



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

REKUPERACE TEPLA Z ODPADNÍCH VOD

HEAT RECOVERY FROM WASTE WATER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kateřina Paulíková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Filip Toman

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Kateřina Paulíková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Filip Toman**
Akademický rok: 2019/20

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

Rekuperace tepla z odpadních vod

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Postupně nastává odklon od letité filozofie nakládání s odpadními vodami, co nejrychleji se jich zbavit za téměř jakoukoliv cenu. Rostoucí ceny energií a cen i vody samotné pomohly ke změně obecného náhledu na odpadní vody jako na komoditu, kdy je možné zpětně využívat nejenom vodu samotnou, ale i energii v ní obsaženou. Přičemž jednoznačně ekonomicky významnější je energie tepelná. Práce bude zaměřena na obecný přehled o možnostech a technologiích umožňující zpětnou rekuperaci tepla z odpadních vod.

Cíle bakalářské práce:

- Popis problematiky odpadních vod
- Zpracovat přehled systémů a technologií pro zpětné získávání tepla z odpadních vod
- Zhodnocení dosud zrealizovaných technických řešení.

Seznam doporučené literatury:

HLAVÍNEK P., HLAVÁČEK J. Čištění odpadních vod-praktické příklady výpočtů, NOEL 2000, 1996, 196 s. ISBN 80-86020-00-2.

CAO, Y. S. Mass Flow and Energy Efficiency of Municipal Wastewater Treatment Plants. London: IWA Publishing, 2011. ISBN 1843393824.

WETT, B., BUCHAUER, K., FIMML, C. Energy Self-Sufficiency as a Feasible Concept for Wastewater Treatment Systems, Leading-Edge Conference, 4-6 June, 2007, Singapore.

REINHARDT G., FILLMORE L., Energy Opportunities in Wastewater and Biosolids, GWCR (2008), State of Science Report: Energy and Resource Recovery from Sludge, 2009.

PAVELEK, M. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-2-4-4300-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce pojednává o pohledu na odpadní vodu jako na zdroj tepelné energie. Práce je rozdělena do tří hlavních kapitol. První kapitola má za úkol seznámit s problematikou odpadních vod. Rozbor systémů pro rekuperaci tepla z odpadních vod je shrnut v následující kapitole. Zmíněné jsou systémy instalovány přímo u vzniku odpadní vody, vloženy do kanalizačního potrubí a na závěr získ tepelné energie v čistírnách odpadních vod. Všechny uvedené systémy se snaží co nejlépe vyřešit ekonomickou i ekologickou stránku. A závěrečnou kapitolu tvoří celkové zhodnocení uvedených systémů.

Klíčová slova

Rekuperace, odpadní voda, tepelný výměník, tepelná energie

ABSTRACT

The aim of the Bachelor's Thesis is to discuss the view of wastewater as a source of thermal energy. The thesis is divided into three main chapters. The first chapter aims to acquaint with the issue of wastewater. The analysis of systems for heat recovery from wastewater is summarized in the following chapter. Also there is a focus on systems installed directly at the generation of wastewater, inserted into the sewerage pipes and finally the creation of thermal energy in wastewater treatment plants. All mentioned systems are built to be economical and ecological efficient as possible. Finally, the last chapter includes an overall evaluation of the systems.

Key words

Heat recovery, wastewater, heat exchanger, thermal energy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAULÍKOVÁ, Kateřina. *Rekuperace tepla z odpadních vod*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124554>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Filip Toman.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Rekuperace tepla z odpadních vod** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Kateřina Paulíková

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce Ing. Filipu Tomanovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

Obsah

ÚVOD	11
1 Problematika odpadních vod.....	12
1.1 Odpadní vody podle charakteru znečištění.....	13
1.1.1 Splašková odpadní voda.....	13
1.1.2 Průmyslová odpadní voda	14
1.1.3 Dešťová odpadní voda.....	14
1.1.4 Balastní odpadní voda	14
1.2 Složení odpadních vod.....	15
1.3 Problematika šedých, hnědých a žlutých vod.....	15
1.4 Problematika kalů	15
1.5 Shrnutí problémů	16
2 Systémy a technologie pro zpětné získávání tepla z odpadních vod.....	17
2.1 Přímé využití tepla z odpadní vody	17
2.1.1 Plášťový výměník.....	20
2.1.2 Trubka v trubce	22
2.1.3 Možnosti zapojení decentrálních výměníků.....	24
2.1.4 Akiretherm	24
2.1.5 Pro velké objekty.....	25
2.2 Využití odpadního tepla z kanalizace	28
2.2.1 Výměníky tepla vložené do kanalizačního potrubí	28
2.2.2 Výměníky tepla integrované do stěny kanalizačního potrubí	29
2.2.3 Předizolované kanalizační potrubí s integrovaným výměníkem tepla.....	29
2.2.4 Externí ocelové dvoutrubkové výměníky tepla.....	31
2.3 Využití odpadního tepla v ČOV	32
2.3.1 Energie z bioplynu	34
2.3.2 Energie z bioplynu metodou aerotherm	35
2.3.3 Energie z bioplynu anaerobní stabilizací.....	37
2.3.4 Přímé spalování surového kalu	38
3 Zhodnocení systémů k rekuperaci tepla z odpadních vod.....	39
3.1 Zhodnocení přímého využití tepla z odpadní vody	39
3.1.1 Výměníky v domácnostech	39
3.1.2 Výměníky pro větší objekty	39
3.2 Zhodnocení kanalizačních systémů	40

3.3	Zhodnocení ČOV.....	40
	ZÁVĚR.....	41
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	45
	SEZNAM OBRÁZKŮ	47
	SEZNAM TABULEK.....	48

ÚVOD

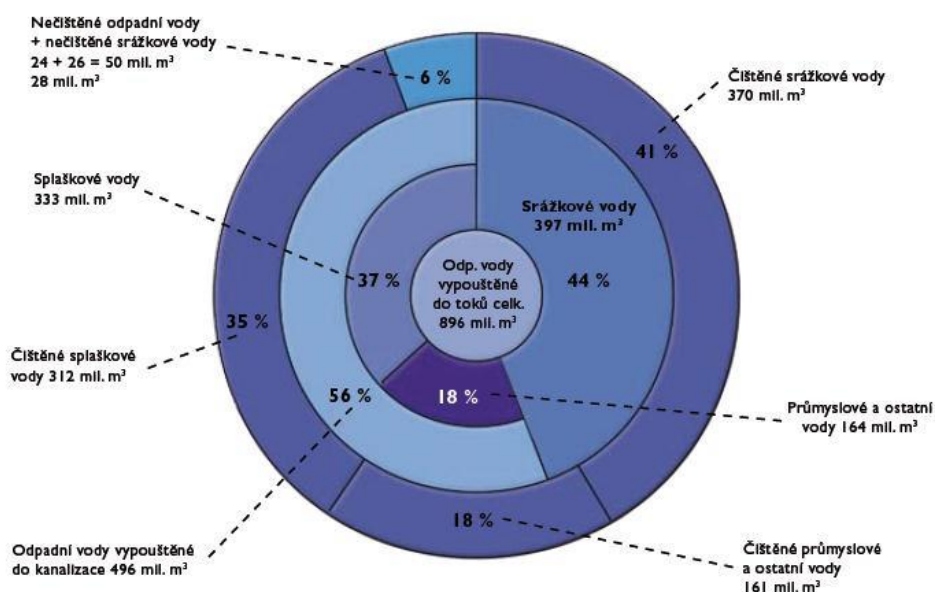
Třetinu nákladů každé domácnosti tvoří spotřeba vody a náklady s ní spojené. S rostoucí cenou za vodné a stočné je snaha tuhle spotřebu omezovat. I z ekologického hlediska víme, že voda není nevyčerpatelným produktem naší planety. Množství vody klesá, kdežto počet obyvatel narůstá.

Podle statistik odběr teplé vody představuje téměř šedesát procent z celkové spotřeby vody. Za ohřev zaplatíme více nežli za vodu samotnou. Přitom většina téhle tepelné energie je ztracena. Pomocí následně uvedených systémů, můžeme tuhle ztracenou tepelnou energii získat zpět. Největší energický potenciál má odpadní voda přímo u jejího vzniku. Pro využití tohoto potenciálu instalujeme rekuperační systémy přímo do odpadního potrubí v budově. Další systémy pro zpětné získání tepla můžeme vložit do kanalizačního potrubí. Poté, co odpadní voda ztratí svůj potenciál v podobě vyšší teploty, lze energetického zisku dosáhnout v čistírnách odpadních vod. Buď přímým spálením kalu nebo tvorbou bioplynu, který následně převedeme přes kogenerační jednotku na elektřinu.

1 Problematika odpadních vod

Problematika odpadních vod se řadí mezi největší problémy dnešního světa. Lidé si většinou neuvědomují následky, které mohou nastat znečištěním vod nebo nadměrnou a zbytečnou spotřebou vod. Spotřeba vody klesá v důsledku růstu ceny za vodné a stočné. Avšak tento pokles je velice mírný [1].

Odpadní vody lze definovat jako vody se zhoršenou kvalitou. Všechny druhy různě znečištěných vod jsou odváděny stokovou sítí. Do znečištění se zahrnuje i radioaktivita, mikrobiální znečištění, povrchové aktivní látky, zbytky léčiv, kosmetické prostředky a v neposlední řadě tepelné znečištění [1].



Obr. 1.1 Průměrná roční produkce odpadních vod v ČR z hlediska zastoupení jednotlivých druhů odpadních vod z roku 2014 [2]

Hnacími silami k řešení problematiky jsou změny klimatu, hrozící nedostatek živin, stupňující požadavky při čištění odpadních vod, nedostatek vody a nutnost úspory energie. K docílení efektivního řešení jsou vyvíjeny různé technologie. A to jak v odvětví čištění odpadních vod, tak i v oblasti získávání úspor energie. V těchto technologiích se na odpadní vodu přestává pohlížet jako na problém, ale jako na zdroj. Za ekonomicky výhodnější provozy jsou považovány ty s vysokou produkcí odpadních vod, kde se vypouští do kanalizace voda vyšších teplot [2].

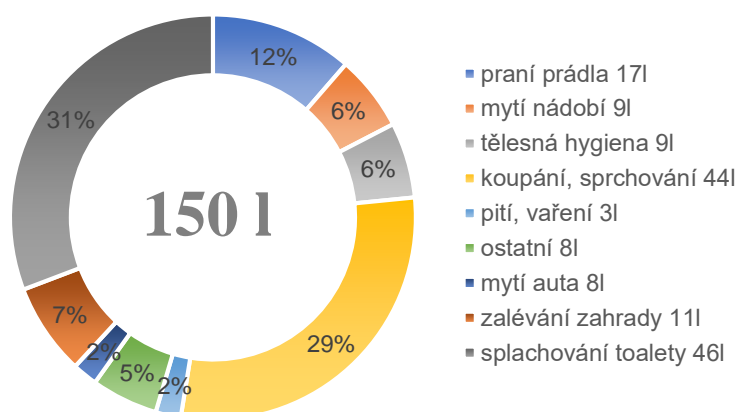
Odpadní vodu lze využít i ke sledování promořenosti populace u virových onemocnění. Analýzy probíhají na základě polymerázové řetězové reakce. Tímhle je možné odhalit i velmi malé neinfekční částice viru, respektive jeho RNA. Odhalení i takto malých částic je považováno za klíčové. Je nutné si totiž uvědomit, že virové RNA představuje v odpadní vodě značně nižší podíl než koncentrace viru v samotných infekčních kapénkách. Mimo nemoci je také často v odpadních vodách analyzován obsah drog [3].

1.1 Odpadní vody podle charakteru znečištění

1.1.1 Splašková odpadní voda

Používá se také označení komunální odpadní voda. Mezi zdroje splaškových vod se řadí odpadní vody vypuštěné do veřejné kanalizace z rodinných domů, bytových domů ale také i z veřejnoprávních budov, podnikatelských budov a obchodů [4] [5].

Spotřeba komunální vody lze vyjádřit pomocí hodnoty specifického množství odpadních vod q_{spec} . Tahle hodnota se pohybuje v rozmezí 80 až 200 l na osobu a den. Rozhodujícím faktorem je také lokalita. Obvykle se však používá nadhodnocená hodnota $q_{\text{spec}} = 150$ l. Tento objem spotřebované vody je graficky rozdělen do činností zmíněných na obrázku 1.1 [4] [5].



Obr. 1.1 Průměrná spotřeba vody na obyvatele za den [4]

Komunální odpadní vody se dělí podle typu znečištění na vody šedé, bílé, žluté, hnědé a černé [4] [6].

- **Šedá voda** obsahuje odpadní vody odtékající ze sprch, van, umyvadel apod. Neobsahuje moč a fekálie. Hlavním faktorem znečištění těchto vod jsou detergenty z pracích prášků, mýdel, šamponů, zubních past a podobně. Do skupiny šedých vod se neřadí odpadní vody z kuchyňských umyvadel a z drtičů odpadů skrz vysokou koncentraci znečištění.
- **Bílá voda** je vyčištěná šedá voda. Je nejčastěji využívána jako provozní voda pro splachování záchodů nebo k zalévání zahrad.
- **Žlutá voda**, do níž primárně spadá moč. Moč se skládá z vodného roztoku metabolických odpadů. Tudiž obsahem močoviny, rozpuštěných solí a dalších organických látek. Skutečné složení moči však záleží na individuální stravě. Žlutá voda nachází využití pro hnojení v poměru 1:8 s vodou. Ročně člověk vyprodukuje kolem 500 l moči.
- **Hnědá voda** je složena z fekálií, které se vyznačují vysokým obsahem uhlíku, vápníku, hořčíku a železa. V menším zastoupení se pak vyskytuje obsah dusíku, fosforu a draslíku. V průměru jeden člověk vyprodukuje ročně přibližně 50 l fekálií.
- **Černá voda** vzniká odváděním odpadních vod z toalet. Tudiž spojením žlutých a hnědých vod dostáváme vody černé. Černá voda je považována za hlavní zdroj živin a energie.

1.1.2 Průmyslová odpadní voda

Jedná se o odpadní vody znečištěné při výrobních procesech z průmyslové a zemědělské činnosti. Složení a množství průmyslových odpadních vod se odvíjí individuálně dle druhu výroby a technologie výroby z které pochází. Před vypuštěním do veřejné kanalizace musí být tyto vody upraveny tak, aby vyhovovaly provoznímu řádu kanalizace. Respektive by se měly dát čistit technologií, kterou využívají komunální ČOV¹. Avšak odpadní vody z průmyslové výroby by měly být odděleny a čištěny zvlášť na samostatných průmyslových ČOV [7].

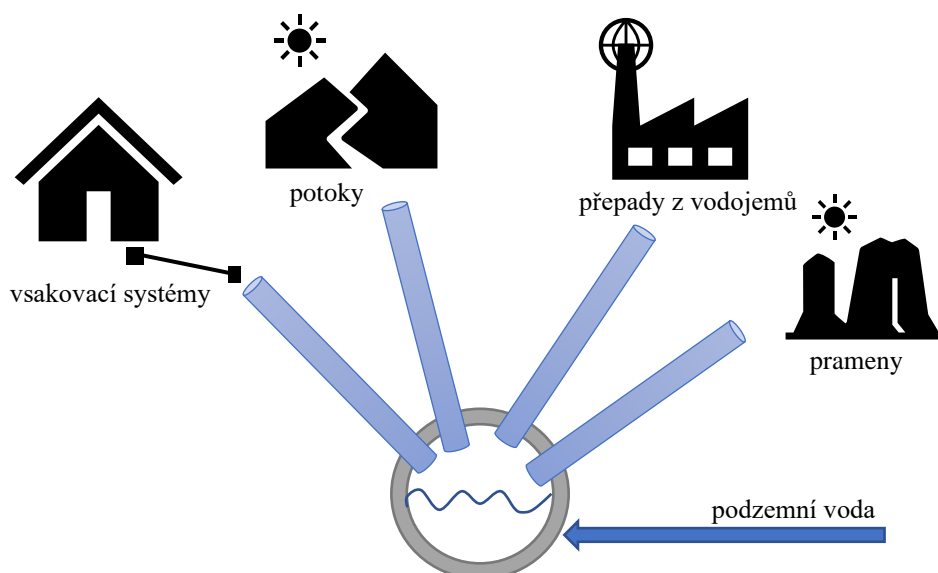
1.1.3 Dešťová odpadní voda

Do této kategorie spadají i vody z tání sněhu a ledu. Kontaminace těchto vod je minimální. Dešťové odpadní vody se dělí následovně [8].

- **Neznečištěné dešťové odpadní vody** jsou takové, které mají původ z pěších zón, parků a zahrad, ale také ze silničních komunikací s nízkou intenzitou provozu.
- **Znečištěné dešťové odpadní vody** pochází ze znečištěných povrchů a silničních komunikací s vysokou intenzitou provozu.

1.1.4 Balastní odpadní voda

Balastní vody mají zdroj především v podzemních vodách, které vnikají netěsnostmi do kanalizace. Mimo podzemní vody se sem řadí vody z fontán, vody ze vsakovacích systému ale i povrchové toky zaústěné do kanalizace apod. viz obrázek 1.2. Balastní vody ochlazují odpadní vody a ředí splašky, což je považováno za nepříznivý účinek. Balastní vody představují 10 až 15 % z celkového množství odpadních vod [4].



Obr. 1.2 Zdroje balastních vod [4]

¹ Čistírna odpadních vod

1.2 Složení odpadních vod

Znečišťující látky mají různé vlastnosti a rozdělujeme je do kategorií, které jsou zaznamenány v tabulce 1 [9].

Tab. 1 Složení odpadních vod [9]

rozpuštěné	organické	biologicky rozložitelné	cukry, mastné kyseliny	
		biologicky nerozložitelné	barviva	
	anorganické		těžké kovy, sulfidy	
nerozpuštěné	organické	biologicky rozložitelné	škrob, bakterie	
		biologicky nerozložitelné	plasty, papír	
		usaditelné		celulosová vlákna
		neusaditelné	koloidní	bakterie
	plovoucí		papír	
	anorganické	usaditelné		písek, hlína
		neusaditelné		brusný prach

1.3 Problematika šedých, hnědých a žlutých vod

U šedých vod je největším problémem znečištění detergenty z čistících prostředků, zubních past a kosmetických přípravků. Každá osoba, která využívá vodu z veřejného vodovodu, vyprodukuje ročně odpadní vodu o objemu v rozmezí 20 000 až 100 000 l. Cena vodného a stočného v Praze pro rok 2020 je stanovena na 94,09 Kč za 1000 l vody. Největší náklady jsou za používání a splachování toalet (skoro 5 Kč za den), hned pak za vodu použitou na osobní hygienu (přes 4 Kč za den). Další náklady jsou spojeny s ohřevem vody. Nejvíce teplé pitné vody se spotřebuje na tělesnou hygienu (více než 60 % z celkové spotřeby teplé vody). Několik litrů teplé vody tak odeče do kanalizace bez dalšího využití. Odpadní voda kanalizací odtéká do ČOV, kde se nečistoty mění na kal [10] [11].

1.4 Problematika kalů

Řada technologických procesů užívaných pro čištění odpadních vod produkuje velké množství kalů. Kaly jsou nevyhnutelným vedlejším produktem u čištění odpadních vod. Ačkoliv jejich objem v množství čištěné vody nepředstavuje vysoké procento (1 až 2 %), kal obsahuje zvýšené množství patogenních organismů, a tak se považuje za nebezpečný odpad. Koncentrace sušiny v kalech je menší než 5 %, zbylých 95 % tvoří voda [12].

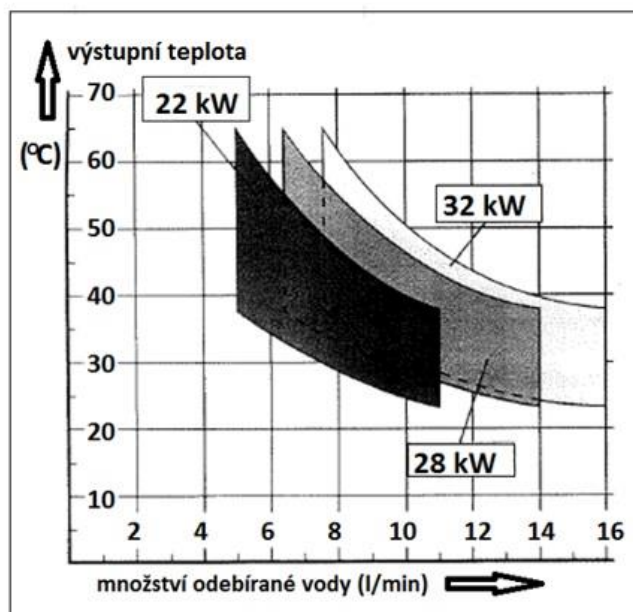
Před dalším zpracováním je nutné kal stabilizovat. Stabilizace může proběhnout buď vápěním, aerobní stabilizací, anaerobně stabilizací nebo kombinací aerobní a anaerobní stabilizace. Stabilizovaný kal se poté nepovažuje za odpad nebezpečný, ale řadí se do kategorie ostatní. Po následném odvodnění je kal připraven k dalšímu využití. Kal se stává zdrojem zpětného získávání živin nebo energie. V případě využití kalu k energetickým účelům², je nutné znát složení kalu, resp. obsah hořlavin. Dalšími důležitými údaji jsou hodnoty výhřevnosti [13].

² Do energetických účelů se například řadí spoluspalování v cementárně.

1.5 Shrnutí problémů

Odpadní voda má různé charaktery znečištění. Jedna technologie čištění nemůže být využita pro všechny typy odpadních vod. Mezi nové inovativní způsoby se řadí například využití magnetického pole při intenzifikaci procesů biologického čištění, materiálová transformace čistírenského kalu prostřednictvím mikrovlnné torefakce nebo postaerace anaerobně stabilizovaného kalu [14] [15].

Řešením problému s nadměrnou spotřebou pitné se nabízí náhrada pitné vody v oblastech, kde místo ní lze použít vodu užitkovou. Odpadní voda také obsahuje tepelnou energii, která je v drtivé většině případů odvedena do stokového systému. Tím pádem zůstává nevyužita. Na ohřev objemu vody potřebného na jednu sprchu spadá 2,42 kWh tepelné energie. Na obrázku 1.3 je znázorněna závislost výkonu ohříváče na množství odebírané vody a výstupní teplotě. Přitom tepelnou energii můžeme získat zpět z míst jako jsou kanalizační potrubí, z objektů na kanalizační síti, nebo z místa vzniku odpadní vody [16].



Obr. 1.3 Závislost výkonu ohříváče na výstupní teplotě a množství odebírané vody [16]

2 Systémy a technologie pro zpětné získávání tepla z odpadních vod

Rekuperace tepla z odpadních vod představuje ekologické i ekonomické hledisko efektivního řešení získávání tepelné energie. Tepelnou energii můžeme získat z míst jako jsou kanalizační potrubí, přímo z místa vzniku odpadní vody, anebo v čistírně odpadních vod. Připojením výměníků tepelné energie do stokového systému zvýší energetickou efektivitu a sníží spotřebu primární energie [17].

Systémy pro zpětné získávání tepla lze rozdělit podle umístění výměníků do dvou základních skupin systémů [17]:

- Decentralizované systémy
-v místě vzniku u zařizovacích předmětů
- Centralizované systémy
-stokový systém
-na čistírně odpadních vod

Jako další rozdělení můžeme uvést přímé využití tepla z odpadní vody, využití tepla z vodovodního řádu a využití tepla z čističek odpadních vod [17].

2.1 Přímé využití tepla z odpadní vody

Podle statistik ohledně odběru teplé vody je většina energie pro ohřev vody v domácnostech využita pro úkony jako jsou sprchování a koupání (více než 60 %). Tyto vzniklé odpadní vody dosahují teploty kolem 35 °C. Po odtoku odpadních vod do kanalizace je ztracena i velká část tepelné energie. Pomocí rekuperace lze tuhle ztracenou energii využít k předehřátí studené vody, a tímto pak efektivně snížit spotřebu energie v objektu [17] [18].

Přibližně 30 % všech tepelných ztrát odchází z objektu odpadním potrubím. Použitím tepelných výměníků je možné téměř 40 % veškeré odpadní energie rekuperovat. V místě vzniku odpadní vody a v podstatě v místě spotřeby teplé vody má médium svou nejvyšší tepelnou energii [17] [18].

K rekuperaci tepla ze splaškové vody k přímému předehřevu teplé vody se navrhuje malé rekuperační systémy, jejichž hlavní částí je již zmiňovaný tepelný výměník. Navíc u decentralních systémů jejich provoz nevyžaduje tepelné čerpadlo, tudíž fungují bez dodání elektrické energie [17] [18].

K přenosu tepelné energie dochází vedením a prouděním.

- **Vedení tepla (kondukce) stěnou rekuperačního výměníku** [19]
Hodnota tepelného toku kondukcí je definována pomocí Fourierova zákona tepelné vodivosti. Výpočet je popsán rovnicí 2.1.

$$dq = -\lambda \cdot \frac{dt_{st}}{d\delta} \quad (2.1)$$

Kde q [W·m⁻²] měrný tepelný tok, prošlý za jednotku času jednotkovou plochou
 λ [W·m⁻¹·K⁻¹] tepelná vodivost,
 t_{st} [°C] teplota stěny,

δ [m] tloušťka stěny.

Při uvážení homogenity materiálu, stacionárního vedení tepla a konstantní tepelné vodivosti platí pro jednorozměrové vedení tepla:

Pro rovinnou stěnu platí:

$$\dot{Q} = S \cdot \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta t_{st} \quad (2.2)$$

kde \dot{Q} [W] tepelný tok stěnou,

S [m^2] teplosměnná plocha,

Δt_{st} [$^{\circ}C$] rozdíl teplot na povrchu stěn.

Pro válcovou stěnu je tepelný tok dán rovnicí:

$$\dot{Q} = S_R \cdot \frac{2 \cdot \lambda}{d_2 \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot \Delta t_{st} \quad (2.3)$$

kde d_1 [m] vnitřní průměr trubky,

d_2 [m] vnější průměr trubky,

S_R [m^2] referenční teplosměnná plocha = plocha vnějšího povrchu válce.

Pro jednoduchou tepelnou stěnu je tedy tepelný odpor

$$R_{st} = \frac{\delta}{\lambda} \quad (2.4)$$

Pro válcovou stěnu pak

$$R_{st} = \frac{d_2}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (2.5)$$

Tepelného odporu se s výhodou využívá při výpočtu vedení tepla složenou stěnou, kdy platí

$$R_{st} = \sum_{j=1}^n R_j = \sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j} \quad (2.6)$$

Velikost tepelné vodivosti λ lze najít ve fyzikálních tabulkách. Typické hodnoty tepelné vodivosti vybraných materiálů jsou v tabulce 2.

Tab. 2 Velikost tepelné vodivosti pro různé materiály [19]

Materiál	λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
Polyuretan	0,031
Minerální vata	0,045
Pevný nános	1–2
Nerez ocel	15–30
Uhlíkatá ocel	50
Mosaz	120
Hliník	230
Měď	380

Při provozu se však vytváří na výhřevné ploše nánosy, které mají nízkou teplotní vodivost a ztěžují tak vedení tepla.

- **Prouděním tepla (konvekce)**

Pro určení tepla Q a součinitele prostupu tepla U je potřebné určit součinitele přestupu tepla obou pracovních látek α_1 a α_2 . Hodnotu těchto součinitelů nelze najít v tabulce, tím pádem je nutné provést jejich výpočet. Součinitel přestupu tepla je závislý na druhu tekutiny (plyn, kapalina, pára), typu proudění (nucené, přirozené), rychlosti w a charakteru proudění (laminární, turbulentní), tvaru a rozměrech teplosměnných stěn (průměr d nebo délka l), teplotě stěny t_{st} a vlastnostech tekutiny (teplotě t , tlaku p , hustota ρ , měrném teple c_p , tepelné vodivosti λ , dynamické viskozitě η). V případě sdílení tepla nucenou konvekcí, což se u výměníků nejčastěji využívá, má kritériální rovnice podobu:

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (2.7)$$

kde	Nu	[-]	Nusseltovo číslo,
	Re	[-]	Reynoldsovo číslo,
	Pr	[-]	Prandtlovo číslo.

C , m a n jsou konstanty dle tabulky 3.

Tab. 3 Konstanty C , m , n v závislosti na případě [19]

Případ	Obor platnosti	C	m	n
Rovná deska	$Re < 5 \cdot 10^5$	0,664	0,5	0,33
Rovná deska	$5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$	0,037	0,8	0,33
Vodorovný válec	$50 < Re < 10^4$	0,6	0,5	0,31
Koule	$10^2 < Re < 10^6$	0,37	0,6	0,33
Svazek příčně obtékaných hladkých trubek	$2 \cdot 10^3 < Re < 4 \cdot 10^4$	0,33	0,6	0,33
Laminární průtok kanálem	$Re < 2,3 \cdot 10^3$	-	-	-
Turbulentní průtok kanálem	$7 \cdot 10^3 < Re$	0,023	0,8	0,4
Deskový výměník	$2 \cdot 10^2 < Re < 3 \cdot 10^5$	0,1	0,7	0,4

Pro laminární průtok je hodnota Nusseltova čísla 3,66, pokud je povrchová teplota konstantní. V opačném případě je $Nu = 4,36$.

Z definice Nusseltova čísla vychází vztah pro součinitele přestupu tepla:

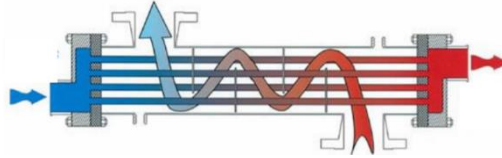
$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{l} \quad (2.8)$$

kde l [m] délka potrubí.

Pro využití tepla z odpadních vod se používá rekuperační výměník bez změny skupenství teplotnosných látek. Základním typem rekuperačních výměníků je plášťový výměník nebo trubka v trubce.

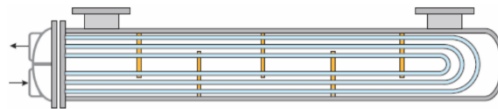
2.1.1 Plášťový výměník

Plášťový výměník obsahuje svazek trubek, které jsou pokryty pláštěm. Těmito trubkami proudí studená čistá voda. Odpadní voda předává tepelnou energii studené vodě přes stěny trubek, které představují teplosměnnou plochu, jak lze vidět na obrázku 2.1 [20].



Obr. 2.1 Přenos tepla plášťovým výměníkem [20]

Při větším rozdílu teplot mezi teplosměnným médiem a proudící kapalinou může dojít k popraskání uchycení trubek v čelní ploše výměníku. Aby se popraskání předešlo rozdíl teplot by neměl být větší než 50 °C. Děje se to z důvodu rozdílné roztažnosti kovů. Tohle lze eliminovat teplotním kompenzátorem na plášti výměníku nebo teplosměnnými trubkami ve tvaru U (obrázek 2.2). Tvar trubek do U dovoluje trubkám se nezávisle roztahovat [20].



Obr. 2.2 U-trubkový plášťový výměník [20]

Značnou nevýhodou U-trubkového výměníku je jeho údržba. Proto trubkami můžou proudit pouze relativně čisté kapaliny, které netvoří inkrustace. Pro zefektivnění procesu bývají v mezitrubkovém prostoru výměníku instalovány různé druhy přepážek [20].

Pro reálnou instalaci do domácnosti existují dva typy výměníků. Jedná se o wagner solar ecoshower: shower tray (obrázek 2.3), wagner solar ecoshower: shower drain (obrázek 2.4.). Jejich princip fungování a vlastnosti jsou totožné, liší se pouze montáží [21] [22].



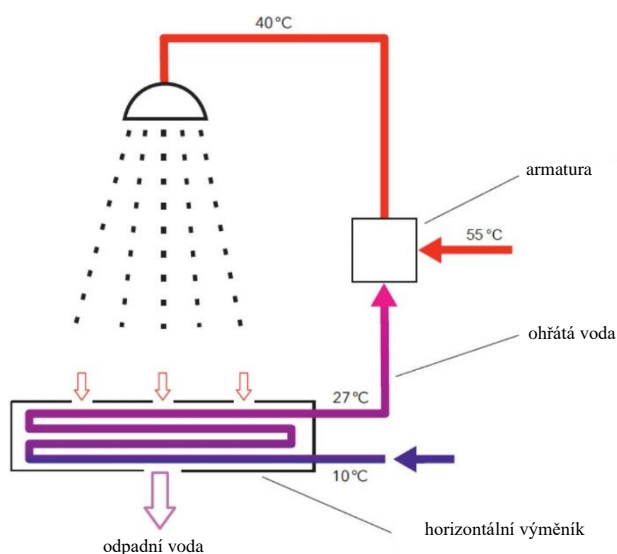
Obr. 2.3 Horizontální výměník - Shower tray [21]



Obr. 2.4 Horizontální výměník - Shower drain [22]

- **Wagner solar ecoshower: shower drain a tray**

Jedná se o dvouplášťové horizontální tepelné výměníky buď se žlábkem (obrázek 2.4) nebo s vaničkou (obrázek 2.3). Dva pláště mají z důvodu normy ČSN EN 1717³. Pod nerezovým krytem se nachází nerezový rozdělovací plech s malými dírkami. Tyto dva díly do sebe zapadají a vytváří sifon, který je dobře dostupný pro údržbu rovnou ze sprchového koutu. Tím pádem není nutné sifon instalovat dále na odtoku. Rozdělovací plech odpadní vodu rozprostře a dírkami voda kape na měděný výměník. Tahle odpadní voda předehtřívá vodu čistou, která proudí protiproudem ve směru od spodu vzhůru v měděném výměníku. Výměník ve vodě neleží, jedná se jen o tenký film a díky tomu je zajištěna nejvyšší možná účinnost pro tyto typy horizontálních zařízení [21] [22].



Obr. 2.5 Schéma celého průběhu výměny tepla [21]

Celý proces začíná v čase, kdy se spustí sprcha. Teplá voda ze sprchy odtéká do kanalizace. Mezi sprchou a odtokem je instalován výměník, který je napojen na armaturu⁴ na studenou stranu a zároveň na kotel⁵. Předehtřívá voda o odpadní vodu proudí do sprchové hlavice z výměníku i z kotle. Díky tomu se sníží množství teplé vody, které je potřeba na sprchování. Protože studená voda nemá 10 °C, jak bývá obecně, ale má 27 °C. Teplá voda v zásobníku se tedy nemusí ohřívát z 10 °C, ale z 27 °C na potřebných 55 °C. A to zajišťuje úsporu spotřeby teplé vody až o 50 %. Nespotebuje se tedy již zmíněných 44 l na osobu a den, ale už jen polovinu. Čtyřčlenná rodina tak za rok ušetří až 1200 kWh [21] [22].

- Výhody: jednoduchá instalace
- Účinnost: 54 % stacionární (po ustálení na 27 °C)
44 % dynamická (počítá se i s náběhem cca 6 minut sprchy)
- Cena: 1180 € + DPH / 29 500 Kč + DPH (nerezový žlábek v ceně) [21] [22]

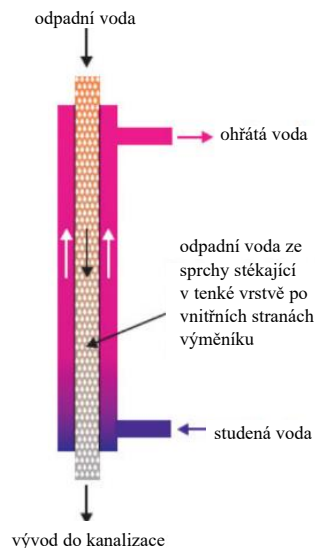
³ Evropská norma 1717 nařizuje ochranu proti znečištění pitné vody ve vnitřních vodovodech a všeobecné požadavky na zařízení na ochranu proti znečištění zpětným průtokem [35].

⁴ Armatura je pojmenování pomocných prvků potrubí, zde má význam jako vodovodní baterie.

⁵ nebo na jakýkoliv jiný zdroj tepla podle toho, co je v domě nainstalováno.

2.1.2 Trubka v trubce

Výměník tepla trubka v trubce se skládá ze dvou trubek, kde vnitřní trubka je vsunuta do trubky vnější. Velikost systému se tak výrazně redukuje a systém tak přináší vysokou efektivitu. K výměně tepla dochází mezi proudem odpadní vody (30–38 °C) a proudem čisté studené vody (10 °C), která cirkuluje v kovové trubce. Oproti plášťovému výměníku je tenhle výměník účinnější v důsledku rychlejšího proudění. A tím tak dochází k lepšímu přestupu tepla. Navíc vyšší rychlost proudění omezuje tvorbu inkrustací. Princip výměny tepla je znázorněn na obrázku 2.6 [20].



Obr. 2.6 Vertikální výměník - Trubka v trubce [23]

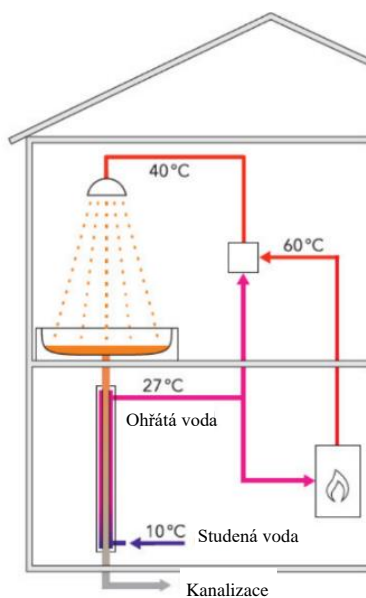
Hojně využívaným typem vertikálního výměníku při reálných instalacích je wagner solar ecoshower: shower pipe [23].



Obr. 2.7 Vertikální tepelný výměník – Shower pipe [23]

- **Wagner solar ecoshower: shower pipe**

Jak již bylo zmíněno, jedná se o vertikální tepelný výměník. Stěna mezi pitnou a odpadní vodou je dvouplášťová z důvodu normy ČSN EN 1717, která zakazuje jednoplášťový styk mezi odpadní vodou a pitnou vodou. Rozměry výměníku sice šetří místem, ačkoliv jeho náročnější instalace je vhodná pouze jen za určitých podmínek. Nutná je existence dostatečného místa pod sprchou. Proto tento typ není vhodný do bytových domů, kde takový zásah není možné provést [23].



Obr. 2.8 Proces výměny tepla [23]

Pod sprchou na odtok odpadní vody je instalován výměník. Ve stejnou chvíli, kdy se člověk sprchuje, odtéká voda odpadní a přitéká voda pitná. Vnitřním potrubím ve výměníku proudí odpadní voda ze sprchy a díky Kondo efektu⁶ se nalepí na stěny potrubí. V protiproudu vnějším plášťem proudí voda pitná o teplotě 10 °C, která přichází z vodovodního řádu z podzemí a ta se předeheje odpadní vodou na 27 °C díky protiproudému principu. Tahle ohřátá voda se dál napojuje na armaturu na zdroji tepla [23].

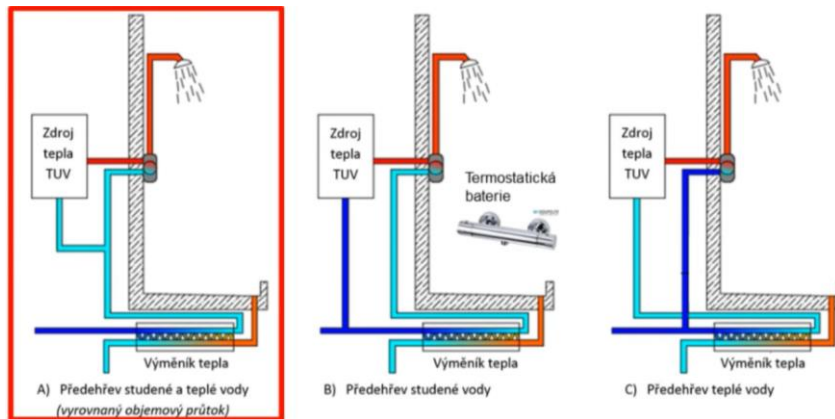
Technické parametry pro tenhle typ jsou [23]:

- Napojení: přes šroubování
- Výhody: možnost napojení více sprch
- Účinnost: 66 % stacionární (po ustálení na 27 °C)
54 % dynamická (počítá se i s náběhem cca 6 minut sprchy)
- Cena: 466 € + DPH / 11 650 Kč + DPH

⁶ Kondo efekt popisuje rozptýl vodivých elektronů v kovu v důsledku magnetických nečistot, což vede k charakteristické změně elektrického odporu s teplotou [36].

2.1.3 Možnosti zapojení decentrálních výměníků

Účinnost výše uvedených typů výměníků je také podmíněna způsobem zapojení. Předehřevem studené i teplé vody se dosáhne nejvyšší účinnosti. Další možností je přehřátí pouze studené vody. V takovém případě je nejvhodnější instalace termostatické baterie. Účinnost pro tuhle možnost se však sníží o 18 až 25 % oproti první variantě. Možný je také předehřev pouze teplé vody. Účinnost je stejná jako u předehřevu pouze studené vody [24].



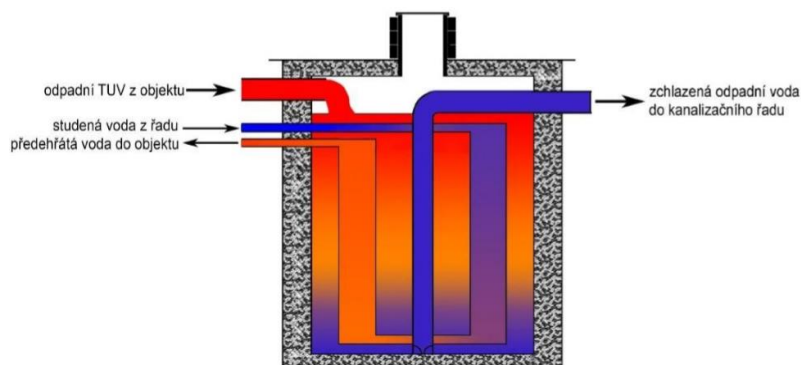
Obr. 2.9 Možnosti zapojení decentrálních výměníků tepla [24]

2.1.4 Akiretherm

Nádrž nerezového rekuperačního výměníku akiretherm tvoří kruhová dvouplášťová nádoba, která se skládá z vnější a vnitřní nádoby. Tyto nádoby jsou vzájemně vystředěné ve vertikální ose. Mají dvojité dno a víko. Meziprostor je vyplněn tepelně izolačním materiálem. Konstrukce nádoby splňuje statické podmínky pro osazení do terénu s obsypem. Umístění může být uvnitř objektu nebo vně objektu, přičemž montáž uvnitř objektu je vhodná pouze při rekonstrukci nebo do novostaveb [25].

Odpadní voda je svedena do výměníku z domácnosti. Ve výměníku se teplo předá studené vodě. Zásobník teplé vody má objem 360 l. Odpadní voda zbavená tepelné energie je odvedena do kanalizačního systému. Celý systém pracuje bez čerpadel a tudíž má nulovou spotřebu vlastní energie, vše funguje na principu hydraulických parametrů [25].

- Účinnost: 78,8 %
- Životnost: odhadováno 40-50 let [25]



Obr. 2.10 Řez rekuperačním výměníkem akiretherm s teplotním rozvrstvením [25]

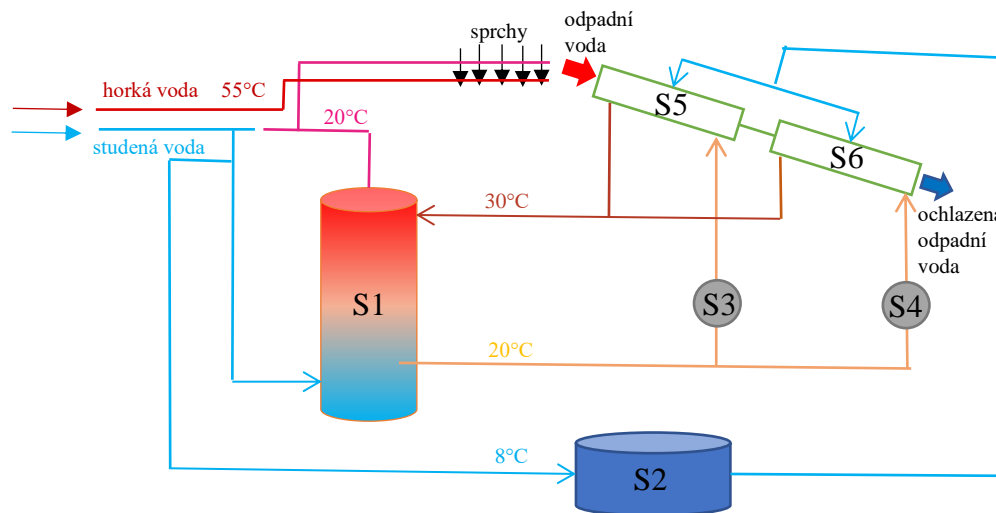
2.1.5 Pro velké objekty

Jsou zpravidla umístěovány centrálně. Tyhle výměníky nejsou pasivní, tudíž je nutné připojit tepelné čerpadlo. Dále budou popsány tři typy centrálních výměníků určených pro větší objekty jako jsou wellness centra, sport centra, prádelny, pivovarnictví, nemocnice, hotely aj. [26].

- **Fercher AWT-928: Robust heat exchanger [26]**

Jedná se o horizontální typ tepelného výměníku, který byl instalován ve sportovní a wellness centru ve městě Anykščiai v Litvě. Výměník byl napojen na bazén, vířivku, saunu, hydromasážní vany, sprchy (20 ks) a umyvadla (8 ks). Měření probíhalo v náhodně vybraný týden. Počet návštěvníků se denně pohyboval mezi 100 až 270.

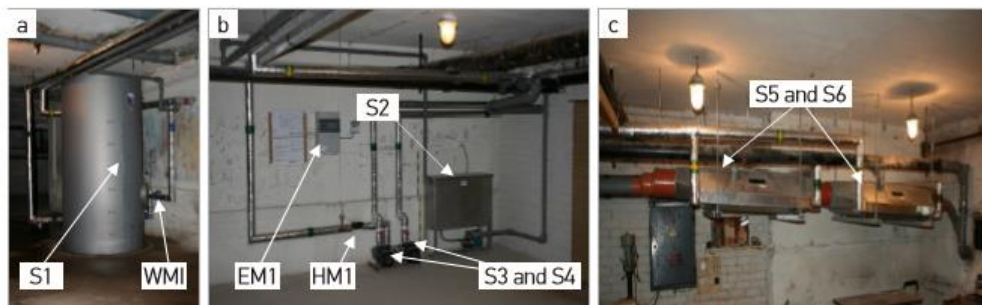
Teplá odpadní voda z těchto zařízení odtéká samostatně vyčleněným potrubím, které je připojeno ke dvěma výměníkům tepla odpadní vody (FERCHER typ AWT-928). Pro větší účinnost byly zapojeny do série. Po přenosu tepla je studená odpadní voda odváděna do městských kanalizačních sítí.



Obr. 2.11 Proces systému s výměníky Fercher typ AWT-928 [26]

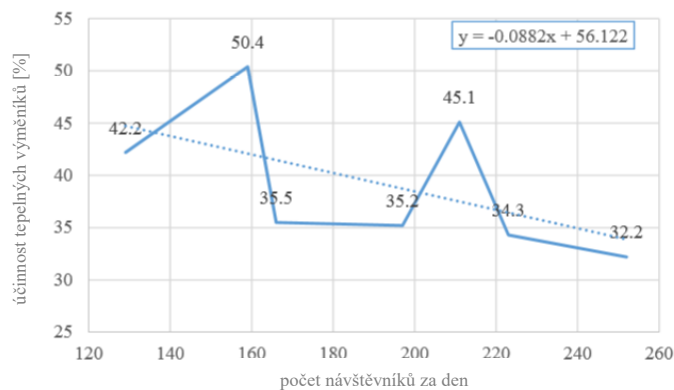
Teplo z odpadních vod je přeneseno pomocí oběhového čerpadla do akumulární nádrže, která má objem 1490 l (S1). V jiném okruhu je přiváděna studená voda do akumulární nádrže, kde se zahřívá přibližně na 20 °C a poté proudí do zařízení wellness centra, kde se mísí s okruhem horké vody. Cirkulační čerpadla (S3, S4) jsou připojena k ovládací skříni, která je nakonfigurována pro zapnutí oběhových čerpadel pouze tehdy, když rozdíl mezi teplotou teplé odpadní vody a vody v zásobních čerpadlech není nižší než 3 °C. Za účelem zvýšení účinnosti je připojena 150l vodní nádrž (S2), která slouží k proplachování výměníků.

Voda, která přichází do topného systému, je registrována v měřiči studené vody (WM1). Pro zaznamenání množství tepla shromážděného v tomto systému byl nainstalován měřič tepla (HM1). Elektroměr (EM1) shromažďuje údaje o spotřebě elektřiny oběhových čerpadel.



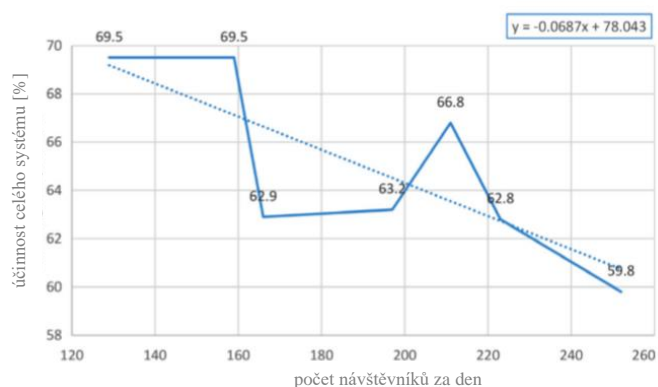
Obr. 2.12 Reálná instalace systému ve wellness centru ve městě Anykščiai [26]

Všechny měřené body byly vyhodnoceny za účelem výpočtu účinnosti výměníků tepla odpadní vody samostatně a jako celý systém. Bylo zjištěno, že účinnost se snižuje, když se zvyšuje počet návštěvníků. To ukazuje, že u většího počtu návštěvníků vyšší průtoky odpadní vody odtékají prostřednictvím tepelných výměníků a pak výměníky tepla odpadní vody vyměňují méně tepla do akumulární nádrže. Průměrná denní efektivita závislosti tepelného výměníku odpadní vody na počtu návštěvníků je znázorněna na obrázku 2.13.



Obr. 2.13 Účinnost výměníku v závislosti na počtu návštěvníků [26]

Kromě toho byla vyhodnocena účinnost celého systému, což je popsáno v grafu na obrázku 2.14.



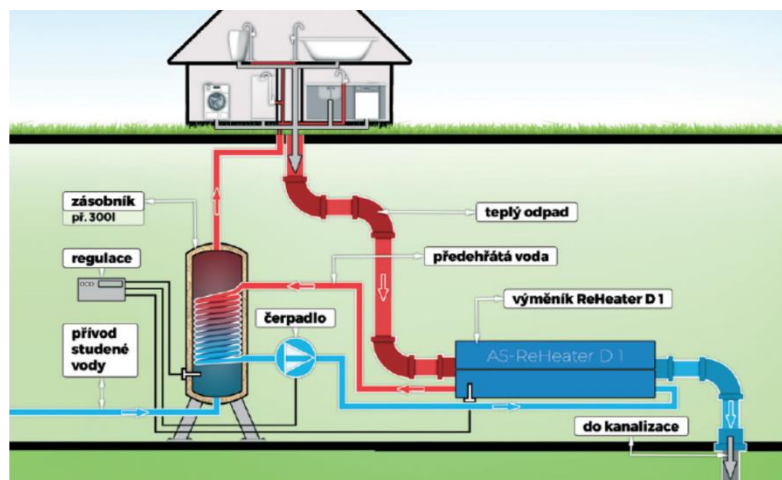
Obr. 2.14 Účinnost celého systému v závislosti na počtu návštěvníků [26]

Výsledky tohoto experimentu ukazují, že tepelná účinnost celého systému výměníků tepla odpadní vody (59,9 %) je vyšší než tepelná účinnost samostatných výměníků tepla odpadní vody (32,2–50,4 %) [26].

Energie potřebná pro ohřev studené vody (20 °C) ze systému výměníku tepla odpadní vody je 61,96 kWh. Energie potřebná pro ohřev studené vody (8 °C) ze systémů výměníku tepla odpadní vody je 116,79 kWh. To ukazuje, že tepelné výměníky odpadní vody pomáhají šetřit až 53 % energie potřebné k ohřevu vody [26] [27].

- **Deskový AS-ReHeater**

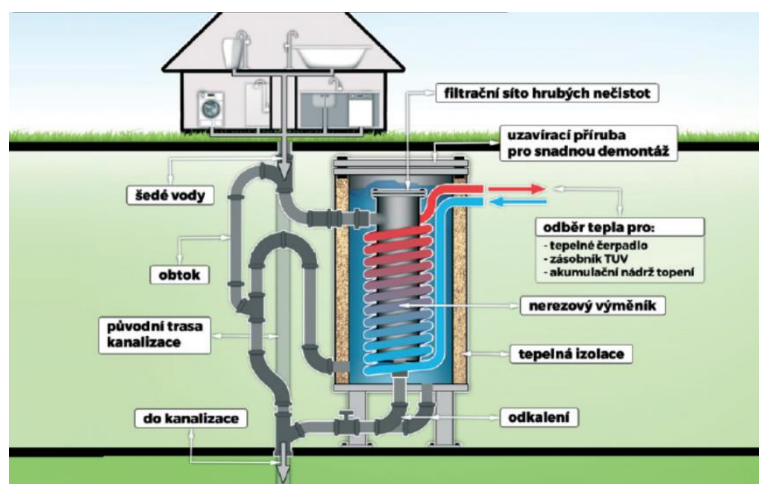
Teplá odpadní voda ze všech zařízení je odvedena do deskového tepelného výměníku. Ochlazená odpadní voda odchází do kanalizace. Přes zásobník a čerpadlo je studená pitná voda přivedena do výměníku tepla, kde se předehřeje. Předehřátá voda z výměníku se vrací zpět do zásobníku a odtud je využita pro odběr zpět do zařízení [28].



Obr. 2.15 Schéma zapojení rekuperačního jednotky AS-ReHeater D1 obrázek [28]

- **Spirálový AS-ReHeater**

Teplá šedá voda ze zařízení odtéká přes filtrační síto, kde se zbavuje hrubých nečistot. Kolem nádoby, ve které je shromážděna odpadní voda zbavena velkých nečistot, je instalován spirálový výměník tepla. Ve výměníku dochází k přenosu tepla čisté vodě, která je pak odebrána do tepelného čerpadla a následně využita k dalším účelům. Jako může být třeba vytápění budovy [28].



Obr. 2.16 Schéma zapojení rekuperačního jednotky AS-ReHeater S1 [28]

2.2 Využití odpadního tepla z kanalizace

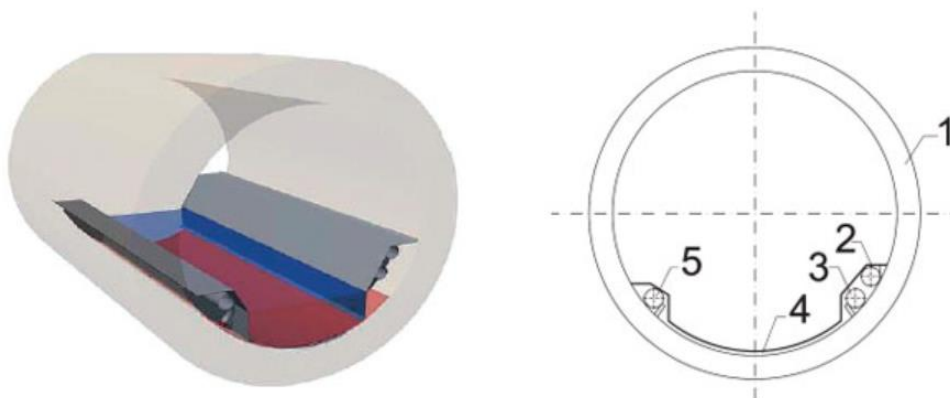
Nesmírnou výhodou využití odpadního tepla z kanalizace je způsobilost užívání výměníků pro všechny typy odpadních vod. Druh výměníku a jeho způsob montáže ve vodovodním řádu je závislý na typu kanalizačního systému. Některé typy výměníků se dají vhodně vložit do již existujícího potrubí. Zbylé je možné osadit jen do nových potrubích. Pro instalaci výměníků tepla jsou rozhodující parametry kanalizačního systému. Lze je osadit dvěma způsoby. První možnost je osazení k horní hraně kanalizačního potrubí, což zajistí lepší dostupnost. Druhá možnost, kde osazení je provedeno do spodní části potrubí, bývá zvolena z ohledu výhodnější ceny. Podle způsobu instalace se výměníky rozdělují na [29] [30]:

- výměníky tepla vložené do kanalizačního potrubí,
- výměníky tepla integrované do betonové stěny kanalizačního potrubí,
- předizolované kanalizační potrubí s integrovaným ocelovým výměníkem tepla,
- externí ocelové dvoutrubkové výměníky tepla.

2.2.1 Výměníky tepla vložené do kanalizačního potrubí

Tenhle typ výměníku tepla umožňuje instalaci do nových i do již existujících potrubích. Poloha osazení se orientuje do spodní části potrubí nebo k horní hraně. Osazení k horní hraně potrubí umožňuje dobrou dostupnost pro vykonání revizí a kontrol. To má ale negativní dopad na finanční náročnost instalace [29].

Výměník vložený do kanalizačního potrubí bývá nejčastěji využíván pro odpadní splaškovou vodu. Funguje na principu odevzdávání tepla přes teplosměnnou plochu výměníku (4). Přívod studené vody do výměníku (2) je umístěn vedle rozdělovacího potrubí (3). Podle osové souměrnosti kanalizačního potrubí je umístěn výstup ohřáté vody z výměníku (5). Zmiňované tři potrubí jsou instalována pod výměník tepla (obrázek 2.17) [29].



Obr. 2.17 Ocelový výměník tepla vložený do kanalizačního potrubí [29]

Jako materiál výměníku tepla se používá nerez nebo měď. Přívodní a vratné potrubí se vyrábí z nerez, mědi nebo PE. Délka segmentu má v rozmezí 1 až 3 m. Teplota odpadní vody se pohybuje okolo 13 °C. Teplota přívodní studené vody při vstupu do výměníku je 6 °C. Stykové plochy výměníku po obvodu kanalizačního potrubí svírají úhel 120° [29].

Pro různé průměry potrubí byly naměřené rozdílné tepelné výkony na vytápění. Přehled hodnot v tabulce 4 [29].

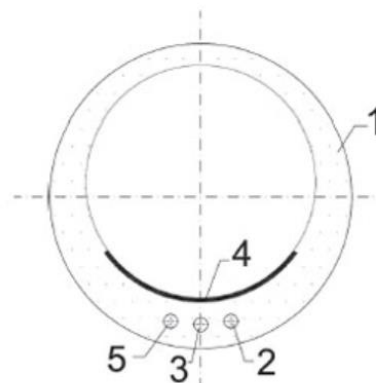
Tab. 4 Závislost průměru potrubí na tepelný výkon u ocelového výměníku tepla [29]

Průměr potrubí [mm]	Tepelný výkon na vytápění [kW/m]
1200	3,2
1400	3,7
1600	4,2
1800	4,8
2000	5,3

2.2.2 Výměníky tepla integrované do stěny kanalizačního potrubí

Tenhle systém nelze modifikovat do již existujícího kanalizačního potrubí. Možnost použití se tedy omezuje na nové potrubí. Integrovaný výměník do stěny se vyznačuje špatnou přístupností při revizích a kontrolách, což se považuje za nepříznivé. Avšak rychlá výstavba a to, že výměník neubírá na průměru kanalizačního potrubí patří mezi výhody [29].

Prívod studené vody do výměníku (2), rozdělovací potrubí (3) a výstup teplé vody z výměníku (5) jsou vestavěné do betonové trubky kanalizace (1). Výměník tepla (4) je integrovaný do vnitřní stěny kanalizačního potrubí (obrázek číslo 2.18) [29].

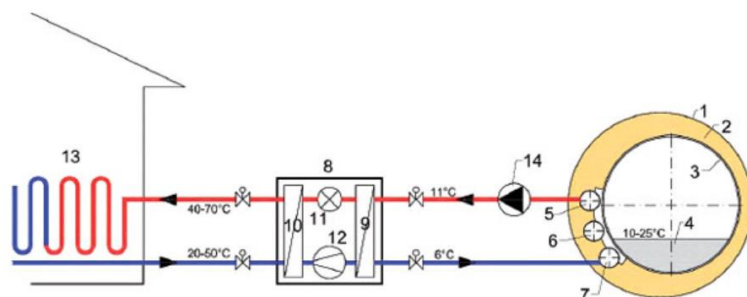


Obr. 2.18 Integrovaný výměník tepla ve stěně betonové kanalizační trubky [29]

2.2.3 Předizolované kanalizační potrubí s integrovaným výměníkem tepla

Výměník lze integrovat pouze do nově vyrobeného předizolovaného kanalizačního potrubí. Systém je považován za variabilní díky možnosti instalace pod zem nebo ven. Zdroj tepelné energie zastupují komunální a průmyslové odpadní vody. Využitelnost nachází jak u gravitačních, tak i tlakových systémů [29].

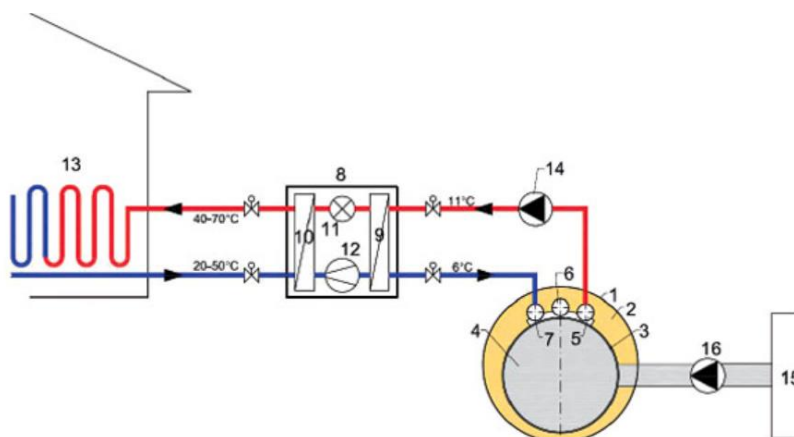
U gravitačních systémů jsou distribuční potrubí umístěna na boku ocelového kanalizačního potrubí. Důležitým parametrem pro přenos tepla je výška hladiny odpadní vody neboli průtok odpadní vody. Schéma zapojení předizolovaného kanalizačního potrubí je znázorněno na obrázku 2.19 [29].



Obr. 2.19 Schéma zapojení předizolovaného kanalizačního potrubí s integrovaným výměníkem tepla: gravitační systém [29]

Do kanalizačního potrubí, které má uvnitř integrovaný výměník tepla, je odváděna odpadní voda o teplotě 10–25 °C. Jedním z distribučních potrubí (7) je přiváděna studená voda o teplotě 6 °C do výměníku tepla. Následně je převedena přes rozdělovací potrubí (6), kde se částečně předeheje, do dalšího distribučního potrubí (5), které slouží jako výstup ohřáté vody z výměníku. Ohřátá voda o teplotě 11 °C proudí do tepelného čerpadla (8). V tepelném čerpadle přechází přes výparník (9) a expanzní ventil (11) do kondenzátoru (10). Z kondenzátoru ohřátá voda na 40 °C odchází do systému vytápění budov (13) [29].

U tlakových systémů jsou distribuční potrubí umístěna u horní hrany kanalizačního potrubí.



Obr. 2.20 Schéma zapojení předizolovaného kanalizačního potrubí s integrovaným výměníkem tepla: tlakový systém [29]

Odpadní voda je přiváděna do kanalizace přes čerpadlo (16) do kanalizačního potrubí s integrovaným potrubím (3). Mezi vnějším pláštěm z polyethylenu (1) a potrubím je vložena vrstva tepelné izolace (2). U horní hrany kanalizačního potrubí je umístěn přívod studené vody (7), rozdělovací potrubí (6) a výstup ohřáté vody z výměníku (5). Studená voda proudí přes tepelné čerpadlo (8). V tepelném čerpadle prochází přes kondenzátor (10) a kompresor (12) do výparníku (9). Odtud přechází do distribučních potrubí, kde se předeheje přes výměník (3). Předeheřtá voda proudí čerpadlem (14) zpět do tepelného čerpadla. Poté, co se ohřeje na požadovanou teplotu v kondenzátoru, proudí do zařízení (13), kde je využita [29].

Samotné dvouplášťové kanalizační potrubí tvoří teplosměnnou plochu. Teplo se odevzdá přes tepelnou izolaci distribučnímu potrubí. Jako materiál výměníku tepla se používá nerez. Vnější plášť se skládá z tepelné izolace a obal z PE. Délka segmentu měří v rozmezí 2 až 6 m. Teplota odpadní vody dosahuje hodnot v rozmezí 10–25 °C. Teplota přívodní studené vody při vstupu do výměníku má 6 °C [29].

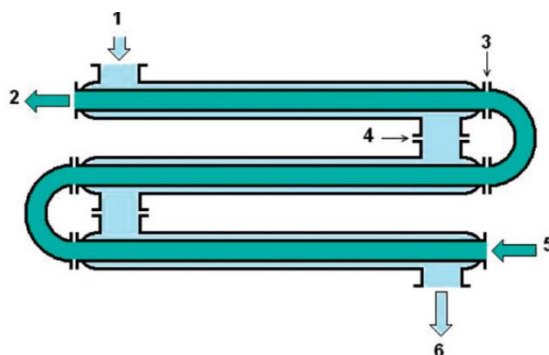
Pro gravitační a tlakový systém byly naměřeny rozdílné tepelné výkony na vytápění v závislosti na průměru potrubí. Viz tabulka 5 [29].

Tab. 5 Závislost průměru potrubí na tepelný výkon u předizolovaného potrubí [29]

Průměr potrubí [mm]	Tepelný výkon na vytápění [kW/m]	
	Gravitační systém	Tlakový systém
200	0,6	1,6
400	1,1	3,2
600	1,6	4,8
800	2,1	6,3
1200	3,2	-

2.2.4 Externí ocelové dvoutrubkové výměníky tepla

Jak název napovídá výměník se skládá ze dvou potrubí, obsahujících příruby (3, 4), vložených do sebe, kde vnitřním potrubím proudí voda odpadní, což je zdroj tepla (obrázek 2.21). Vstupující čistá voda (1) pak proudí v meziprostoru, který je mezi vnitřním a vnějším potrubím. Teplo z přivádějící odpadní vody (5) se odevzdává čisté vodě přes stěnu vnitřního potrubí. Ochlazená odpadní voda je odvedena do kanalizace (2) a ohřátá pitná vystupuje ven z výměníku (7) k dalšímu využití [29].



Obr. 2.21 Schéma externího protiproudého dvoutrubkového ocelového výměníku tepla [29]

Výhodou speciálního dvoutrubkového potrubí je využití pro odpadní vody, které obsahují pevné částice. Proto je systém vhodný pro šedé i černé vody. Instalace výměníku není přímo do potrubního systému, ale mimo něj, pro je nazýván výměníkem externím. Je nutné připojení čerpadla nebo akumulární nádrže, přes kterou by se odpadní voda přečerpala [29].

Jako materiál výměníku tepla se používá nerez. Délka segmentu má v rozmezí 3 až 6 m. Teplota odpadní vody má okolo 13 °C. Teplota přívodní studené vody při vstupu do výměníku disponuje 10 °C [29].

2.3 Využití odpadního tepla v ČOV

V poslední době je kladen čím dál větší důraz na zefektivnění stabilizace kalů. Důvodem je jak přísnější legislativa vzhledem k přítomnosti specifických polutantů a patogenů, tak možnost zlepšení energetické bilance čištění odpadních vod a také snaha o minimalizaci finálního množství kalu [14] [15].

Hlavní typy kalů, které se objevují při čištění odpadní vody z ČOV [12]:

- **Primární kal:** usaditelné látky v surové odpadní vodě obsahující 2,5–5 % sušiny.
- **Aktivovaný (přebytečný) kal:** přebytečná biomasa obsahující 0,5–1,5 % sušiny.
- **Chemický kal:** z chemického srážení fosforu.

Obecná rovnice pro růst biomasy v systému s aktivovaným kalem je [12]:

$$P_x = Y \cdot S_r \quad (2.9)$$

kde P_x [kg sušiny·den⁻¹] produkce biomasy za den,
 Y [kg sušiny·kg⁻¹ BSK₅⁷ odbouraného] růstový koeficient aktivovaného kalu,
 S_r [kg BSK₅ odbouraného·den⁻¹] odbourání substrátu.

Mezi nejvíce efektivní způsoby zpracování kalů patří přeměna na bioplyn a následné jeho spalování. Získá se tak značné množství tepelné energie, která může být následně využita. Úplná stabilizace kalu se navrhuje kompostováním, spalováním, tepelnou, chemickou, nebo radiační úpravou [12].

Na čistírně se vyprodukovaný kal částečně stabilizuje aerobní a anaerobní úpravou. U čistíren do velikosti 10 000 EO⁸ se dává přednost aerobní stabilizaci, u větších čistíren anaerobní stabilizace (vyhňování). Ostatní způsoby stabilizace kalu jsou výjimečné a navrhuje se podle údajů výrobců příslušných strojních zařízení [12].

Aerobní stabilizace

V otevřených nádržích dochází ke stabilizaci kalu. Působením vzdušného kyslíku a příslušných bakterií se rozkládají organické látky a vzniká oxid uhličitý a voda. Energie z kalu se přemění na teplo. Tohle teplo se uvolňuje do okolí. Nelze ho technologicky využít. Technologie je investičně i provozně méně nákladná, než je anaerobní stabilizace, a proto je vhodná spíše pro menší ČOV [13].

Anaerobní stabilizace

Na ČOV se využívá technologie mokré stabilizace. Tahle technologie se skládá z více fází. Hydrolyza, acidogeneze, acetogeneze a metanogeneze. Při těchto dějích se směsná kultura mikroorganismů rozkládá bez přístupu vzduchu organické látky přítomné v kalech a odpadních vodách a souhrně se označují pojmem metanizace [13].

⁷ BSK₅ je průměrná hodnota znečištění odpadních vod v g·m⁻³ [37].

⁸ EO je uměle zavedená jednotka, která se používá pro návrh potřebné kapacity čistíren odpadních vod pro konkrétní území. Jeden EO odpovídá průměrnému množství 120-150 litrů odpadních vod za den a znečištění 60 g BSK₅ za den [37].

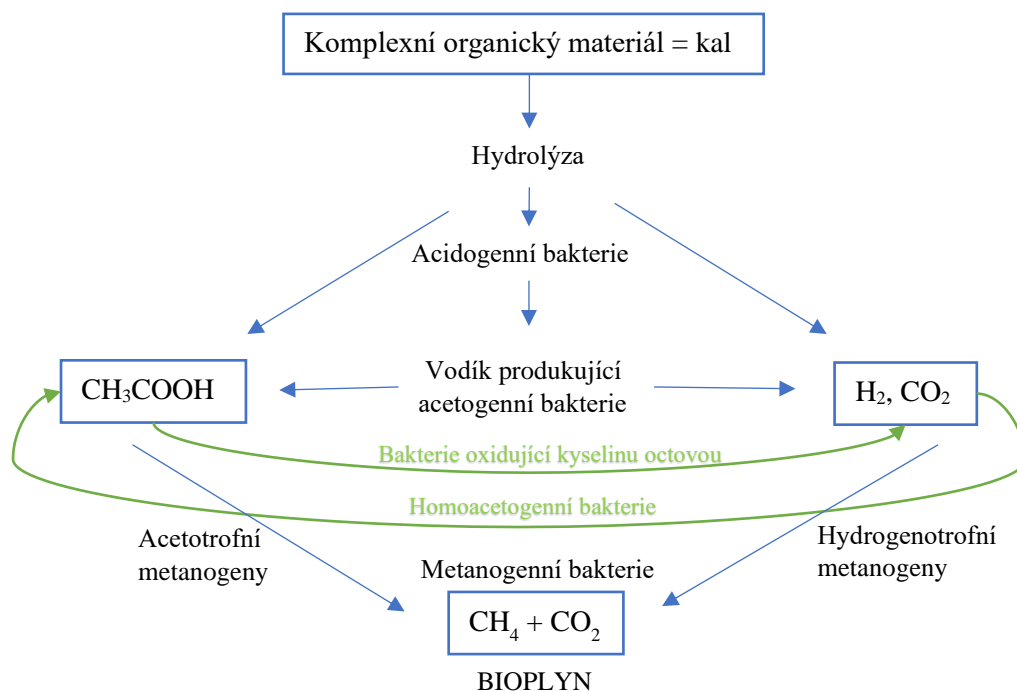
Z hlediska teplotního režimu rozlišujeme metanizaci [12]:

- **Psychrofilní** při 5–27 °C
- **Mezofilní** při 27–45 °C
- **Termofilní** při 45–60 °C

V ČR se převážně provozuje metanizace mezofilní.

Kal v první fázi metanizace podléhá hydrolýze, což znamená že vysokomolekulární rozpuštěné i nerozpuštěné organické látky (polysacharidy, lipidy, proteiny) se rozkládají na nízkomolekulární látky rozpustné ve vodě. Konečnými produkty hydrolytického rozkladu jsou monosacharidy, glycerol, vyšší mastné kyseliny a aminokyseliny [12] [13].

Tyto sloučeniny podléhají dalšímu rozkladu v ději zvaném acidogeneze. V této fázi dochází k rozkladu pomocí acidogenních bakterií na jednoduché organické látky, hlavně na nižší mastné kyseliny, alkoholy, CO₂ a H₂. Následně se odstraní zbytky vzdušného kyslíku a vytvoří se zde anaerobní prostředí. Tento pochod je také znám jako kyselé kvašení. Třetí fáze metanizace, acetogeneze, se zabývá tvorbou kyseliny octové, vodíku a CO₂ acetogenními bakteriemi. V poslední fázi ve tvoří metan z kyseliny octové pomocí acetotrofních metanogenních bakterií a z jednoduhlíkatých substrátů, CO₂ a H₂ pomocí hydrogenotrofními metanogenními bakteriemi. Tento děj se nazývá metanogeneze. Konečnými produkty anaerobní stabilizace jsou vzniklá biomasa, stabilizovaná organická hmota, NH₄⁺, CO₂, H₂S, H₂ a N₂. Celý princip procesu je znázorněn na obrázku 2.22 [12] [13].



Obr. 2.22 Princip metanogeze [13]

2.3.1 Energie z bioplynu

Bioplyn vzniká vyhníváním organických látek v bioplynových stanicích. Nejčastěji je pak spalován v kotlích, kde dochází k přeměně na tepelnou energii, která se pak používá na vytápění budov nebo k ohřevu vody. Možná je též kombinovaná výroba elektrické energie v kogenerační jednotce [12] [13].

Složení bioplynu se odvíjí od složení surového kalu. Při nejlepších podmínkách dosahuje bioplyn 65–75 % CH₄, 25–35 % CO₂ a malé množství H₂ a N₂, popřípadě i H₂S. Rozhodující je množství obsažených tuků a sacharidů a bílkovin. Nejvíce plynu vzniká vyhníváním tuků v kalu, méně pak ze sacharidů a nejméně z bílkovin. Pokud je obsah tuků vysoký, tak z 1 kg rozloženého kalu lze vyvinout 1 až 1,2 m³ plynu. Dalším důležitým faktorem, který rozhoduje o množství vytvořeného plynu, je teplota vyhnívání. Ze surového kalu městských čistíren lze očekávat tyto produkce při různých teplotách, viz tabulka číslo 6 [12] [13].

Tab. 6 Závislost teploty na produkci plynu [12]

Teplota [°C]	10	15	20	25	30
Produkce [m ³ kg ⁻¹]	0,45	0,53	0,61	0,71	0,76

Bioplyn se řadí díky své výhřevnosti (18–25 MJm⁻³), která je způsobena vysokým obsahem metanu, mezi ušlechtilé zdroje energie [12] [13].

2.3.2 Energie z bioplynu metodou aerotherm

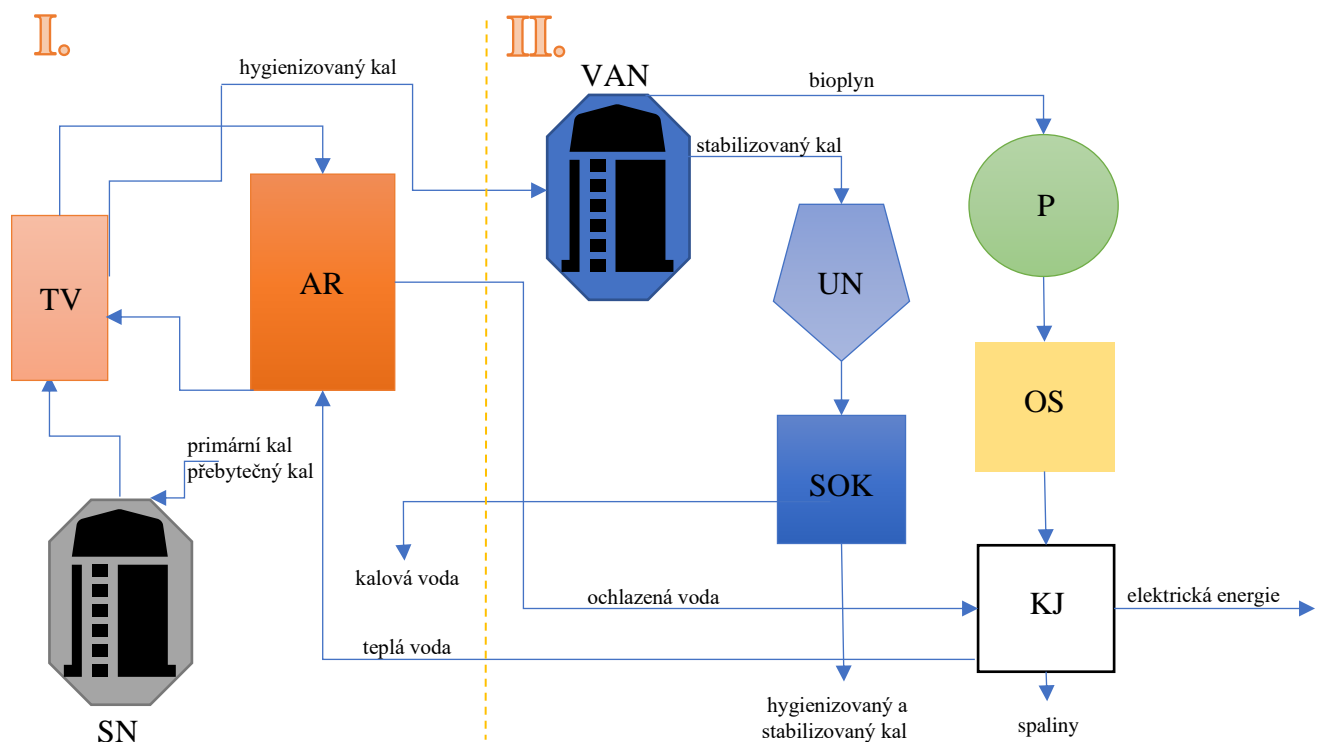
Skládá se z aerothermní hygienizace a částečné anaerobní stabilizace kalu. Tato metoda pracuje s neodvodněným kalem, který má obsahu sušiny 5–6 %. Při menším obsahu sušiny než 2,5 %, je nutné předřadit zahušťovací zařízení [31].

Celý proces metody aerotherm je popsán na obrázku 2.23.

Surový kal vstupuje nejdříve do tepelného výměníku (TV), kde se přehřeje a poté vstupuje do aerothermního reaktoru (AR), kde probíhá samotná rozkladná exothermní reakce. Kal je v reaktoru zahříván na teplotu 60–65 °C pomocí topné vody dodávané do topného pláště reaktoru z plynové nebo jiné kotelny nebo z kogenerační jednotky (KJ). Takto ohřátý kal odchází přes tepelný výměník, kde dojde k zchlazení kalu, do vyhnívací anaerobní nádrže (VAN). V této fázi končí tzv. aerobní část, kde je odbouráno 5 až 10 % organické hmoty kalu. Zbytek organické hmoty je odbourán ve vyhnívací nádrži. Tam také dochází k úplné anaerobní stabilizaci, při které vznikne bioplyn a stabilizovaný kal [31].

Bioplyn je přiveden přes plynojem (P) do stádia odsíření (OS). V kogenerační jednotce (KJ) se z bioplynu vytvoří elektrická energie [31].

Stabilizovaný kal prochází přes usazovací nádrž (UN) a následně dojde ke strojnímu odvodnění kalu (SOK). V konečné fázi odtéká kalová voda a je odveden hygienizovaný a stabilizovaný kal. Odpadní vzduch vznikající při procesu je zbaven zápachu v pachovém filtru [31].



Obr. 2.23 Proces vzniku elektrické energie metodou aerotherm [31]

- **Tepelná bilance vyhřívací nádrže [12]**

Vyhřívací nádrže lze vyhřívat přímo nebo nepřímo. Teplo je spotřebováno k ohřevu kalu a na vyrovnání ztrát únikem přes plášť vyhřívací nádrže.

Pro dvě vyhřívací nádrže, které mají průměr $d = 21 \text{ m}$ a výšku $h = 21 \text{ m}$, množství kalu $Q_k = 671 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$ a produkce plynu $Q_p = 6000 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$ při venkovní teplotě v zimním období $t_v = -10 \text{ }^\circ\text{C}$, teplotě půdy v zimním období $t_p = 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota kalu na přítoku do vyhřívací nádrže $t_k = 8 \text{ }^\circ\text{C}$.

Plochy nádrží:	stěny	$S_1 = 2 \cdot 1385 \text{ m}^2$,
	strop	$S_2 = 2 \cdot 346 \text{ m}^2$,
	dno	$S_3 = 2 \cdot 346 \text{ m}^2$.

Potřeba tepla k ohřevu kalu:	množství kalu	$Q_k = 671 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}$,
	měrné teplo kalu	$4,2 \cdot 10^6$,
	teplota vyhřívací nádrže	$t_n = 33 \text{ }^\circ\text{C}$,
	rozdíl teplot	$\Delta t = t_n - t_k = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$Q = Q_k \cdot 4,2 \cdot 10^6 \cdot \Delta t = 671 \cdot 4,2 \cdot 10^6 \cdot 25 = 70 \cdot 10^9 \text{ J} \cdot \text{den}^{-1} \quad (2.10)$$

Výpočet ztrát:	součinitel přestupu tepla pro stěny a strop	$\alpha_s = 0,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$,
	součinitel přestupu tepla pro dno	$\alpha_d = 0,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$,
	počet sekund za den	86 400 s.

$$\text{Stěny a strop } 0,5 \cdot 1731 \cdot (33 - (-10)) \cdot 86\,400 = 3,2 \text{ GJ} \cdot \text{den}^{-1} \quad (2.11)$$

$$\text{Dno } 0,9 \cdot 346 \cdot (33 - 5) \cdot 86\,400 = 0,75 \text{ GJ} \cdot \text{den}^{-1} \quad (2.12)$$

$$\text{Celkem } 3,95 \text{ GJ} \cdot \text{den}^{-1}$$

$$\text{Pro dvě nádrže } 7,9 \text{ GJ} \cdot \text{den}^{-1}$$

Vyhřívání s bioplynem:	výhřevnost	$22\,400 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$,
	účinnost	85 %.

$$\text{Spotřeba plynu: } \frac{1}{0,85} \cdot \frac{70 \cdot 10^9 + 8 \cdot 10^9}{22,4 \cdot 10^6} = 4100 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}. \quad (2.13)$$

$$\text{Produkce plynu: } 6000 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}.$$

$$\text{Spotřeba pro vytápění vyhřívací nádrže: } 4100 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}.$$

$$\text{Zbývá pro další využití: } 1900 \text{ m}^3 \cdot \text{den}^{-1}.$$

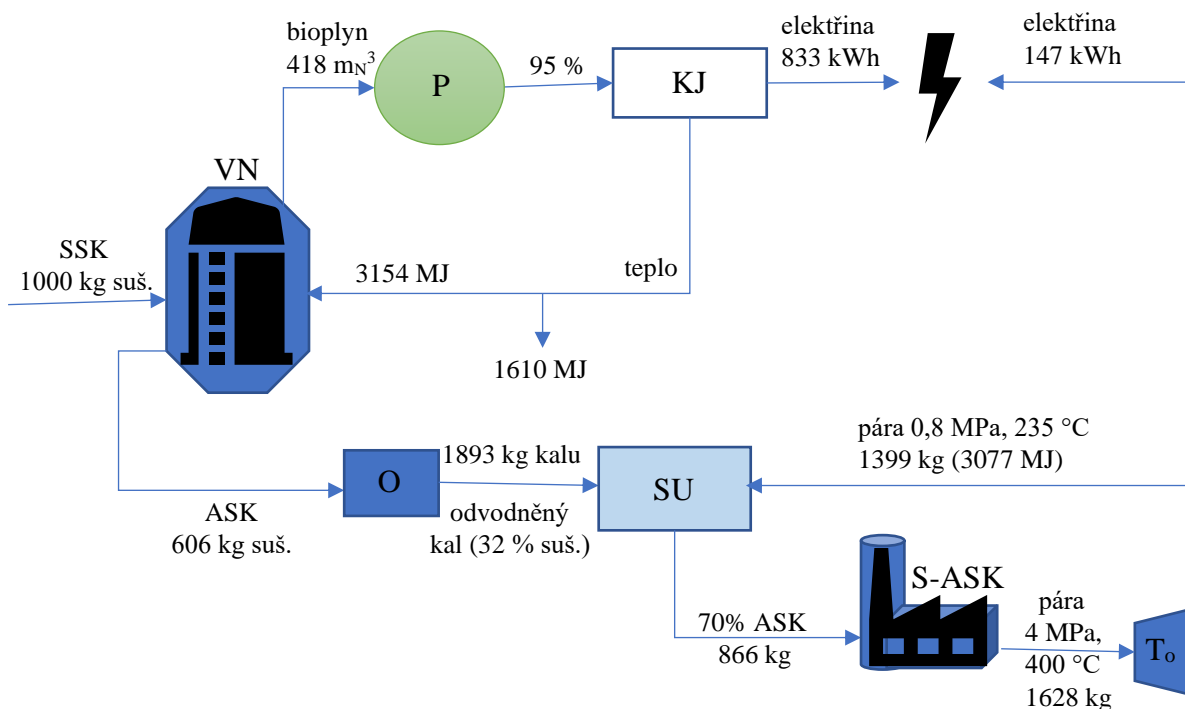
2.3.3 Energie z bioplynu anaerobní stabilizací

Technologie využívající vyhnílý kal pro výrobu bioplynu. Z vyhnílého kalu vzniká pomocí výše popsané anaerobní stabilizace bioplyn, který se pak stává primárním zdrojem elektrické energie. Jako sekundární zdroj zde vystupuje další část vyhnílého kalu, který je spalován [13].

Pro lepší pochopení technologie je na obrázku 2.24 zobrazeno schéma principu. 1000 kg surového kalu (SSK) je přivedeno do vyhnívací nádrže (VN). Ve vyhnívací nádrži dochází ke vzniku dvou produktů – energeticky bohatý bioplyn a vyhnílý kal. Bioplyn o velikosti 418 m³ prochází přes plynojem (P), ve kterém ztratí 5 % svého objemu, do kogenerační jednotky (KJ). Ta přemění bioplyn na elektrickou energii a teplo, které se částečně využije na provoz vyhnívací nádrže a zbytek se uvolní do okolí [13].

606 kg vyhnílého kalu je přivedeno z vyhnívací nádrže do odstředivky (O), která vyprodukuje 1893 kg odvodněného kalu. V sušárně (SU), se z odvodněného kalu stane 866 kg sedmdesátiprocentního vyhnílého kalu, který dále putuje do spalovny vyhnílého kalu (S-ASK). Vzniklá pára o teplotě 400 °C a hmotnosti 1628 kg se v parní turbíně (T_o) přemění na 147 kWh elektrické energie a zbylá pára se ochladí na 235 °C a je zpětně využita v sušárně [13].

Celkový zisk elektrické energie tak činí 980 kWh [13].

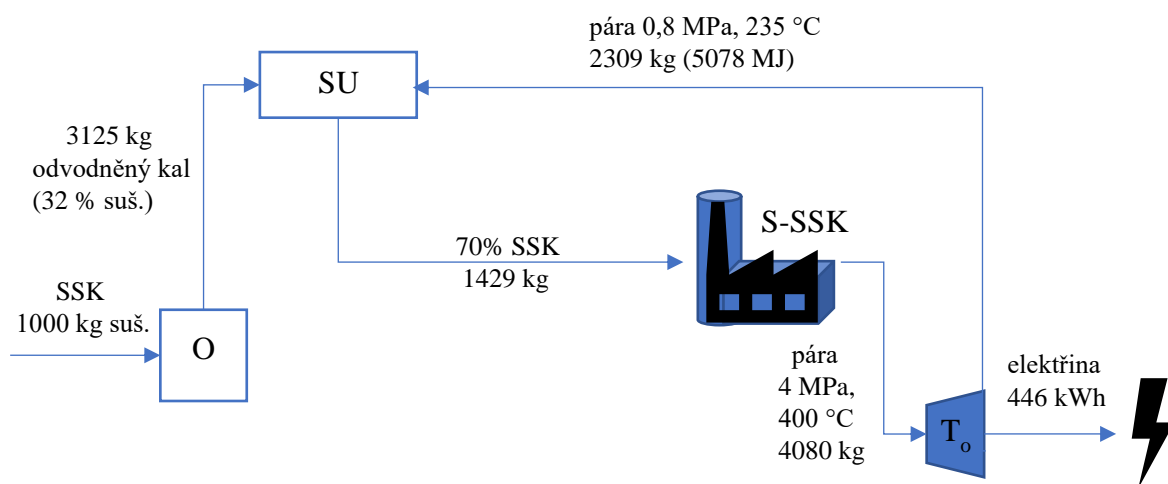


Obr. 2.24 Proces získávání elektrické energie [13]

2.3.4 Přímé spalování surového kalu

Použití technologie sušení a spalování surového kalu. Přímým spalováním surového kalu nevzniká bioplyn. Na druhou stranu kal vstupující do spalovacího procesu je energeticky bohatší. Schéma celého procesu je zobrazeno na obrázku 2.25 [13].

1000 kg surového kalu (SSK) je přivedeno do odstředivky (O), která ho přemění na 3125 kg odvodněného kalu s obsahem 32 % sušiny. Tenhle odvodněný kal se následně suší v sušárně (SU) na sedmdesáti procentní surový kal o hmotnosti 1429 kg, který se poté přesune do spalovny surového kalu (S-SSK). Spálením vznikne 4080 kg páry o teplotě 400 °C, která se v parní turbíně (T_o) přemění v elektrickou energii o velikosti 446 kWh. Zbylá pára klesne na 235 °C a je využita v sušárně kalů [13].



Obr. 2.25 Proces získávání elektrické energie metodou přímého spalování surového kalu [13]

3 Zhodnocení systémů k rekuperaci tepla z odpadních vod

3.1 Zhodnocení přímého využití tepla z odpadní vody

3.1.1 Výměníky v domácnostech

Porovnání výměníků v domácnosti dle účinnosti viz tabulka. Tahle účinnost je ovlivňována množstvím a teplotou odpadní vody [20].

Tab. 7 Výměníky používané v domácnostech [21] [22] [23]

Typ výměníku	Účinnost	Cena
Ecoshower drain/tray	54 %	29 500Kč + DPH
Ecoshower pipe	66 %	11 650Kč + DPH
Akiretherm	78,8 %	99 250Kč

Negativním faktorem, který nastává během běžného provozu, je tvorba nánosů na výhřevné ploše. Snižují tak teplotní vodivost a ztěžují vedení tepla [19].

Z ekonomického hlediska lze využít dotace „zelená úsporám“⁹. U decentralních výměníků lze dosáhnout jednorázové dotace 5000 Kč a u centrálních výměníků až 15 000 Kč. Další ekonomickou výhodou je, že tyto výměníky jsou pasivní, tudíž není třeba jim dodávat elektrickou energii [24].

3.1.2 Výměníky pro větší objekty

Efektivita je ovlivněna množstvím a teplotou odpadní vody. Jedinečnost konstrukce spočívá v tom, že odpadní voda nevyžaduje před vstupem do výměníku žádné čištění, filtraci nebo jakoukoliv další úpravu, což celý proces rekuperace značně zlevňuje. Výměníky těchto typů nepracují bez pomoci čerpadel, tudíž je nutné dodávat elektrickou energii [26] [28].

Tab. 8 Výměníky využívány ve velkých objektech [26] [28]

Typ výměníku	Tepelná účinnost
Fercher AWT-928 jednotlivě	32,2 až 50,4 %
Fercher AWT-928 zapojení dvou do série	59,87 až 69,5 %
Deskový AS-ReHeater	20 až 60 %
Spirálový AS-ReHeater	20 až 60 %

Z výzkumu bylo dokázáno že účinnost klesala, když se zvyšoval počet návštěvníků. Další komplikací je zamrznutí, ke kterému může dojít dosáhne-li venkovní teplota méně než -15 °C. Správným temperováním lze docílit řádného fungování jednotky [26] [32].

⁹ Zelená úsporám je rozsáhlý program poskytující dotace pro energetické úspory. Tento program je pod záštitou Ministerstva životního prostředí ČR spravovaný Státním fondem životního prostředí [38].

3.2 Zhodnocení kanalizačních systémů

Při návrhu zpětného získávání tepla z kanalizačních sítí je velmi důležitá spolupráce projektanta se správcem kanalizace, který musí být v této oblasti dostatečně vzdělaný. Bohatší a pozitivní zkušenosti s nimi už mají v západní Evropě (Německo, Švýcarsko apod.), kde se tyto systémy realizují s největším úspěchem. U nás je prozatím realizace méně četná. V tabulce 9 je porovnán tepelný výkon na vytápění. Pro každý typ výměníku byla vybrána jeho největší možná dosažená hodnota tepelného výkonu [29] [33].

Tab. 9 Kanalizační systémy [29]

Typ	Tepelný výkon na vytápění [kW/m]
Vložen do kanalizačního potrubí	5,3
Předizolovaný gravitační	2,1
Předizolovaný tlakový	6,3

3.3 Zhodnocení ČOV

Nejefektivnější z výše uvedených metod se ukázaly technologie využívající anaerobní stabilizaci. Perspektivnost technologií využívajících anaerobní stabilizaci je dána její ekologickou, energetickou a ekonomickou výhodností. Anaerobní zpracování odpadních vod změnilo pohled na kaly. Kaly se tak stávají energetickou surovinou, protože produkuje při dostatečné koncentraci vod relativně velké množství bioplynu. Toto množství přeměněné na energii pokrývá energetické potřeby na čištění vod včetně aerobního dočištění, a ještě může energeticky dotovat samotný chod ČOV. Tepelné nároky na vyhřívání vyhnívacích nádrží jsou počítány pro zimní období, kdy jsou nejvyšší. Protože se jedná o elektrinu z bioplynu je možné za ni získat různé dotace z programu „zelená úsporám“, což se pozitivně projeví na samotné ekonomice ČOV [12] [13] [31] [34].

Množství produkce bioplynu je závislé i na kvalitě odpadní vody. U průmyslových odpadních vod je tedy energetický zisk menší než u vod komunálních. U metody Aerotherm, kde přicházející surový kal je ohříván teplým kalem odcházejícím z tepelného výměníku, významně snižuje objem vyhnívacích nádrží relativně vysoký obsah sušiny v kalu. Zahuštěním kalu je možno zvýšit výkon u stávajících nádrží až o 100 % [12] [13] [31].

Při porovnání dalších dvou metod z hlediska produkce elektrické energie vztažené na 1 tunu sušiny vstupujícího surového kalu se dosáhne rozdílných hodnot. V technologii obsahující anaerobní stabilizaci, sušení a spalování zisk energie činí 980 kWh (přibližně 23 % energie obsažené ve vstupním kalu). Zatímco přímým spalováním pouze 446 kWh (přibližně 10 % energie obsažené ve vstupním kalu) [13].

Moderního kalového hospodářství je zaměřeno především na mechanické zahušťování přebytečného aktivovaného kalu, jeho předúpravu, termofilní anaerobní stabilizaci kalu, odvodňování stabilizovaného kalu a jeho alternativní využití v zemědělství, nebo termické zpracování s cílem maximální produkce energie. Provozní zavedení jednotlivých ČOV závisí na lokálních a ekonomických podmínkách [34].

ZÁVĚR

Práce byla napsána za účelem osvěty v oblasti rekuperace tepla z odpadních vod. V první části práce byla popsána problematika odpadních vod, která obsahovala rozdělení těchto vod podle charakteru znečištění. Největší energetický potenciál má komunální šedá voda. Druhá část práce byla zaměřena na přehled možností, jak rekuperovat teplo z odpadních vod. Nejekologičtější možnost představovaly výměníky tepla pro domácnosti, protože fungují na principu hydraulických parametrů, a tak nemají potřebu přísunu elektrické energie. Pro větší objekty je stále vysoká ekonomická výhodnost. Za ekologickou možnost je nemůžeme považovat, protože je nutné připojení čerpadel, které ke svému chodu potřebují dodávat elektrickou energii. I přesto u obou typů můžeme čerpat dotace „zelená úsporám“. Jako další byl uveden přehled výměníků tepla umístěných do kanalizačního potrubí. Tyhle kanalizační systémy fungují efektivně pouze při správně zvoleném místě instalace. Pro malé vesnice je tahle metoda bezvýznamná, vhodnější je instalace ve větších městech. Posledním místem, kde může být odpadní voda využita pro získání tepelné energie je čistírna odpadních vod. Hlavní snahou čistíren je zpracování odpadních vod v podobě kalu. Snaha o efektivní čištění je dána každou čistírnou zvlášť. Každá má jiné podmínky a jinou kapacitu, a tak neexistuje jedna univerzální metoda, která by se stala nejvýhodnější možností pro všechny. Avšak ve většině případů se jeví jako nejefektivnější metody, které využívají anaerobní stabilizaci kalu. Navíc na tento proces je možné dostat dotaci „zelená úsporám“, což se pozitivně projeví po ekonomické stránce ČOV.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BINDZAR, Jan. *Základy úpravy a čištění vod*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2009. ISBN 978-807-0807-293.
- [2] AF MENDELU [online]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3405&typ=html
- [3] LANDA, Martin. Včasné varování. Rakousko testuje odpadní vody na koronavirus. *Tzbinfo.cz* [online]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/likvidace-odpadnich-vod/20601-vcasne-varovani-rakousko-testuje-odpadni-vody-na-koronavirus>
- [4] ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD JAKO NÁSTROJ K OCHRANĚ ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ V ZEMĚDĚLSKÉ PRAXI A NA VENKOVĚ [online]. Brno, 2007 Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/26962/cistení_odpadnich_vod.pdf. Metodika. Mendelova univerzita.
- [5] PLOTĚNÝ, Karel. RECYKLACE ŠEDÝCH VOD A JEJICH VYUŽITÍ. *Asio.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/999.recyklace-sedych-vod-a-jejich-vyuziti>
- [6] PLOTĚNÝ, Karel. Odpadní vody jako zdroj surovin. *Tzb.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/4955-odpadni-vody-jako-zdroj-surovin>
- [7] DRABINOVÁ, Silvie a David KUNSSBERGER. Druhy odpadních vod. *Poradme.se* [online]. Dostupné z: http://poradme.se/index.php/Druhy_odpadn%C3%ADch_vod
- [8] *Vodohospodářská zařízení II.* [online]. 2014 Dostupné z: http://hgf10.vsb.cz/546/VHZ2/3_odpadni_vody.html
- [9] ŠMEJKALOVÁ, Pavla a Aleš PÍCHA. Odpadní vody. In: *Vscht* [online]. Praha Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~pichaa/04-Odpadni%20vody/04-Odpadni%20vody-S6.pdf>
- [10] BODÍK, I. a P. RIDDERSTOLPE. *Udržitelná sanitace v zemích střední a východní Evropy*. Tisk GWP, 2007.
- [11] Cena vodného a stočného. *Pražské vodovody a kanalizace* [online]. Dostupné z: <https://www.pvk.cz/vse-o-vode/cena-vodneho-a-stocneho/>
- [12] HLAVÍNEK, Petr a Jiří HLAVÁČEK. *Čištění odpadních vod: praktické příklady výpočtů*. Brno: Noel 2000, 1996. ISBN 80-86020-00-2.
- [13] BEŇO, Zdeněk. *Recyklace: efektivní způsoby zpracování odpadů*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2011. ISBN 978-80-214-4240-5.
- [14] VOJTÍŠKOVÁ, Marie, Barbora ŠÁTKOVÁ a Pavel JENÍČEK. Postaerace anaerobně stabilizovaného kalu a její potenciální přínosy. *Vodní hospodářství*. 2019, **2019**(1), 1.
- [15] SVOBODOVÁ, Lucie, Martin TRUHLÁŘ a Tomáš LEDERER. Využití magnetického pole při intenzifikaci procesů biologického čištění odpadních vod. *Vodní hospodářství*. 2019, **2019**(10), 1.
- [16] DUFKA, Jaroslav. Ohřev teplé vody: Velikost a výkon ohřivačů a zásobníků na ohřev teplé vody. *Estav.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/5822.ohrev-teple-vody-velikost-zasobniku-na-ohrev-teple-vody>
- [17] VELIKOVSKÁ, Kristýna a Karel PLOTĚNÝ. Zpětné získávání tepelné energie z odpadní vody. *Energie 21*. **2019**(5), 24-25.
- [18] PLOTĚNÝ, Karel. Využití tepla z šedých vod k ohřevu TUV. *ASIO.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/630.vyuziti-tepla-z-sedych-vod-k-ohrevu-tuv>

- [19] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o. Brno, 2019. ISBN 978-80-214-5769-0.
- [20] *Výměníky tepla* [online]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/10%20VymenikyTepla.pdf. Učební texty. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem.
- [21] WAGNER SOLAR ECOSHOWER: SHOWER TRAY. *Aloaqua.wordpress.com* [online]. Dostupné z: <https://aloaqua.wordpress.com/wagner-solar-shower-tray-ecoshower/>
- [22] WAGNER SOLAR ECOSHOWER: SHOWER DRAIN. *Aloaqua.wordpress.com* [online]. Dostupné z: <https://aloaqua.wordpress.com/wagner-solar-ecoshower-shower-drain/>
- [23] WAGNER SOLAR ECOSHOWER: SHOWER PIPE. *Aloaqua.wordpress.com* [online]. Dostupné z: <https://aloaqua.wordpress.com/wagner-solar-ecoshower-shower-pipe/>
- [24] SCHULZE, Michael, Rainer PFLUGER a Pavel SEVELA. Zpětné získávání tepla z odpadní vody: Nejnovější trendy, Teorie a Praxe. In: *Pasivnidomy.cz* [online]. Dostupné z: http://2018.pasivnidomy.cz/wp-content/uploads/prezentace/303_Sevela.pdf
- [25] TECHNICKÉ PARAMETRY REKUPERAČNÍHO VÝMĚNÍKU. In: *Akire.cz* [online]. s. 3-6 Dostupné z: <https://www.akire.cz/domains/akire.cz/wp-content/uploads/2019/09/pokyny-pro-projektanty.pdf>
- [26] VAIČIŪNAS, Juozas, Valdemaras GELEŽIŪNAS a Rokas VALANČIUS. Analysis of Drain Water Heat Exchangers System in Wellness Center. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2016, **2016**(12), 15-23.
- [27] FERCHER AWT-928: ROBUST HEAT EXCHANGER. *Aloaqua.wordpress.com* [online]. Dostupné z: <https://aloaqua.wordpress.com/heat-recovery/fercher-heat-exchanger-928/>
- [28] VÝMĚNÍKY AS-REHEATER. *Asio.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/as-reheater-vymeniky>
- [29] PODOBEKOVÁ, Veronika a Jana PERÁČKOVÁ. Výměníky rekuperace tepla z kanalizačních systémů. *ASB.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/zdravotni-technika/vymeniky-rekuperace-tepla-z-kanalizacnich-systemu>
- [30] SEYBOLD, Christopher a Marten BRUNK. In-house waste water heat recovery. *REHVA Journal* [online]. 2013 Dostupné z: https://www.rehva.eu/fileadmin/REHVA_Journal/REHVA_Journal_2013/RJ_issue_6/P.18/18-21_Seybold_RJ1306.pdf
- [31] LYČKOVÁ, Barbora, Peter FEČKO a Radmila KUČEROVÁ. *Zpracování kalů: Stabilizace a hygienizace* [online]. Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/ZpracovaniKalu/stabilizace.html>. Učební text. Technická univerzita Ostrava.
- [32] Temperování. *Viessmann.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/temperovani.html>

- [33] BORSOS, Adrian. *SEWAGE WATER: INTERESTING HEAT SOURCE FOR HEAT PUMPS AND CHILLERS* [online]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/123320392/SEWAGE-WATER-INTERESTING-HEAT-SOURCE-FOR-HEAT-PUMPS-AND-CHILLERS>
- [34] DOHÁNYOS, Michal. Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. *Biom.cz* [online]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>
- [35] ČSN EN 1717: *Ochrana proti znečištění pitné vody ve vnitřních vodovodech a všeobecné požadavky na zařízení na ochranu proti znečištění zpětným průtokem* [online]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/normy/csn-en-1717-2002-04>
- [36] Kondo efekt. *Oclifescience.com* [online]. Dostupné z: <https://cs.oclifescience.com/1564707-kondo-effect>
- [37] REINBERK, Zdeněk. Výpočet počtu ekvivalentních obyvatel. *Tzb.cz* [online]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/151-vypocet-poctu-ekvivalentnich-obyvatel>
- [38] Zelená úsporám. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zelen%C3%A1_%C3%BAspor%C3%A1m

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
BSK_5	průměrná hodnota znečištění odpadních vod	$[g \cdot m^{-3}]$
d	průměr vyhnívací nádrže	$[m]$
d_1	vnitřní průměr trubky	$[m]$
d_2	vnější průměr trubky	$[m]$
h	výška vyhnívací nádrže	$[m]$
l	délka potrubí	$[m]$
Nu	Nusseltovo číslo	$[-]$
Pr	Prandtlovo číslo	$[-]$
P_x	produkce biomasy za den	$[kg \text{ suš.} \cdot \text{den}^{-1}]$
q	měrný tepelný tok	$[W \cdot m^{-2}]$
Q_k	množství kalu	$[m^3 \cdot d^{-1}]$
Q_p	produkce plynu	$[m^3 \cdot d^{-1}]$
q_{spec}	hodnota specifického množství odpadních vod	$[l \cdot \text{den}^{-1}]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
S	teplosměnná plocha	$[m^2]$
S_1	plocha stěny nádrže	$[m^2]$
S_2	plocha stropu nádrže	$[m^2]$
S_3	plocha dna nádrže	$[m^2]$
S_R	referenční teplosměnná plocha = plocha vnějšího povrchu válce	$[m^2]$
S_r	odbourání substrátu	$[kg \text{ BSK}_5 \cdot \text{den}^{-1}]$
t_k	teplota kalu na přítoku do vyhnívací nádrže	$[^\circ C]$
t_n	teplota vyhnívací nádrže	$[^\circ C]$
t_p	teplota půdy v zimním období	$[^\circ C]$
t_{st}	teplota stěny	$[^\circ C]$
t_v	venkovní teplota v zimním období	$[^\circ C]$
U	součinitele prostupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
Y	růstový koeficient aktivovaného kalu	$[kg \text{ suš.} \cdot kg^{-1} \text{ BSK}_5]$
Δt_{st}	rozdíl teplot na povrchu stěn	$[^\circ C]$
δ	tloušťka stěny	$[W]$
λ	tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
\dot{Q}	tepelný tok stěnou	$[m]$

Zkratka	Popis	Jednotka
AR	aerotermní reaktor	[-]
ASK	vyhnilý kal	[-]
CO ₂	oxid uhličitý	[-]
ČOV	čistírna odpadních vod	[-]
EM1	elektroměr	[-]
EO	počet ekvivalentních obyvatel	[-]
H ₂	vodík	[-]
H ₂ S	sulfan	[-]
HM1	měřič tepla	[-]
CH ₃ COOH	kyselina octová	[-]
KJ	kogenerační jednotka	[-]
N ₂	dusík	[-]
NH ₄ ⁺	amonium	[-]
O	odstředivka	[-]
OS	stádium odsíření	[-]
P	plynojem	[-]
PE	polyethylen	[-]
S1	akumulační nádrž	[-]
S2	vodní nádrž	[-]
S3	cirkulační čerpadlo	[-]
S4	cirkulační čerpadlo	[-]
S5	tepelný výměník FERCHER typ AWT-928	[-]
S6	tepelný výměník FERCHER typ AWT-928	[-]
S-ASK	spalovna vyhnilého kalu	[-]
SSK	surový kal	[-]
S-SSK	spalovna surového kalu	[-]
SU	sušárna	[-]
T _o	parní turbína	[-]
TV	tepelný výměník	[-]
UN	usazovací nádrž	[-]
VAN	vyhňivací anaerobní nádrž	[-]
VN	vyhňivací nádrž	[-]
WM1	měřič studené vody	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Průměrná spotřeba vody na obyvatele za den [4]	13
Obr. 1.2 Zdroje balastních vod [4]	14
Obr. 1.3 Závislost výkonu ohřívače na výstupní teplotě a množství odebírané vody [16]	16
Obr. 2.1 Přenos tepla plášťovým výměníkem [20]	20
Obr. 2.2 U-trubkový plášťový výměník [20]	20
Obr. 2.3 Horizontální výměník - Shower tray [21]	20
Obr. 2.4 Horizontální výměník - Shower drain [22]	20
Obr. 2.5 Schéma celého průběhu výměny tepla [21]	21
Obr. 2.6 Vertikální výměník - Trubka v trubce [23]	22
Obr. 2.7 Vertikální tepelný výměník – Shower pipe [23]	22
Obr. 2.8 Proces výměny tepla [23]	23
Obr. 2.9 Možnosti zapojení decentrálních výměníků tepla [24]	24
Obr. 2.10 Řez rekuperačním výměníkem akiretherm s teplotním rozvrstvením [25]	24
Obr. 2.11 Proces systému s výměníky Fercher typ AWT-928 [26]	25
Obr. 2.12 Reálná instalace systému ve wellness centru ve městě Anykščiai [26]	26
Obr. 2.13 Účinnost výměníku v závislosti na počtu návštěvníků [26]	26
Obr. 2.14 Účinnost celého systému v závislosti na počtu návštěvníků [26]	26
Obr. 2.15 Schéma zapojení rekuperační jednotky AS-ReHeater D1 obrázek [28]	27
Obr. 2.16 Schéma zapojení rekuperační jednotky AS-ReHeater S1 [28]	27
Obr. 2.17 Ocelový výměník tepla vložený do kanalizačního potrubí [29]	28
Obr. 2.18 Integrovaný výměník tepla ve stěně betonové kanalizační trubky [29]	29
Obr. 2.19 Schéma zapojení předizolovaného kanalizačního potrubí s integrovaným výměníkem tepla: gravitační systém [29]	30
Obr. 2.20 Schéma zapojení předizolovaného kanalizačního potrubí s integrovaným výměníkem tepla: tlakový systém [29]	30
Obr. 2.21 Schéma externího protiproudého dvoutrubkového ocelového výměníku tepla [29]	31
Obr. 2.22 Princip metanogeze [13]	33
Obr. 2.23 Proces vzniku elektrické energie metodou aerotherm [31]	35
Obr. 2.24 Proces získávání elektrické energie [13]	37
Obr. 2.25 Proces získávání elektrické energie metodou přímého spalování surového kalu [13]	38

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Složení odpadních vod [9]	15
Tab. 2 Velikost tepelné vodivosti pro různé materiály [19].....	18
Tab. 3 Konstanty C, m, n v závislosti na případu [19].....	19
Tab. 4 Závislost průměru potrubí na tepelný výkon u ocelového výměníku tepla [29]	29
Tab. 5 Závislost průměru potrubí na tepelný výkon u předizolovaného potrubí [29]	31
Tab. 6 Závislost teploty na produkci plynu [12]	34
Tab. 7 Výměníky používány v domácnostech [21] [22] [23]	39
Tab. 8 Výměníky využívány ve velkých objektech [26] [28].....	39
Tab. 9 Kanalizační systémy [29].....	40