném tvaru:

```
> r6:=subs(r5,r1,r3x,r4):
```

d) Součinitele přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla v trubkovém prostoru vyjádřený z Nusseltova čísla pro laminární tok je dán vztahem:

```
> r7:=alpha[1]=(lambda[1]/dh1)*0.74*(Pr[1]*Rey[1])^(0.2)*(Gr_1*Pr[1])^0.1:
```

Dosadíme do něj  $Rey_1$  z rovnice r3e a  $dh_1$  z rovnice r2:

```
> r8:=subs(r3m,r2,r7):
```

Součinitel přestupu tepla v mezitrubkovém prostoru vyjádřený z Nusseltova čísla pro laminární tok s uvažováním volné konvekce je dán vztahem:

```
> r9:=alpha[2]=(lambda[2]/dh2)*0.74*(Pr[2]*Rey[2])^(0.2)*(Gr_2*Pr[2])^0.1:
```

Dosadíme do něj za  $Rey_2$  z rovnice r3f a  $dh_2$  z rovnice r3:

```
> r10:=subs(r3n,r3,r9):
```

Dosadíme nyní součinitele přestupu tepla obdržené z rovnic r8 a r10 do rozepsané přenosové rovnice r6 a obdržíme přenosovou rovnici v komplexním tvaru:

```
> r11:=subs(r8,r10,r6):
```

Vyjádření délky výměníku z komplexní přenosové rovnice:

```
> r11b:=Lt=solve(r11,Lt):
```

e) Tlakové ztráty

Tlakové ztráty v trubkovém prostoru jsou dány vztahem:

```
> r12:=dP1=1/2*lambda[dt]*Lt/dh1*rho[1]*u[1]^2:
```

Při návrhu výměníku uvažujeme, že bude zhotoven z nových trubek o standardní drsnosti. Pro tento případ lze Darcyho třetí součinitel v laminárním režimu pro trubkový prostor vyjádřit vztahem pro hydraulicky hladké trubky (platným pro  $Re < 2400$ ):

```
> r13:=lambda[dt]=64/Rey[1]:
```

Do rovnice tlakových ztrát v trubkovém prostoru (r12) dosadíme Darcyho součinitel třetího řádu z rovnice r13,  $Rey_1$  z r3e,  $u_1$  z r3c a  $dh_1$  z r2:

```
> r14:=subs(r13,r3m,r3c,r2,r12):
```

Vyjádření délky výměníku pro dosažení dovolené tlakové ztráty v TP:

```
> r14b:=Lt=solve(r14,Lt):
```

Tlakové ztráty v mezitrubkovém prostoru jsou dány vztahem:

```
> r15:=dP2=1/2*lambda[dm]*Lt/dh2*rho[2]*u[2]^2:
```

Při návrhu výměníku uvažujeme, že bude zhotoven z nových trubek o standardní drsnosti. Pro tento případ lze Darcyho třetí součinitel v laminárním režimu pro trubkový prostor vyjádřit vztahem pro hydraulicky hladké trubky (platným pro  $Re < 2400$ ):

```
> r16:=lambda[dm]=64/Rey[2]:
```

```
> r16 := lambda[dm] = 64/Rey[2]:
```

Do rovnice tlakových ztrát v mezitrubkovém prostoru (r15) dosadíme Darcyho součinitel třetího řádu z rovnice r16,  $Rey_2$  z r3f,  $u_2$  z r3d a  $dh_2$  z r3:

```
> r17:=subs(r16,r3n,r3g,r3d,r3,r15):
```

Vyjádření délky výměníku pro dosažení dovolené tlakové ztráty v MP:

```
> r17b:=Lt=solve(r15,Lt):
```

Vstupní data pro stranu 1 (po provedení tepelné bilance):

```
>
```

```
m[1]:=0.124:dP1:=140000:t11:=150.0:t12:=90.82424006:eta[1]:=0.06:eta[w1]:=0.085  
1:beta[1]:=8.6e-4:
```

```
rho[1]:=943.1:cp[1]:=4171.4:cp1str:=4105.6:
lambda[1]:=0.43:
Vstupní data pro stranu 2 (po provedení tepelné bilance):
>
m[2]:=0.124:dP2:=120000:t21:=10.0:t22:=70.0:eta[2]:=0.174:eta[w2]:=0.0851:beta[2]:
=3.9e-4:
rho[2]:=988:cp[2]:=4058.6:cp2str:=4049.2:
lambda[2]:=0.43:
Soucinitele zanaseni pracovnich latek:
> Rz1:=2.5e-4:
Rz2:=2.5e-4:
Znamé parametry materiálu výměníku:
> lambda[t]:=14.70:#tepelna vodivost materialu trubek (měď) [W/(m.K)]
st:=0.002:#predbezna tloustka sten trubek [m]
Další specifické požadavky zadání:
Z dispozicniho (prostoroveho) zadani predlozeneho zakaznikem vyplyva pouzitelna
delka trubek 2.5 m.
> LtO:=2.5:
Postup řešení:
Ověření zadané tepelné bilance (V semestrální práci bude bilance provedena
přesným iteračním řešením):
> Q2:=m[2]*cp2str*(t22-t21);
Q1:=m[1]*cp1str*(t11-t12);
rozdilQ:=(Q1-Q2);
>
```

*Q2 := 30126.0480*

*Q1 := 30126.0480*

*rozdilQ := 0.*

Vidíme, že rozdíl v bilanci je zanedbatelný. Bilance je provedena dostatečně přesně. Můžeme tedy Q zvolit například Q1:

> Q:=Q1;

*Q := 30126.0480*

Volba konstrukčního uspořádání výměníku na základě rozdílu středních teplot: Lze použít buď provedení U modulu (rozebiratelné provedení) nebo provedení přímé (nerozebiratelné).

> t1:=(t11+t12)/2;

t2:=(t21+t22)/2;

rozdil\_ts:=t1-t2;

*t1 := 120.412120*

*t2 := 40.0000000*

*rozdil\_ts := 80.4121200*

Vidíme, že rozdíl středních teplot je větší než 20°C. Je nutno volit uspořádání, které umožní rozdílnou tepelnou dilataci trubek a pláště - to umožňuje provedení U modulu (rozebiratelné).

Střední logaritmický teplotní spád:

> dTln:=evalf(((t21-t12)-(t22-t11))/ln((t21-t12)/(t22-t11)));#horky proud 2 v MP

dTln:=evalf(((t11-t22)-(t12-t21))/ln((t11-t22)/(t12-t21)));#horky proud 1 v TP

*dTln := -80.4114179*

*dTln := 80.4114195*

Prandtlůva čísla  $Pr[1]$  a  $Pr[2]$ :

>  $Pr[1] := \eta[1] \cdot cp[1] / \lambda[1]; Pr[2] := \eta[2] \cdot cp[2] / \lambda[2];$

$Pr_1 := 582.0558140$

$Pr_2 := 1642.317209$

*Predbežná volba počtu vnitřních trubek:*

Obvyklá praxe je navrhovat výměník co nejjednoduší. Proto pro začátek zvolíme pouze jednu vnitřní trubku. V průběhu výpočtu zjistíme, zda naše volba byla správná, pokud ne, budeme počet trubek zvyšovat. Tedy:

>  $nt := 1;$

$nt := 1$

*Predbežná volba rozměru vnitřní trubky pro zajištění laminárního toku:*

Požadujeme ve vnitřní trubce laminární tok. Volíme proto například Reynoldsovo číslo  $Re_1 = 200$

Rozměry vnitřní trubky (vnitřní průměr  $d_1$  a vnější průměr  $d_2$ ) lze potom stanovit z rovnic  $r_{3e}$  a  $r_{3x}$  jako:

>  $Rey[1] := 159.47;$

$d_1 := \text{evalf}(\text{round}(\text{evalf}(1000 \cdot (4 \cdot m[1] / (\pi \cdot nt \cdot Rey[1] \cdot \eta[1])))) / 1000);$

$d_2 := d_1 + 2 \cdot st;$

$d_1 := 0.0170000000$

$d_2 := 0.0210000000$

Kontrola rychlosti toku:

>  $u[1] := \text{evalf}(\text{rhs}(r_{3c}));$

$u_1 := 0.579263569$

Rychlost je akceptovatelná.

*Predbežná volba rozměru vnější trubky pro zajištění laminárního toku:*

Požadujeme rovněž ve vnější trubce laminární tok. Volíme proto například Reynoldsovo číslo  $Re_2 = 20,3$ .

Rozměry vnější trubky (vnitřní průměr  $D_1$  a vnější průměr  $D_2$ ) lze potom stanovit pomocí rovnice  $r_{3f}$  jako:

>  $Rey[2] := 15.9;$

$D_1 := \text{evalf}((4 \cdot m[2] / (Rey[2] \cdot \pi \cdot \eta[2])) - (nt \cdot (d_1 + 2 \cdot st)));$

$D_2 := D_1 + 2 \cdot st;$

$D_1 := 0.0360670510$

$D_2 := 0.0400670510$

Kontrola rychlosti toku:

>  $u[2] := \text{evalf}(\text{rhs}(r_{3d}));$

$u_2 := 0.185849402$

Rychlost je akceptovatelná.

Rychlost je akceptovatelná.

>  $dh_1 := (d_1);$

$dh_2 := (D_1^2 - nt \cdot (d_1 + 2 \cdot st)^2) / (D_1 + nt \cdot (d_1 + 2 \cdot st));$

$Gr_1 := (dh_1^3) \cdot (\rho[1]^2) \cdot 9.81 \cdot (\beta[1])^60 / (\eta[w_1]^2);$

$Gr_2 := (dh_2^3) \cdot (\rho[2]^2) \cdot 9.81 \cdot (\beta[2])^60 / (\eta[w_2]^2);$

$\lambda[dm] := 64 / Rey[2];$

```

dh1 := 0.0170000000
dh2 := 0.0150670510
Gr_1 := 305.437138
Gr_2 := 105.833805
λdm := 4.02515723
> Gr_1*Pr[1];
Gr_2*Pr[2];
1.777814624105
1.738126799105

```

Vyčíslení rovnic r11b,r14b,r17b:

```

> #Lt:=10.;
> alpha[1]:=rhs(r8);alpha[2]:=rhs(r10);k:=rhs(r5);
α1 := 617.687235;
α2 := 539.573851;
k := 219.156806;

```

```

> A:=evalf(rhs(r1));

```

$A := 0.06597344573Lt$

```

> dTln;
Qx:=k*A*dTln;
Q;

```

80.4114195;  
 $Qx := 1162.630894Lt$   
30126.04800

```

>
> LtQ:=rhs(r11b);
LtdP1:=evalf(rhs(r14b));
LtdP2:=rhs(r17b);

```

$LtQ := 25.9119623;$   
 $LtdP1 := 37.4796732;$   
 $LtdP2 := 26.3255449;$

Výpočet požadovaných parametrů:

Průměry trubek:

```

> d1:=d1;d2:=d1+2*st;
D1:=D1;D2:=D1+2*st;

```

$d1 := 0.0170000000$   
 $d2 := 0.0210000000$   
 $D1 := 0.0360670510$   
 $D2 := 0.0400670510$

Aby byl návrh zcela korektní je potřeba nyní upravit nalezené rozměry trubek dle CSN a provést kontrolu.

a) Nejbližší rozměr vnitřní trubky dle CSN:

```

> d2:=0.0213;st:=0.002;d1:=d2-2*st;

```

$d2 := 0.0213$   
 $st := 0.002$

$$d1 := 0.0173$$

b) Nejbližší rozměr vnější trubky dle ČSN:

> D2:=0.0424;st2:=0.0026;D1:=D2-2\*st2;

$$D2 := 0.0424$$

$$st2 := 0.0026$$

$$D1 := 0.0372$$

Kontrola - vycísení delek pro upravené rozměry:

> LtQ:=rhs(r11b);

LtdP1:=evalf(rhs(r14b));

LtdP2:=rhs(r17b);

$$LtQ := 26.0387480$$

$$LtdP1 := 40.9054999$$

$$LtdP2 := 26.3255449$$

Normalizovaný návrh splňuje požadavky zadání.

Celková vypočtená délka trubek:

> Lt:=LtQ;

$$Lt := 26.0387480$$

Potřebný počet sériových výměníků (rovných sekci) pro zadané omezení délky trubek (sekce):

> Nv:=round(Lt/LtO);

$$Nv := 10$$

Jsou potřeba 10 rovných sekci, tedy výměna tepla bude realizována šesti moduly rozebíratelného provedení (tj. dvěma U moduly).

Schema návrhu bude tedy následující:

Overdesign (poměr vyrobené ku teoreticky potřebné ploše výměny tepla) - obvyklá praxe je do 0,96% (tj. do 1.1).

> AO:=Nv\*LtO/Lt;

$$AO := 0.960107602$$

Overdesign je cca 1.4 %, což je minimální, ale vzhledem k již uvažovanému zanesení ve výpočtu postacující.

Porovnání aktuálních a dovolených tlakových ztrát:

> Delta[P1]:=evalf(rhs(r14));#aktualni tl.ztr. v TP

dP1:=dP1;#dovolena tl.ztr. v TP

Delta[P2]:=evalf(rhs(r17));#aktualni tl. ztr. v MP

dP2:=dP2;#dovolena tl.ztr. v MP

$$\Delta_{P1} := 89118.2050$$

$$dP1 := 14000$$

$$\Delta_{P2} := 96111.7559$$

$$dP2 := 12000$$

Vidíme, že se podařilo navrhnout výměník (z hlediska využití dovolených tlakových ztrát) velmi dobře.

Výpočtový model však nezohledňuje ve výpočtu tlakových ztrát místní odpory, které je nutno také uvažovat.

Obvyklá sumární vypočtová rezerva na místní odpory (vstup, výstup a obrát proudů) se v praxi bere

10 až 20 % z vypočtené tlakové ztráty.

Uvažujeme-li 15% rezervu na místní odpory budou aktuální tlakové ztráty:

> Delta[P1]:=Delta[P1]\*1.15;

Delta[P2]:=Delta[P2]\*1.15;

$$\Delta_{P1} := 1.02485935810^5$$

$$\Delta_{P2} := 1.10528519410^5$$

Vidíme, že i při zohlednění místních odporů nepřekročí tlakové ztráty dovolené hodnoty. Navrh vyhovuje.

Z výsledku lze konstatovat, že návrh je proveden "na míru".

Výčíslení ostatních požadovaných parametrů:

Součinitele přestupu tepla:

> alpha[1]:=evalf(rhs(r8));

alpha[2]:=evalf(rhs(r10));

$$\alpha_1 := 610.169646$$

$$\alpha_2 := 519.628173$$

Aktuální rychlosti toku:

> u[1]:=evalf(rhs(r3c));

u[2]:=evalf(rhs(r3d));

$$u_1 := 0.559347694$$

$$u_2 := 0.171799489$$

>

$$u_2 := 0.1698058177$$



## Příloha č.7 – Výpočet nutné doby ohřevu kalů

Vypocet vymeny tepla mezi kalem a teplonosnym mediem  
Rovnice pro stanoveni casu ohrevu

```
> restart;
> r1 := t = M*cp*ln((Tl-T1)/(Tl-T2))/(U*A);# doba ohrevu y
tepelne bilance
flowarea := (100*21.4)/(1000*1000);# plocha prutoku
```

$$r1 := t = \frac{M \cdot cp \cdot \ln\left(\frac{Tl - T1}{Tl - T2}\right)}{U \cdot A}$$

$$flowarea := 0.00214000000$$

mnozstvi oleje pro ohrev systemu  
byl pouyit teplonosny olej

```
> rho1 := 945;#hustota kalu
lambdaoleje := 0.118;
eta := 1.11*10^(-3); #dinamicka viskozita
mo := 2500;#mnozstvi oleje
G := mo/flowarea;#prutok
```

```
pi:=evalf(Pi);
```

$$\rho l := 945$$

$$\lambda_{oleje} := 0.118$$

$$\eta := 0.00111000000$$

$$m_o := 2500$$

$$G := 1.16822429910^6$$

$$\pi := 3.14159265$$

Ekvivalentni prumer

```
> De := 4*flowarea/(2*(0.35e-1+0.214e-1));
```

$$De := 0.0758865248$$

teplný koeficient alpha

```
> alpha := 0.23e-
1*(De*G/(3600*eta))^0.8*(1840*eta/lambdaoleje)^0.3*lambdaoleje/
De;
```

$$\alpha := 252.217463$$

Soucinitel prenosu tepla pro spiralu umistenou z vnejska tlakove nadoby

```
> alpha[c] := alpha*(1+3.5*(1/2)*De);
```

$$\alpha_c := 285.712300$$

Nussletovo cislo

```
> Nus := K*Rey^a*Pr^b*geometricfactor;
```

$$Nus := K \cdot Re^a \cdot Pr^b \cdot \text{geometricfactor}$$

Doporuceny geometricky faktor je vyjadren

```
> geometricfactor := ((1/3)*Dv/Di)^.025*(x1/xl)^0.15;
```

```

Dv := 1.20; # vnitřní průměr tlakové nádoby
Di := 0.4; # průměr míchadla
xi := (1/3)*Dv; # výška míchadla ode dna
xi := evalf(xi);
xl := 1.45; # výška pláště
X := evalf(geometricfactor);

geometricfactor := 0.9729084349 * (Dv/Di)^0.025 * (xi/xl)^0.15

Dv := 1.20
Di := 0.4
xi := 0.4000000000
xi := 0.4000000000
xl := 1.45
X := 0.8243351110

```

konstanty z tabulky 31.4 viz [22]

```

> K := 0.37;
a := 2/3;
b := 1/3;

```

$K := 0.37$

$a := \frac{2}{3}$

$b := \frac{1}{3}$

```

> N := 1000*(150*1/60); # otáčky
v := 0.0851/970; # viskozita
Rey := N*Di^2/v; # Reynoldsovo číslo
lambdakalu := 0.43;
Cpkalu := 4.2;
Pr := 1000*Cpkalu*10^(-3)/lambdakalu; # Prandtlovo číslo
Nus := evalf(Nus);

>

```

$N := 2500$

$v := 0.0000877319587$

$Rey := 4.55934195110^6$

$lambdakalu := 0.43$

$Cpkalu := 4.2$

$Pr := 9.767441860$

$Nus := 17926.70930$

Koeficient přenosu tepla v nádobě je:

```

> alpha[ve] := Nus*lambdakalu/Dv;
A := pi*Dv*1.200; # plocha pro výměnu tepla
A := evalf(A);

```

$\alpha_{ve} := 6423.737520$

$$A := 4.52389342;$$

$$A := 4.52389342;$$

Celkový součinitel přestupu tepla

$$> R2 := 1/\alpha[c] + 1/\alpha[ve];$$

$$U := 1/R2;$$

$$R2 := 0.00365569693$$

$$U := 273.545651;$$

Objem kalu v nadobe

$$> V := 1.8;$$

$$M := 1.8 * 999; \# \text{ hmotnost kalu}$$

$$V := 1.8$$

$$M := 1798.2$$

Doba ohřevu

$$> t := 1000 * \ln((T1 - T1)/(T1 - T2)) * M * C_{p\text{kalu}} / (U * A) * 1 / 3600;$$

$$T1 := 160;$$

$$T1 := 70;$$

$$T2 := 150;$$

$$t := \text{evalf}(t);$$

$$t := 1.695284546 \ln\left(\frac{T1 - T1}{T1 - T2}\right)$$

$$T1 := 160$$

$$T1 := 70$$

$$T2 := 150$$

$$t := 3.72492087;$$

## Příloha č.8 – Návrh tlakové nádoby

Maximální dovolené napětí pro části pod tlakem jiné než šrouby

> restart;

>

> R[p1,0/t]:=172;#mez kluzu za teploty 150°C

R[m/t]:=420;#mez pevnosti za teploty 150°C

172

420

> R[m/t] := 420;

420

> f[d1]:=R[p1,0/t]/1.5;

114.6666667

> f[d2a]:=R[p1,0/t]/1.2;

143.3333333

> f[d2b]:=R[m/t]/3;

140

> f[d2]:=min(f[d2a],f[d2b]);

140

> f[d]:=max(f[d1],f[d2]);#dovolene napeti

>

140

Určení požadované tloušťky nádoby:

Tlakl v nádobě

> P:=1;

1

Vnitřní průměr

> Di:=1.20;

1.20

> z:=0.7; # svarovy soucinitel

f:=0.9\*f[d];

0.7

126.0

> e[v] := P\*Di/(2\*f\*z-P); # tloustka steny tlakove nadoby

0.006841505131

volím e = 8 mm

> e:=0.008; #zvolena tloustka po zaokrouhleni

0.008

Rozhodli jsme se pro kuželové dno, kde tloušťka stěny pro každý bod kuželového pláště může být vypočítána z:

> alpha:=1.047197551; # uhel sklonu kuzeloveho dna

> e:=0.008;

>

econv:=evalf(e\*1/cos(alpha));

1.047197551

0.008

0.01599999999

> econ:=0.014; #tloustka steny kuzeloveho dna po zaokrouhleni

0.014

volíme econ = 0,013 m

určení napětí v oblasti spojení válcového pláště s kuželovým dnem  
Navržení tloušťky stěny - válcová část

```
>
e:=0.008;Dm:=1.20+e;
sigma[nu1]:=P*Dm/(4*s[1]);
sigma[phi1]:=P*Dm/(2*s[1]);
sigma[n1]:=0;
```

$$\frac{0.008}{1.208} = \frac{0.3020000000}{s_1} = \frac{0.6040000000}{s_1} = 0$$

kuželová část

```
> sigma[nu2]:=P*Dm/(4*s[r20]*cos(alpha));
sigma[phi2]:=P*Dm/(2*s[r20]*cos(alpha));
sigma[n2]:=0;
```

$$\frac{0.6039999998}{s_{r20}} = \frac{1.208000000}{s_{r20}} = 0$$

```
> sigma[1]:=sigma[phi2];
sigma[2]:=sigma[nu2];
sigma[3]:=sigma[n2];
r1:=sigma[red]=sigma[1]-sigma[3];
```

$$\sigma_{red} = \frac{1.208000000}{s_{r20}} = \frac{0.6039999998}{s_{r20}} = \frac{1.208000000}{s_{r20}}$$

```
> R:=Dm/2; # vnitřní poloměr nádoby
sigma[red]:=f;
s[r20]:=evalf(P*Dm/(2*sigma[red]*cos(0.785398163)));
s[v2]:=s[r20]/0.7; # tloušťka stěny tlakové nádoby
```

$$\frac{0.6040000000}{126.0} = \frac{0.006779245960}{0.009684637089}$$

Volíme  $s_2 = 13 \text{ mm}$

```
> econ:=0.013;
e:=0.007;
```

s[2]:=econ;  
s[1]:=e;

0.013  
0.007  
0.013  
0.007

Výpočet délek ovlivněných oblastí:

> R:=Dm/2;  
l[1]:=3\*(R\*s[1])^0.5;  
l[2]:=3\*(R\*s[2]/sin(alpha))^0.5;

0.6040000000  
0.1950692185  
0.2856577982

Pevnostní výpočet:

Rovnováha sil

> H[1]:=H[2];  
V[1]:=V[2];  
M[1]:=M[2];

$H_2$   
 $V_2$   
 $M_2$

Def. podmínky

> omega[1]:=omega[2];  
nu[1]:=nu[2];  
V[1]:=P\*1000\*R/2;

$\omega_2$   
 $v_2$   
302.0000000

Pro natoceni (1 - valcova cast, 2 - kuyelova cast):

> nu[1]:=M[1]\*a[11.1]+H[1]\*a[12.1]-V[1]\*d[1.1]+P\*d[2.1]+d[3.1];  
nu[2]:=M[2]\*a[11.2]+H[2]\*a[12.2]-V[2]\*d[1.2]+P\*d[2.2]+d[3.2];

$$M_2 a_{11.1} + H_2 a_{12.1} - 302.0000000 d_{1.1} + d_{2.1} + d_{3.1}$$

$$M_2 a_{11.2} + H_2 a_{12.2} - V_2 d_{1.2} + d_{2.2} + d_{3.2}$$

Posunuti:

> omega[1]:=M[1]\*a[21.1]+H[1]\*a[22.1]-V[1]\*d[4.1]+P\*d[5.1]+d[6.1];  
omega[2]:=M[2]\*a[21.2]+H[2]\*a[22.2]-V[2]\*d[4.2]+P\*d[5.2]+d[6.2];

$$M_2 a_{21.1} + H_2 a_{22.1} - 302.0000000 d_{4.1} + d_{5.1} + d_{6.1}$$

$$M_2 a_{21.2} + H_2 a_{22.2} - V_2 d_{4.2} + d_{5.2} + d_{6.2}$$

>

po dosazeni do def. podmínky:

> a[12.1]:=a[21.1];  
a[12.2]:=a[21.2];

(a[11.1]+a[21.2])\*M[1]+(a[12.1]-a[12.2])\*H[1]=(d[1.1]+d[1.2])\*V[1];

(a[21.1]+a[21.2])\*M[2]+(a[22.1]-a[22.2])\*H[1]=(d[4.1]+d[4.2])\*V[1]-(d[5.1]-d[5.2])\*P;

$a_{21.1}$

$$(a_{11.1} + a_{21.2}) M_2 + (a_{21.1} - a_{21.2}) H_2 = 302.0000000 d_{1.1} + 302.0000000 d_{1.2}$$

$$(a_{21.1} + a_{21.2}) M_2 + (a_{22.1} - a_{22.2}) H_2 = 302.0000000 d_{4.1} + 302.0000000 d_{4.2} - d_{5.1} + d_{5.2}$$

> (a[11.1]+a[21.2])\*M[2]+(a[21.1]-a[21.2])\*H[2] =  
313.5000000\*d[1.1]+313.5000000\*d[1.2];

$$(a_{11.1} + a_{21.2}) M_2 + (a_{21.1} - a_{21.2}) H_2 = 313.5000000 d_{1.1} + 313.5000000 d_{1.2}$$

Pro natoceni:

> delta[11]\*M[1]+delta[12]\*H[1]+delta[12]=0;

$$\delta_{11} M_2 + \delta_{12} H_2 + \delta_{12} = 0$$

Pro posunuti:

> delta[12]\*M[1]+delta[22]\*H[1]+delta[22]=0;

$$\delta_{12} M_2 + \delta_{22} H_2 + \delta_{22} = 0$$

> alpha[1]:=1.047197551;

alpha[2]:=2.094395102;

$$1.047197551$$

$$2.094395102$$

> mu:=0.3;

E:=1.9\*10<sup>5</sup>; #modul pruznosti

beta[1]:=((3\*(1-mu<sup>2</sup>))\*(sin(alpha[1]))<sup>2</sup>/(R<sup>2</sup>\*(s[1]\*1000)<sup>2</sup>))<sup>0.25</sup>;

beta[2]:=((3\*(1-mu<sup>2</sup>))\*(sin(alpha[2]))<sup>2</sup>/(R<sup>2</sup>\*(s[2]\*1000)<sup>2</sup>))<sup>0.25</sup>;

$$0.3$$

$$190000.0$$

$$0.5817528083$$

$$0.4268898532$$

> Db[1]:=(E\*(s[1]\*(1000))<sup>3</sup>)/(12\*(1-mu<sup>2</sup>));

Db[2]:=(E\*(s[2]\*(1000))<sup>3</sup>)/(12\*(1-mu<sup>2</sup>));

$$0.5967948718 \cdot 10^7$$

$$0.3822619048 \cdot 10^8$$

> a[11.1]:=1/(Db[1]\*beta[1]);

a[11.2]:=1/(Db[2]\*beta[2]);

a[12.1]:=a[11.1]\*sin(alpha[1])/(2\*beta[1]);

a[12.2]:=a[11.2]\*sin(alpha[2])/(2\*beta[2]);

a[21.1]:=a[12.1]\*sin(alpha[1])/(beta[1]);

a[22.2]:=a[12.2]\*sin(alpha[2])/(beta[2]);

$$0.2880291407 \cdot 10^{-6}$$

$$0.6128061968 \cdot 10^{-7}$$

$$0.2143870638 \cdot 10^{-6}$$

$$0.6215956295 \cdot 10^{-7}$$

$$0.3191469656 \cdot 10^{-6}$$

$$0.1261022257 \cdot 10^{-6}$$

> d[1.1]:=(1+1/(2\*beta[1]<sup>2</sup>\*R<sup>2</sup>))\*a[12.1]\*0;

d[1.2]:=(1+1/(2\*beta[2]<sup>2</sup>\*R<sup>2</sup>))\*a[12.2]\*1;

d[2.1]:=(mu/2\*beta[1]<sup>2</sup>\*R)\*a[12.1];

d[2.2]:=(mu/2\*beta[2]<sup>2</sup>\*R)\*a[12.2];

d[4.1]:=a[21.1]\*cot(alpha[1])+d[2.1];

```
d[4.2]:=a[22.2]*cot(alpha[2])+d[2.2];
d[5.1]:=a[21.1]/(2*beta[1]*sin(alpha[1]));
d[5.2]:=a[22.2]/(2*beta[2]*sin(alpha[2]));
```

0.

```
0.5296496596 10-6
0.6573607220 10-8
0.1026284605 10-8
0.1908331938 10-6
-0.7177886928 10-7
0.3167317526 10-6
0.1705478671 10-6
```

```
> delta[1]:=a[11.1]+a[11.2];
delta[2]:=a[12.1]-a[12.2];
delta[3]:=d[1.1]+d[1.2];
delta[4]:=a[12.1]+a[12.2];
delta[5]:=a[21.1]+a[22.2];
delta[6]:=d[4.1]-d[4.2];
delta[7]:=d[5.1]-d[5.2];
M[1]:=delta[3]*V[1]/delta[1];
H[1]:=(delta[6]*V[1]-delta[7]*P)/delta[5];
```

```
0.3493097604 10-6
0.1522275008 10-6
0.5296496596 10-6
0.2765466268 10-6
0.4452491913 10-6
0.2626120631 10-6
0.1461838855 10-6
457.9150523
177.7940549
```

Toroidni dno (poklice):

volim r = 0.125 (vnitřní radius zaoblení prechodu)

>

f:=126;r:=0.125;

P:=1;

es:=P\*(Dm/2)/(2\*f\*z-(0.5\*P));

Y:=econ/(Dm/2);

X:=r/Di;

N:=1.006-1/(6.2+(90\*Y)^4);

Z:=log10(1/Y);

beta[s]:=N\*(-0.3635\*Z^3+1.0383\*Z^2-1.2943\*Z+0.837);

ey:=beta[s]\*P\*(0.75\*(Dm/2)+0.2\*Di)/f;

R[p0.2/t]:=142;

f[b]:=R[p0.2/t]/1.5;

eb:=(0.75\*(Dm/2)+0.2\*Di)\*((P/(111\*f[b]))\*(Di/r)^0.825)^0.666666666666;

>

>

126



0.125  
1  
0.003433769187  
0.02152317880  
0.1041666667  
0.9566897864  
1.667093586  
-0.1140744617  
-0.0006274095394  
142  
94.66666667  
0.005011515024

Opet volim tloušťku  $e_t = 10$  mm

Venkovní velikost torispherickeho dna je:

>  $h[i1]:=(Dm/2)+(((Dm/2)-(Di/2))*((Dm/2)+(Di/2)-2*r))^{0.5};$

$f:=126;$

$R:=Dm/2;$

$e[t]:=10;$

0.6657737808

126

0.6040000000

8

>  $P[s]:=2*f*z*e[t]/((Dm/2)+0.5*e[t]);$

$P[y1]:=f*e[t]/(beta[s]*(0.75*(Dm/2)+0.2*Di));$

$P[b]:=111*f*94.66*(e[t]/(0.75*R+0.2*Di))^{1.5}*(r/Di)^{0.825};$

306.5160730

-12750.84215

44466.02169 *f<sup>94</sup>*

Venkovní zatížení

>  $R:=Dm/2;$

$R[p0.2/t]:=142;$

$\sigma[e]:=R[p0.2/t]/1.25;$

$\sigma[es]:=\sigma[e];$

$S:=1.5;$

$P[y]:=\sigma[e]*s/(Dm/2);$

$L:=1.6;$

$\epsilon:=0.009;$

$P[m]:=E*s*\epsilon/(Dm/2);$

0.6040000000

142

113.6000000

113.6000000

1.5

188.0794702 s

1.6

0.009

2831.125828 s

>

>  $\gamma:=0;$

$P[y]=\sigma[e]*s/((Dm/2)*(1-\gamma*G));$

0  
188.0794702 s

> a:=0.02;

Pc:=0.5;

er:=a\*(Pc/3\*f)^0.5;

0.02  
0.5  
0.09165151392

h - delka konicke casti:

> h[i2]:=Di/2+econ/sin(alpha[2]);

0.6150111070

### Příloha č.9 – Náklady a úspory v závislosti na odvodnění

Procento odvodnění	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Hmotnost kalů po odstředění [kg/rok]	553,1	522,3	494,0	468,0	444,0	421,8	401,1	381,9	364,0	347,2	331,5	316,7	302,8	289,7	277,3	265,6	254,5	244,0	234,0	224,5
Náklady na odvoz ročně [tis. Kč]	248,9	235,0	222,3	210,6	199,8	189,8	180,5	171,9	163,8	156,3	149,2	142,5	136,3	130,4	124,8	119,5	114,5	109,8	105,3	101,0
Úspora ročně [tis. Kč]	0,0	13,9	26,6	38,3	49,1	59,1	68,4	77,0	85,1	92,6	99,7	106,4	112,6	118,5	124,1	129,4	134,4	139,1	143,6	147,9
Procento odvodnění	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	
Hmotnost kalů po odstředění [kg/rok]	215,4	206,8	198,5	190,7	183,1	175,9	169,0	162,4	156,0	149,9	144,0	138,3	132,9	127,6	122,6	117,7	113,0	108,4	104,0	
Náklady na odvoz ročně [tis. Kč]	96,9	93,1	89,3	85,8	82,4	79,2	76,1	73,1	70,2	67,4	64,8	62,3	59,8	57,4	55,2	53,0	50,8	48,8	46,8	
Úspora ročně [tis. Kč]	151,9	155,8	159,5	163,1	166,5	169,7	172,8	175,8	178,7	181,4	184,1	186,6	189,1	191,5	193,7	195,9	198,1	200,1	202,1	