



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

# ZÍSKÁVÁNÍ CELULÓZY Z MĚSTSKÝCH ODPADNÍCH VOD A JEJÍ ENERGETICKÉ VYUŽITÍ

EXTRACTING CELLULOSE FROM URBAN WASTEWATER AND ENERGY REUSE

## DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dipl.-Ing. Denisa Djordjevićová,  
MSc

## ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA

BRNO 2024

## ABSTRAKT

Celulóza je hojná organická sloučenina s vysokým energetickým potenciálem. V odpadních vodách se celulóza vyskytuje ve formě vláken z toaletního papíru. V západoevropských zemích Evropské unie se ročně spotřebuje až 15 kg toaletního papíru na osobu. Buničina z toaletního papíru, která končí na čistírně odpadních vod, tvoří 30 až 50 % nerozpuštěných látek obsažených v primárním čistírenském kalu. Separace celulózové frakce na primárním stupni čištění přispívá ke zlepšení celkového procesu čištění odpadních vod a tedy snižuje zatížení nerozpustnou organickou frakcí biologického stupně čištění odpadních vod a kalového hospodářství.

V rámci své teoretické části výzkumu jsem se zaměřila na popis současných metod získávání celulózy z toaletního papíru, která se vyskytuje v primárním kalu městských splaškových odpadních vod a představuje energeticky atraktivní zdroj. Separace celulózy z odpadních vod směřuje k výrobě recyklovaných zdrojů a obnovitelné energie z bioenergetických zdrojů jako jsou biopalivo z biomasy, bioetanol a bioplyn. V praktické části disertační práce jsem se věnovala způsobu získání celulózy z přítoku odpadní vody na městské čistírně odpadních vod proséváním přes jemná síta s průlinami 0,3 mm. V rámci zpracování procesu bylo nutné primární celulózový kal gravitačně odvodnit a následně solárně usušit. Z připravené filtrační hmoty byly udělány celulózové pelety stlačením získaného celulózového kalu na požadovanou velikost. Pro určení energetické hodnoty celulózových pelet a možností jejich energetického znovupoužití byla použita technologie středně teplotní pyrolýzy. Proces zahrnoval pyrolýzu celulózových pelet na teplotě mezi 500 až 650 °C nad mezí termické stability přítomných organických látek v celulózových peletách. Během tohoto procesu docházelo k štěpení vazeb vysokomolekulárních látek na nízkomolekulární produkty. Při tomto termickém zpracování celulózového kalu pyrolýzou vznikly tři produkty: pevný uhlíkatý produkt, pyrolýzní olej a pyrolýzní plyn.

Jedním z hlavních cílů disertační práce bylo definovat možnosti získávání celulózových vláken na přítoku na městských čistírnách odpadních vod. Dalším cílem disertační práce bylo určit potenciál materiálové transformace celulózových vláken a posoudit jejich energetické využití pomocí technologií středně teplotní pyrolýzy. V rámci možných instalací byl dále posouzen vliv separace celulózových vláken na biologický stupeň čištění odpadní vody a na kalové hospodářství.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Čištění odpadních vod, mechanické předčištění, recyklace celulózy, pyrolýza, pevný uhlíkatý produkt

## ABSTRACT

Cellulose is an abundant organic compound with high energy potential. In wastewater, cellulose occurs in the form of toilet paper. In the Western European countries of the European Union, up to 15 kg of toilet paper per person is consumed annually. The pulp of toilet paper that ends up at the sewage treatment plant makes up 30 to 50 % of the insoluble substances contained in the primary sewage sludge. The separation of the cellulose fraction in primary wastewater treatment contributes to the overall improvement of the wastewater treatment process, consequently reducing the load on the biological treatment stage and improving sludge management.

As part of my theoretical research, I focused on description of existing methods of extracting cellulose from toilet paper, that is found in the primary sludge of sewage wastewater and represents an energetically attractive resource. The separation of cellulose from wastewater can lead to the production of recycled resources and renewable energy from bioenergy sources such as biofuel from biomass, bioethanol and biogas. In the practical part of my dissertation, I focused on obtaining cellulose from the inflow of wastewater at a municipal wastewater treatment plant by sieving through fine screens with openings of 0.3 mm. Gravity dewatering and solar drying were required for the primary cellulose sludge during the processing. From the prepared filter mass, cellulose pellets were prepared by compressing the obtained cellulose sludge to the required size. Medium-temperature pyrolysis technology was used to determine the energy value of cellulose pellets and the possibilities of their energy reuse. The process involved heating cellulose pellets to a temperature between 500 and 650°C above the thermal stability limit of the organics present in the cellulose pellets. During this process, the bonds of high-molecular substances were split into low-molecular products. During the thermal processing of cellulose sludge by pyrolysis, three products were obtained: a solid carbonaceous product, pyrolysis oil and pyrolysis gas.

One of the aims of this dissertation was to define the possibilities of obtaining cellulose fibers at the inflow of municipal wastewater treatment plants. Another goal of the dissertation was to determine the potential of material transformation of cellulose fibers and assess their energy utilization using medium-temperature pyrolysis technologies. As part of the possible installations, the influence of the separation of cellulose fibers on the biological stage and sludge management of wastewater treatment was assessed.

## KEYWORDS

Wastewater treatment, mechanical pretreatment, cellulose recycling, pyrolysis, solid carbonaceous product

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DJORDJEVIĆOVÁ, Denisa. *Získávání celulózy z městských odpadních vod a její energetické využití*. Brno, 2024. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA

## PROHLÁŠENÍ

### PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem dizertační práci s názvem *Získávání celulózy z městských odpadních vod a její energetické využití* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9. 5. 2024

---

Dipl.-Ing. Denisa Djordjevićová, MSc

autor

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu disertační práce prof. Ing. Petru Hlavínkovi, CSc., MBA. a školiteli specialistovi doc. Ing. Jakubu Račkovi, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady a pomoc, kterou mi poskytli během doktorského studia a při tvorbě této disertační práce. Dále děkuji kolegům z výzkumného centra AdMaS VUT v Brně za pomoc, poskytnutí prostoru a technického zázemí pro realizaci laboratorních pokusů a měření. Děkuji podniku FONTANA R za zapůjčení experimentálního zařízení a provozovateli ČOV Brno – Modřice za poskytnutí místa pro jeho instalaci. Dále bych chtěla poděkovat kolegům ze Stavební fakulty v Bělehradě, v první řadě prof. Vladaně Rajaković-Ognjanović, Ph.D. za podporu a výpomoc při metodice výběru a zpracování vědeckých podkladů. V neposlední řadě patří dík mojí rodině a přátelům, obzvláště mamince, sestře a dětem, a také kolegyni Ing. Željce Ostojić, Ph.D., kteří mě intenzivně podporovali během studia. Svou disertační práci věnuji svým dcerám Kateřině a Aleksandře.

## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>CÍLE A STRUKTURA DISERTAČNÍ PRÁCE</b> .....	<b>13</b>
2.1	HLAVNÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	13
2.2	STRUKTURA DISERTAČNÍ PRÁCE .....	15
<b>3</b>	<b>SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ</b> .....	<b>19</b>
3.1	ODPADNÍ VODA JAKO ZDROJ .....	19
3.1.1	<i>Získávání surovin z odpadní vody</i> .....	20
3.1.2	<i>Získávání energie z odpadní vody</i> .....	24
3.1.3	<i>Recyklace vyčištěné odpadní vody</i> .....	26
3.2	MOŽNOSTI ZÍSKÁVÁNÍ CELULÓZY Z ODPADNÍ VODY .....	26
3.3	MATERIÁLOVÁ TRANSFORMACE CELULÓZY .....	33
3.3.1	<i>Opětovné využití celulózy</i> .....	34
3.3.2	<i>Energetické využití celulózy</i> .....	36
3.3.3	<i>Dopad separace celulózy na technologii ČOV</i> .....	49
3.3.4	<i>Materiálová transformace čistírenského kalu pomocí technologie pyrolýzy</i> .....	51
3.4	LEGISLATIVNÍ PŘEDPISY A EKONOMICKÉ PROGNÓZY 56	
3.4.1	<i>Ekonomické prognózy toaletního papíru</i> .....	58
3.5	OD ODPADNÍ CELULÓZY AŽ K PRODUKTU .....	68
<b>4</b>	<b>ZÍSKÁVÁNÍ CELULÓZY PRO MATERIÁLOVOU TRANSFORMACI</b> .....	<b>75</b>
4.1	ZÁKLADNÍ INFORMACE O PODMÍNKÁCH EXPERIMENTU .....	75
4.1.1	<i>Meteorologické podmínky při zahájení experimentu</i> .....	78
4.2	POPIS SEPARACE CELULÓZOVÝCH VLÁKEN .....	79
4.3	CHARAKTERISTIKA ODPADNÍ VODY .....	82
4.4	ODVODNĚNÍ A SUŠENÍ .....	82
4.5	ODBĚR VZORKŮ A PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	83
4.6	PRŮBĚH PELETIZACE CELULÓZY.....	87
4.7	PYROLÝZA PELETIZOVANÉHO MATERIÁLU .....	87
4.8	POUŽITÉ ANALYTICKÉ METODY.....	88
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY VÝZKUMU</b> .....	<b>94</b>
5.1	JEDNOSTUPŇOVÁ EXTRAKCE CELULÓZY Z ODPADNÍ VODY NA ČOV BRNO – MODŘICE .....	94
5.2	DVOUSTUPŇOVÁ SEPARACE A PELETIZACE CELULÓZOVÝCH VLÁKEN .....	96
5.3	MATERIÁLOVÁ TRANSFORMACE CELULÓZY POMOCÍ PYROLÝZY.....	97
<b>6</b>	<b>DISKUZE A VYHODNOCENÍ</b> .....	<b>101</b>
6.1	OPĚTOVNÉ VYUŽITÍ CELULÓZOVÝCH VLÁKEN .....	101

---

6.2	ENERGETICKÉ VYUŽITÍ CELULÓZOVÝCH VLÁKEN.....	102
6.3	DEFINOVÁNÍ POTENCIÁLU DOPADU SEPARACE CELULÓZY NA BIOLOGICKÝ STUPEŇ ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD.....	104
6.4	DEFINOVÁNÍ POTENCIÁLU DOPADU SEPARACE CELULÓZY NA VELIKOST KALOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ ČOV.....	105
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR A PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>110</b>
7.1	PŘÍNOSY PRO VĚDNÍ OBOR.....	110
7.2	PŘÍNOSY V PRAXI.....	112
<b>8</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>114</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>121</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>123</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ.....</b>	<b>124</b>
	<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>	<b>125</b>



## 1 ÚVOD

Nové světové trendy ohledně dostupných zdrojů ovlivnily způsob nakládání s odpadními vodami (OV), a už nejde pouze o čištění OV a prevenci znečištění, ale také o získávání zdrojů, jako jsou živiny, energie a voda. Čistírný odpadních vod (ČOV) se tak stávají zařízeními pro využití zdrojů OV (Fernández-Arévalo et al., 2017) s modely, které respektují trendy oběhového hospodářství. Celulózová frakce získaná z OV přispívá k zlepšení celkového procesu čištění OV s pozitivním efektem na snížení objemů biologického stupně čištění OV, spotřebu energie a zejména pak s pozitivním ohledem na snížení kapacity kalového hospodářství ČOV. V dnešní době se klade velký důraz na snižování nákladů a zvyšování udržitelnosti prostřednictvím využití energie a nutrientů obsažených v městských OV na ČOV a to i právě z pohledu materiálové transformace celulózy z městských odpadních vod.

Toto jsou v zásadě cíle pro vodní a odpadové hospodářství měst definované mimo jiné evropskou legislativou vztahující se k cirkulární ekonomice ("Nový akční plán EU pro oběhové hospodářství - Čistší a konkurenceschopnější Evropa (2020)", 2020). V podmínkách České republiky je strategickým dokumentem, zpracovaným Ministerstvem životního prostředí a definujícím konkrétní legislativu v oblasti nakládání s městskými odpady – Státní politika životního prostředí 2030, s výhledem do 2050, která ukládá trend zvyšování podílu materiálového využití biologicky rozložitelných odpadů ("Státní politika životního prostředí České republiky 2030 s výhledem do 2050", 2020).

Současná kritéria Evropské unie (EU) pro primární čištění na ČOV vyžadují minimálně 20 % odstranění organické látky (OL) a 50 % odstranění suspendovaných látek. Samotná sedimentace často není dostačující pro efektivní primární čištění OV bez využití chemických procesů (Rusten & Ødegaard, 2006). Výzva k omezení spotřeby energie při procesu provzdušňování a snížení množství přebytečného kalu vedla k odstranění OL před biologickým stupněm čištění (*Cellvation*, 2018). Uvedené poznatky mají dopad na instalaci a zprovoznění jemných sít mechanického předčištění pro optimalizaci výkonů primárního stupně čištění OV na ČOV (Rusten & Ødegaard, 2006). Tento způsob dočištění a úpravy primárního stupně přispívá k zlepšení celkového procesu čištění OV (Chen et al., 2017) a má pozitivní účinek na jednodušší úpravy čistírenského kalu (ČK) a současně pak i menší náklady na jeho přepravu (*SMART-Plant*, 2018).

Celulóza je organická sloučenina s vysokým energetickým potenciálem, která se mimo jiné hojně vyskytuje v městských OV. Hlavním zdrojem celulózy v OV je toaletní papír (TP), kterého se v západoevropských zemích spotřebuje až 15 kg na osobu za rok (Crutchik et al., 2018). Buničina TP tvoří až 30-50 % nerozpuštěných látek (NL) v primárním kalu na městské ČOV (Crutchik et al., 2018). Ve srovnání s bílkovinami a lipidy v OV je celulóza, jako druh sacharidů, bohatá na uhlík (C), ale podléhá mnohem pomalejší mikrobiální hydrolýze. Celulóza v městských OV

tvorí nejvyšší podíl v nerozpustné frakci chemické spotřeby kyslíku (CHSK). Většina celulózy se v současných podmínkách prosévá nebo vysráží během primárního čištění na ČOV. Celulóza z TP se během přepravování v kanalizační síti nemění a také obtížně degraduje při biologickém čištění. Na konvenčních ČOV je celulóza současně zpracovávána jako odpadní kal, spolu s přebytečným kalem z biologického čištění (Chen et al., 2017).

Z důvodu pomalého rozkladu celulózy v konvenčním procesu čištění, a zároveň kvůli jejímu vysokému podílu na celkovém obsahu OL v městských OV, představuje její odstranění na samém začátku primárního čištění OV atraktivní výzvu.

Instalace technologie na separaci primárního celulózového kalu (PCK) pro ČOV s přítokem jednotné nebo oddílné kanalizace, se kterými se ve větších obcích setkáváme, se navrhuje jen zřídka. V rámci primárního čištění OV, tedy za lapákem písku a za lapákem tuků a za česlovnou, se instaluje zařízení pro jemné dynamické prosévání pomocí mikrosít o velikosti ok 0,25 až 0,35 mm doplněné odvodňovacím lisem (Rusten & Ødegaard, 2006). Vytěžený PCK je energeticky vhodný v rámci předpřípravy na proces pyrolýzy vysušit (Racek et al., 2020).

V současnosti v oboru čistírenství jsou mezi metodami termického zpracování ČK zvažovány termické procesy spalování a pyrolýza ("Termické zpracování sušených ČK: Pyrolýza", 2021). Pyrolýza představuje termochemický redukční proces, který přeměňuje PCK na tři produkty: i) pevný uhlíkatý produkt (PUP), tedy materiál s vysokým obsahem C, dále pak ii) pyrolýzní olej (PO), což je směs vody a oleje, a iii) pyrolýzní plyn (PP) (Racek et al., 2020). Ze všech výstupních produktů pyrolýzy, nejvyšší potenciál pro energetické využití má PO, který je svými vlastnostmi podobný motorové naftě. PUP disponuje také určitou energetickou hodnotou. S narůstajícím obsahem C stoupá energetický obsah v PUP. Výhřevnost PUP po pyrolýze závisí na vstupním materiálu použitém pro pyrolýzu a pohybuje se mezi 5–21 MJ·kg<sup>-1</sup>. Pro další energetické využití, kromě spalování, hodnoty kolem 5 MJ·kg<sup>-1</sup> nejsou z energetického hlediska atraktivní (Racek et al., 2020). Sušením a pyrolýzou ČK dochází k jeho hygienizaci (Pohořelý et al., 2017). Jelikož teplota má významný vliv na výtěžky procesu pyrolýzy, nejzákladnější rozdělení lze provést podle procesní teploty a doby zdržení ("Termické zpracování sušených ČK: Pyrolýza", 2021). Technologicky lze procesy pyrolýzy klasifikovat na nízkoteplotní (< 500°C), středněteplotní (500 - 800°C) a vysokoteplotní (> 800°C) (HLAVÍNEK, 2015). Materiálovou transformaci PCK a výrobu PUP je vhodné provést prostřednictvím středněteplotní pyrolýzy (STP) (Pohořelý et al., 2017).

Celulóza získaná z PCK původem z vláken TP z OV na ČOV se může použít jako bioenergetický zdroj pro výrobu zelené energie, včetně pelet, bioetanolu a bioplynu (Cirtec, 2023). Získaný PUP lze použít v zemědělství jako přísadu pro zlepšení vlastností půdy, pro hnojení půdy a díky svým výrazným hygroskopickým vlastnostem i pro zadržování vody v krajině (Racek et al., 2020). Tento PUP může být také využit

k vázání C, ale také např. k imobilizaci kontaminantů a k snižování emisí skleníkových plynů (Racek et al., 2020).

V disertační práci jsem se zaměřila na získávání, energetické a materiálové využití celulózové frakce z městských OV procesem STP. V rámci experimentální části disertační práce jsem vyvinula metodický postup pro separaci PCK z městských OV a jeho materiálovou transformaci metodou STP. Během procesu transformace PCK na využitelné PUP a získávání energie z PP a PO byl posuzován i vliv na další fáze čištění OV a vliv na kalové hospodářství ČOV. Další směr výzkumu je věnován technologii STP pro termické zpracování PCK.

Vyhodnotila jsem možnosti znovopoužití PCK se zaměřením na využití jejího energetického potenciálu. V disertační práci byla provedena analýza možností využití energie obsažené v PCK ve formě PO a PP a implementace PUP do zemědělství nebo do modrozelené infrastruktury měst v rámci materiálového využití PCK.

Tato disertační práce otevírá nové poznatky a perspektivy pro rozšířené využití produktů pyrolýzy v energetickém sektoru a odhaluje výzvy pro výrobu uhlíkatých materiálů z recyklovaných odpadů.

Výzkum materiálové transformace celulózy z OV do přípravy dále využitelného produktu respektoval dva směry. První směr se zabýval procesem získávání celulózových vláken z TP a jeho dopadem na další fáze čištění a hospodaření s kalovými produkty na ČOV. Druhý směr výzkumu se věnoval průzkumu technologie STP pro termické zpracování, dále pak energetické a materiálové využití PCK.

V rámci disertační práce jsem se zaměřila na vývoj efektivních technologií, které umožňují atraktivní využití energie z PCK a zvyšují využití OL z OV. Tímto způsobem se přispívá k udržitelnému rozvoji v oblasti zpracování biologicky rozložitelných odpadů. Pro praktickou implementaci je třeba zaměřit se na detailní návrhy instalací, technologií a zařízení pro materiálovou transformaci celulózy z OV a na upřesnění podmínek procesu výroby produktů pyrolýzy.

## 2 CÍLE A STRUKTURA DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem této disertační práce je provést energetické a materiálové vyhodnocení materiálové transformace PCK pomocí STP a prozkoumat možnosti znovuvyužití vysokohodnotných a energeticky bohatých získaných produktů: PO, PP a PUP.

Disertační práce se skládá z analýzy teoretických a legislativních základů dosavadních znalostí, praktického výzkumu, který zahrnuje provedení experimentů a interpretaci získaných dat, a vyhodnocení výsledků. V závěru jsou shrnuty přínosy pro vědní obor a praxi.

### 2.1 HLAVNÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem mé disertační práce bylo získat celulózu z vláken původem z TP z OV v primárním stupni čištění na ČOV v České republice (ČR) a dále vyhodnotit **i) energetickou hodnotu a ii) produkty materiálové transformace**, metodou STP vytěženého PCK do podoby dále využitelných produktů: PO, PP a PUP.

**Hlavní cíle mé disertační práce zaměřené na získávání celulózy z městských OV a její energetické využití jsou čtyři:**

- i) vyhodnotit opětovné využití získaného PCK,**
- ii) vyhodnotit energetické využití získaného PCK,**
- iii) stanovit dopady separace celulózy na biologický stupeň čištění OV,**
- iv) stanovit dopady separace celulózy na velikost kalového hospodářství ČOV.**

#### ***i) Vyhodnocení opětovného využití získaného primárního celulóзовého kalu***

V rámci vyhodnocení opětovného využití získaného PCK bylo nutné provést předpřípravu PCK pro navazující proces STP. Experimentální část probíhala v následujících krocích: i) separace celulóзовých vláken z OV, ii) solární sušení a výroba celulóзовých pelet (CP) a iii) materiálová transformace celulóзовých vláken pomocí STP.

V rámci vyhodnocení opětovného využití získaného PCK bylo potřeba provést laboratorní analýzy čerstvého PCK, usušeného PCK, CP a získaného PUP jako produktu STP.

Mezi první údaje, které se musely získat, patřily meteorologické podmínky a charakteristiky nátoky vstupní OV na předmětné ČOV. Následně bylo nutné odebrat vzorky čerstvého PCK z jednostupňové separace a provést laboratorní analýzy vlhkosti, ztráty žiháním, těžkých kovů (TK), fosforu (P), dusíku (N), celkového organického C a pozorování vláken TP pod mikroskopem. Vytěžený PCK zahrnoval mimo jiné vysoký podíl gastro odpadu, což vyžadovalo druhý stupeň manuální separace PCK a laboratorní analýzy zahrnující základní parametry vlhkosti, ztráty žiháním a obsah TK. Dále jsem v rámci svého výzkumu provedla stanovení

vlhkosti a ztráty žíháním usušeného PCK. Byl zaznamenán průběh STP. Analýzy procentuálního zastoupení C vstupního vzorku CP a výstupního vzorku PUP byly použity jako základ pro odvození závěrů ohledně opětovného využití PCK. Bylo určeno hmotnostní a procentuální složení výstupních produktů STP: PUP, PO a PP.

V rámci výzkumných prací jsem se zaměřila na posouzení hmotnosti produkce a odhad produkce PUP z PCK na obyvatele za rok. Dále jsem posoudila vlastnosti PUP a vliv STP na kvalitu PUP a jeho další použitelnost.

V závěru disertační práce je popsán přínos pro praxi a vědní obor. Provedena je analýza počtu obyvatel, pro něž je doporučeno vykonat materiálovou transformaci z PCK na PUP. Dále jsou vyloženy směrnice pro uvedení produktů PUP na trh a jejich certifikaci, a také jsou prezentovány návrhy možných aplikací.

### ***ii) Vyhodnocení energetického využití získaného primárního celulózového kalu***

Pro účel vyhodnocení energetického využití získaného PCK jsem použila stejný vzorek PCK jako pro vyhodnocení opětovného využití. Vzorek byl připraven stejným postupem jako pro materiálovou transformaci STP.

V rámci vyhodnocení energetické hodnoty získaného PCK bylo zapotřebí provést laboratorní analýzy spalného tepla a vlhkosti vzorku vytěženého PCK a určit hmotnost vstupního vzorku usušeného PCK a výstupního množství po procesu STP získaných tří produktů, tedy PUP, PO a PP.

Za účelem posouzení energetického potenciálu PCK na základě parametrů těžby PCK a nátoku na ČOV jsem stanovila koncentraci CHSK z PCK ve vztahu k hmotnostnímu toku CHSK na ČOV Brno – Modřice. Cílem bylo zjistit, jakou energetickou hodnotu má PCK ve vztahu k celkové energetické hodnotě ČK na ČOV Brno – Modřice.

Provedla jsem srovnání v rámci roční produkce bioplynu z anaerobní digesce (AD), poměru hmotnostního průtoku PCK/ČK, výhřevnosti a tepelné energie. Dále jsem si vytyčila za cíl přepočítat hypotetickou produkci metanu ( $\text{CH}_4$ ) z PCK ve srovnání s celkovou produkcí  $\text{CH}_4$  na ČOV Brno – Modřice.

Byla vyhodnocena eventuelní výroba tepelné energie z PCK a samotné celulózy z PCK.

V rámci energetického využití PCK jsem se ve výzkumu zaměřila na energetický potenciál PCK, který je separován již v primárním stupni a tímto způsobem oddělen od celkové produkce a energetické hodnoty ČK na ČOV Brno – Modřice.

### ***iii) Stanovení dopadu separace celulózy na biologický stupeň čištění odpadních vod***

V disertační práci jsem si dále stanovila za cíl analyzovat vliv odstraňování celulózy z PCK v primárním stupni čištění na chování základních parametrů v OV během procesu čištění na ČOV Brno – Modřice.

Jako podklad pro diskuzi použila jsem fotografie pozorování vláken TP pod mikroskopem a tak jsem změřila tloušťku a délku celulózových vláken pro určení velikosti průlin na sítích během prosévání v primárním stupni. Prvním stanoveným úkolem bylo určit vliv separace PCK na odstranění OL, NL, celkového P a N.

Dílčím cílem mého výzkumu bylo ukázat, že degradace OL bohatých na celulózu v OV nemá vliv na biologické procesy, které probíhají za podmínek biodegradace. Navíc, na základě parametrů získaných z takto vytěženého PCK, můžeme navrhnout účinný proces biologického čištění a optimalizovat provoz v sekundárním stupni čištění OV, jelikož tyto hodnoty přispívají ke snížení zatížení, které vstupuje do následujících stupňů čištění OV. Následuje shrnutí dopadu těžby PCK na oxické a anoxické procesy na ČOV BRNO – MODŘICE.

V závěru jsem se zaměřila na teoretické poznatky o vlivu separace celulózy na biochemické procesy na ČOV BRNO – MODŘICE, což by mělo posloužit v praxi pro dimenzování biologického stupně čištění u ČOV, které budou provádět separaci PCK.

### ***iv) Stanovení dopadu separace celulózy na velikost kalového hospodářství čistíren odpadních vod***

Jako základní informace pro analýzu dopadu separace PCK na kalové hospodářství byly použity přepočty produkce PCK na základě parametrů těžby v experimentálním provozu.

V rámci disertační práce ohledně kalového hospodářství jsem si stanovila za cíl přepočítat roční hmotnostní výtěžek suchého PCK na základě údajů o produkci PCK během experimentu. Dílčím cílem byl přepočet produkci PCK na jednoho obyvatele. Tyto informace slouží k určení návratnosti investice do separování PCK na základě počtu obyvatel.

V rámci požadovaných informací jsem upřesnila údaje o optimální vlhkosti usušeného PCK, který je nutné určit pro proces peletizace. Zároveň bylo nezbytné zhodnotit obsah TK a P v PCK z důvodu stanovení potřebných úprav PCK pro další aplikace.

Jeden z klíčových cílů bylo vyhodnotit redukci objemu kalového hospodářství implementací technologického procesu separace PCK v primárním stupni čištění na ČOV BRNO – MODŘICE. Úkolem bylo odhadnout procento snížení celkové produkce usušeného a odvodněného kalu a zhodnotit dopad na velikost kalového hospodářství.

## **2.2 STRUKTURA DISERTAČNÍ PRÁCE**

Struktura disertační práce je systematicky rozdělena do pěti hlavních částí: současný stav poznání, získávání celulózy pro materiálovou transformaci, výsledky výzkumu, diskuze a vyhodnocení, závěr a přínosy disertační práce.

### ***i) Současný stav poznání***

Teoretické základy této disertační práce zahrnují analýzu současného stavu poznání týkajícího se využití OV jako zdroje, s důrazem na možnosti získávání celulózy z OV pro její materiálovou transformaci. OV je hodnocena z hlediska jejího potenciálu jako zdroj pro získávání živin, energie a recyklované vody. Popsané jsou stávající metody separace PCK na ČOV v EU. Pro posouzení dosavadních aplikací separace celulózy byla provedena rešerše domácí a zahraniční literatury v oblasti opětovného a energetického využití celulózy a byl analyzován dopad těžby celulózy na technologii čištění OV. V rámci teoretické části práce bylo provedeno vyhodnocení dosavadních poznatků o vlivu separace celulózy v primárním stupni na biologický stupeň čištění OV a přepočtení investičních nákladů na kalové hospodářství. Byla také provedena rešerše současného stavu poznání v oblasti materiálové transformace ČK pomocí technologie pyrolýzy. V neposlední řadě jsou uvedeny legislativní předpisy v rámci legislativy EU, na jejichž základě se provádí separace celulózy a jejich recyklace. Byla provedena analýza ekonomické návratnosti v rámci implementace konceptu těžby PCK v globálním měřítku. Také jsou popsány stávající aplikace recyklovaných produktů celulózy původem z PCK a jejich energetické vyhodnocení.

### ***ii) Získávání celulózy pro materiálovou transformaci***

V experimentální části mé disertační práce jsem popsala separaci PCK pomocí jednostupňové dynamické separace na ČOV Brno – Modřice a dvoustupňové manuální separace na výzkumném centru AdMaS VUT v Brně (AdMaS). Poskytla jsem podrobné informace o instalaci a zařízeních pro separaci PCK z OV na ČOV Brno – Modřice a o meteorologických podmínkách a charakteristice nátok vstupní OV. Odebrala jsem čtyři vzorky (vzorek-1, vzorek-2, vzorek-3 a vzorek-4) čerstvého PCK z jednostupňové separace. Provedla jsem laboratorní analýzy zahrnující následující parametry: vlhkost, ztráta žíháním, TK, P, N, celkový organický C (TOC) a také jsem pozorovala vlákna TP pod mikroskopem se zvětšením 200x. Popsala jsem druhý stupeň separace PCK na AdMaS, při kterém byl jednostupňově separovaný PCK dále zpracován, tedy prostřednictvím manuální dvoustupňové separace. Odebrala jsem vzorek-6 z dvoustupňové separace pro laboratorní analýzy zahrnující základní parametry vlhkosti, ztrátu žíháním a obsah TK. Pro vzorek-6 je dále vyhodnoceno spalné teplo. Na přípravu PCK pro materiálovou transformaci jsem provedla solární sušení a peletizaci separovaného PCK. Ze usušeného PCK jsem odebrala vzorek-5 pro stanovení vlhkosti a ztráty žíháním. V rámci energetického a materiálového využití zaměřila jsem se na materiálovou transformaci celulózy pomocí STP. Definovala jsem postup a průběh STP na pyrolýzní jednotce na AdMaS. Znázornila jsem proces STP a její výsledné produkty: PUP, PO a PP.

### ***iii) Výsledky výzkumu***

V této části disertační práce jsou tabulkově, numericky a graficky zpracovány naměřené a pozorované parametry výzkumu. První část výsledků ukazuje laboratorní analýzy PCK z jednostupňové a dvoustupňové separace a v neposlední řadě pak

sumarizuje výsledky spalného tepla. Předvedeny jsou černobílé a barevné fotografie vláken TP pořízené mikroskopem se změřenou délkou a tloušťkou vláken. Určen je obsah sušiny ve vstupním vzorku CP, který je optimální pro proces peletizace. Graficky je znázorněn průběh reakce STP vzorku CP, kde je demonstrován průběh vnitřních a vnějších teplot v reaktoru jednotky STP. Fotografiemi je ilustrován PCK ve formě CP před STP a PUP po materiálové transformaci. Uvedeny jsou charakteristiky vstupního vzorku CP a výstupního vzorku PUP vyhodnocené v laboratoři. Určena je hmotnost výstupních produktů STP (PUP, PO a PP) a jejich hmotnostní a procentuální podíl je pak znázorněn graficky.

### ***iv) Diskuze a vyhodnocení***

V rámci svého výzkumu jsem se zaměřila na vyhodnocení těžby a materiálové transformace PCK z hlediska opětovného a energetického využití separovaných celulóзовých vláken a definování potenciálu dopadu separace celulózy na biologický stupeň čištění OV a velikost kalového hospodářství ČOV BRNO – MODŘICE.

Vyhodnoceno je procentuální zastoupení produktu v materiálové transformaci STP (PUP, PO a PP) a podíl anorganického a organického C. Provedena je analýza vlivu procesní teploty STP na obsah TK v PUP. Zároveň jsou posuzovány hodnoty obsahu TK ve vzorcích. V této kapitole jsem se zaměřila na potenciál certifikace PUP a limitů vybraných parametrů, které určují právě certifikaci PUP.

Také jsem se zabývala závislostí objemu výroby produktů materiálové transformace celulózy na počtu obyvatel, z čehož jsou odvozeny údaje o poměru produkce PUP z PCK a produkce PUP z ČK.

Proveden je přepočít roční produkce CH<sub>4</sub>, tepelné energie, suchého a odvoněného PCK, produktů STP (PUP, PO a PP) a je zhodnocen jejich dopad na energetickou bilanci produkce na ČOV BRNO – MODŘICE a pak také na velikost kalového hospodářství.

### ***v) Závěr a přínosy disertační práce***

V závěru své práce uvádím dva typy přínosů: přínos pro vědní obor a přínos pro praxi.

Přínos pro vědní obor zahrnuje zhodnocení získaných teoretických poznatků pro implementaci technologie k získávání celulózy v primárním stupni čištění na ČOV v kontextu jeho vlivu na biologický proces, kalové hospodářství, ekonomickou efektivitu provozu a udržitelnost obnovitelného zdroje celulózy z OV. V rámci této disertační práce je provedena analýza potenciálu energetického využití PCK ve formě PO a PP, stejně jako možnosti materiálového využití PCK s cílem implementace PUP do zemědělství nebo do modrozelené infrastruktury ve městech, což představuje nové poznatky a rozšiřuje možnosti pro širší aplikaci pyrolýzních produktů v oblasti energetického využití anebo výroby uhlíkatých materiálů.

V rámci přínosu pro praxi zabývám se vyhodnocením a návrhem využití produktů materiálové transformace celulózy pomocí STP separovaného PCK, jako jsou PUP,



PO a PP. Součástí závěru práce je uvedení koncepčního návrhu pro umístění technologie k získávání celulózy v primárním stupni čištění na ČOV v ČR, včetně možných aplikací a pokynů pro další potenciální výzkumy. Také je určena velikost ČOV, pro kterou je implementace technologie separace PCK rentabilní. Byl odvozen závěr, vzhledem k globálním trendům předpokládané produkce OV a TP, ohledně otázky, zda je ČR ekonomicky vhodná pro tento druh hospodaření.

V této kapitole jsem také probírala otázky, jak státní politika životního prostředí v ČR, která je provázána s evropskou legislativou, bude mít vliv na provozovatele a majitele ČOV a na jejich připravenost zlepšit účinnost čištění a využívat odpady jako zdroje.

V závěru jsou uvedeny směrnice pro budoucí implementaci výzkumu do praxe, tedy jak zlepšit účinnost čištění na ČOV, což bude vyžadovat úpravy a rekonstrukce primárního a sekundárního biologického čištění na ČOV a kalového hospodářství.

### 3 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Kapitola o současném stavu poznání představuje rešerši existujících znalostí, které tvoří základ pro experimentální část a poskytují teoretické údaje, ze kterých pak budou pramenit závěry.

V rámci této kapitoly jsou zpracovány základní poznatky o OV jako o zdroji surovin a energie, sumarizovány jsou existující metody získávání celulózy z OV a možnosti materiálové transformace celulózy. Tato kapitola také poskytuje přehled legislativních rámců pro separaci celulózy z OV a reprezentuje ekonomickou analýzu ziskovosti tohoto konceptu na globální úrovni. V neposlední řadě jsou uvedeny případy z praxe získávání recyklované celulózy z OV.

Údaje z této kapitoly slouží k pochopení aktuálních trendů a výzev v oblasti využití celulózy z OV, které poskytují podklad pro následující části disertační práce.

#### 3.1 ODPADNÍ VODA JAKO ZDROJ

OV je veškerá voda, která vlivem lidské aktivity změnila kvalitu a která může negativně ovlivnit jakost povrchových i podzemních vod. Hlavně se jedná o vodu používanou v obytných, průmyslových, zemědělských a zdravotnických zařízeních, také v dopravních prostředcích. OV se odvádí stokovou sítí podle příslušné legislativy v ČR ("Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon)", n.d.). OV můžeme rozdělit na:

- splaškové: OV z domácností, sociálních zařízení, restaurací, nemocnic,
- městské: splaškové vody a vody z menších průmyslů,
- průmyslové,
- zemědělské,
- dešťové vody.

Předmětem této disertační práce jsou jen splaškové OV. Vypouštěná splašková OV obsahuje mimo jiné následující škodlivé látky:

- NL, hrubě plavající a rychle sedimentující látky,
- jemně suspendované látky,
- jemné koloidní látky (oleje, tuky),
- rozpuštěné látky anorganického i organického původu,
- mikroorganismy,
- plyny.

OV představuje významný zdroj, který dosud byl obecně vnímán jako odpadový produkt, nicméně postupně začíná být považován za cenný zdroj. OV obsahuje řadu živin, které mohou být znovu využity k produkci potravin, stavebních materiálů, léčiv,

bioplastiky a energie. V důsledku rostoucího počtu obyvatel a průmyslových podniků dochází k narůstání produkce OV a spolu s tím mimo jiné k souvisejícímu snižování kvality vodních zdrojů. S ohledem na postupné vyčerpávání surovinových zdrojů a potřebu udržitelného rozvoje, získávání surovin z OV a její opětovné využití se stává klíčovou výzvou pro současnou společnost. Získávání surovin z městských OV, které obsahují nejcennější složky s největším potenciálem pro opětovné využití, zahrnuje P, N, TK (např. Cd, Hg, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb a Zn), bioplyn, biomasu, polyhydroxyalkanoáty (PHA), OL, drahé kovy, přečištěnou vodu, energii a v neposlední řadě celulózová vlákna, na které se zaměřuji v rámci své disertační práce. Dále budou popsány základní metody a aplikace získávaných živin a energie z OV a vyčištěné OV.

### 3.1.1 Získávání surovin z odpadní vody

Recyklace surovin představuje proces obnovy a opětovného využití surovin obsažených v OV. Tento proces může být prováděn na různých stupních čištění OV, včetně primárního čištění, biologického čištění a zpracování kalu na ČOV. Recyklace živin snižuje závislosti na přírodních zdrojích a poskytuje významné přínosy v oblasti úspor energie a vody. V textu jsou prezentovány postupy získávání surovin z OV a možnosti jejich opětovného využití.

#### **Fosfor**

P jako esenciální látka, která je nezbytná pro výrobu potravin a je základní potřebou obyvatelstva, stává se kritickým zdrojem, jehož recyklace je stále aktuálnějším tématem nejen v EU. Zásoby přírodních zdrojů P se odhadují na několik desítek let a tak se P stal jedním z dvaceti kritických primárních zdrojů. Zpětné získávání P se stále provádí jen výjimečně a EU importuje 92 % P ze zemí třetího světa. Prognóza predikuje, že těžitelné zásoby P postačí pravděpodobně do roku 2050, ale nevyváženost potřeb a zásob nastane již kolem roku 2025, což bude mít negativní vliv na cenu P na světovém trhu (HARTIG et al., 2018). P se vyskytuje v OV nejčastěji v rozmezí 4 až 14 mg·L<sup>-1</sup>, a cca 70 % je v anorganické formě a dalších cca 30 % tvoří organicky vázaný P. Mimo jiné se P do vodotečí dostává převážně ze zemědělství, a když se dostane do recipientů, způsobuje jejich eutrofizaci (Houdková et al., 2016).

Celkové množství P se vyskytuje ve formě:

- ortofosfátů, tedy soli kyseliny ortofosforečné,
- polyfosfátů, soli polyfosforečných kyselin,
- organicky vázaného P.

Technologie na odstranění P převádí P do nerozpustných pevných fází, jako jsou:

- nerozpustné anorganické soli,
- biomasa aktivovaného kalu,

- biomasa umělých mokřadů.

Ze směsí nerozpuštěných fosforečnanů musí být odstraněny patogeny a toxické sloučeniny a potom mohou být skládkovány, spalovány nebo použity jako hnojivo.

V současnosti existují procesy na získávání P, které jsou aplikované ve velkém průmyslovém měřítku a některé jsou založeny pouze na teoretické rovině nebo prováděny v laboratorních podmínkách, případně v rámci demonstračních aktivit.

Obecně existují tři základní postupy recyklace P:

- srážení v anaerobní zóně – přímé získávání P při čištění OV,
- chemické a mikrobiologické procesy a jejich kombinace,
- zpětné získávání P termickým způsobem – termické zpracování ČK (získávání P z popílku).

### **Dusík**

Sloučeniny N mohou být organické a anorganické. Mezi anorganické sloučeniny N patří amoniak, amonné soli, dusitany a dusičnany. Organické sloučeniny N zahrnují bílkoviny a aminokyseliny, ze kterých vznikají produkty metabolismu, jako jsou močovina, kyselina hippurová a kyselina močová. Tento hemický prvek patří mezi makrobiogenní prvky s obsahem v biomase kolem 10 % (Pitter, 2015).

Ve vodách sloučeniny N mohou mít antropogenní nebo neantropogenní původ. Jeden z antropogenních zdrojů N je dusíkaté hnojivo půdy. Oxidy N se rovněž vytvářejí jako vedlejší produkt spalování motorů, přičemž se tyto látky dostávají do vod při atmosférických výbojích (Pitter, 2015). Vysoké koncentrace N se vyskytují také v produktech metabolismu živočichů a lidí (cca 12 g N na obyvatele denně) (Malý & Malá, 2009). Neantropogenní sloučeniny N se vyskytují ve vodách v podobě amoniaku, který vzniká rozkladem dusíkatých organických látek. Metody na odstraňování dusíkatých látek mohou být chemické a biologické (Malý & Malá, 2009).

### **Těžké kovy**

TK se vyskytují v prachových částicích z automobilové dopravy, při spalování fosilních paliv, ve stavebnictví, v průmyslových a energetických zařízeních. Dodržování přísných limitů koncentrace TK v OV vyžaduje jejich odstranění před vypuštěním do okolního prostředí. K tomuto účelu existují různé metody. Kromě odstraňování TK z OV během procesu čištění jsou k dispozici také metody zpětného získávání vybraných TK jako jsou např. Cd, Hg, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb a Zn. TK mají velkou rozpustnost ve vodě, a proto mohou být absorbovány živými organismy. Když se dostanou do potravinového řetězce, hromadí se v lidském těle, a pokud se do těla dostanou ve větší koncentraci, než je povoleno, mohou způsobit vážné zdravotní problémy (Cantinho et al., 2016).

Během klasického postupu čištění OV na ČOV se většina vstupního znečištění z OV převádí do čistírenského kalu, který může obsahovat zvýšené množství TK (Cantinho et al., 2016). Technologie schopné odstranit (nebo vytěžit) TK, jsou v současnosti zatím drahé a z toho důvodu těžko proveditelné. Tradiční metody aplikovatelné na odstranění (těžbu) TK jsou: chemické srážení, iontové výměny, flotace, adsorpce, membránová filtrace či různé elektrochemické metody. Elektrochemické technologie používané k úpravě vody zahrnují elektrodialýzu, elektrokoagulaci, elektroflotaci, elektrooxidaci, elektroredukci, elektrodepozici a elektrodeionizaci.

### **Biomasa**

Ohledně aplikace biomasy z ČK, kromě energetického využití, ta se může také používat na hnojení za určitých podmínek pro malé zdroje městského znečištění (Kratina et al., 2021) a na výrobu PUP a jeho aplikaci v modrozelené infrastruktuře (NOVOTNÝ et al., 2022). Díky svým vlastnostem PUP vylepšuje mnoho environmentálních aplikací s důrazem na udržitelnost.

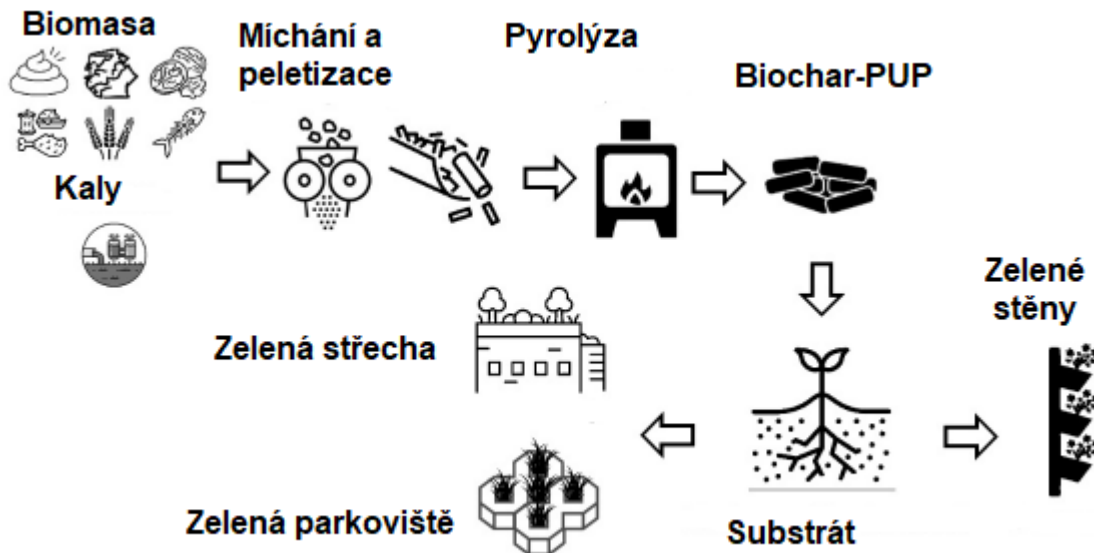
PUP má schopnost dlouhodobě vázat C a tak snižovat množství oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) v atmosféře. Díky svému poréznímu povrchu je vhodný pro zvýšení hygroskopických vlastností půdy. V PUP jsou přítomny prvky a mikroživiny důležité pro pěstování plodin, jako je například N, P a draslík (K) (NOVOTNÝ et al., 2022).

### **Hnojení půdy**

Zvažuje se možnost zjednodušení postupů úpravy a stabilizace ČK z malých městských zdrojů ČOV o kapacitě do 1000 ekvivalentních obyvatelů (EO) v místě jejich vzniku a jejich následného využití. Jednou z technologií jsou rákosová kalová pole (Kratina et al., 2021). Druhou zkoumanou možností je ověření hygienizace ČK pomocí dlouhodobého skladování a pasterizace (NOVOTNÝ et al., 2023), která se ukázala jako účinná metoda odstraňování mikrobiálního znečištění v souladu s požadavky stanovenými ve vyhlášce MŽP 273/2021 ("Vyhláška o podrobnostech nakládání s odpady, 273/2021 Sb.", 2021) .

### **Pevný uhlikatý produkt**

Výrobní proces PUP z ČK spočívá v pyrolýze OL, které jsou biologicky rozložitelné. Pyrolýza představuje thermochemický redukční proces, jehož výsledkem je přeměna pevných OL na PUP s vysokým obsahem C. Tato materiálová transformace dosahuje výtěžnosti v rozmezí 10-80 % a provádí se v středně-teplotním intervalu do 600 °C (NOVOTNÝ et al., 2022). Na Obr. 1 je znázorněn proces přeměny biomasy a kalů na pelety, které se používají jako náplň pro proces pyrolýzy. Výstupní PUP je možné využít jako součást substrátu, např. v zelené infrastruktuře měst, tedy např. v městských parcích, zelených parkovištích a jako substrát do půdy pro zelené střechy, stěny nebo fasády. Jeho aplikace probíhá v souladu s jeho specifickými vlastnostmi a omezenou koncentrací znečišťujících látek (NOVOTNÝ et al., 2022).



**Obr. 1** Výroba a využití PUP v zelené infrastruktuře – schéma (NOVOTNÝ et al., 2022).

### **Bioplasty**

PHA jsou biologicky rozložitelné polyestery, které vykazují podobné vlastnosti jako některé polyolefiny získané z ropy. Tyto biopolymerové molekuly jsou vytvářeny a ukládány uvnitř specifických bakterií jako zrnitý C a zdroj energie. Díky jejich biologické odbouratelnosti jsou PHA vhodné pro využití v oblasti bioplastů, přičemž lze extrahovat a používat je k výrobě biologicky odbouratelných termoplastů. V přírodě se tyto polymery vytvářejí prostřednictvím mnoha mikroorganismů, včetně těch, které provádějí bakteriální fermentaci cukru nebo lipidů. PHA se mohou využívat jako zdroj energie a C a jako surovina pro výrobu biologicky odbouratelných bioplastů. Produkce PHA může být realizována pomocí otevřených, smíšených mikrobiálních kultur, které se vyskytují při čištění OV a zpracování pevného odpadu. Odpadní OL z těchto procesů se může využít jako zdroj C pro syntézu biopolymerů při biologickém zpracování aktivního kalu. V současné době je tržní potenciál bioplastů omezen konkurencí s polymery, které pocházejí z petrochemického průmyslu, jsou k dispozici na trhu v hojně míře a za relativně nízké ceny. Náklady na výrobu biopolymerů z odpadních kalů mohou být sníženy pomocí technologií, které umožňují získat C z procesu čištění OV a přeměnit ho na produkt s vysokou hodnotou (Morgan-Sagastume et al., 2014).

Jako vhodná alternativa ke klasickým plastům, které jsou nákladově méně náročné na výrobu, se nabízejí bioplasty, a to z ekologických důvodů, díky biologické odbouratelnosti a nevyužívání fosilních zdrojů pro jejich výrobu. Některé bakterie jsou schopné produkovat až 80% PHB (Poly-(H) - 3 hydroxybutyrát), což je polyester s termoplastickými vlastnostmi. Avšak výroba PHB bakteriální fermentací je stále velmi nákladově náročná, což dává přednost méně náročným systémům, které využívají fotosyntézu rostlin. (Hempel et al., 2011).

## **Drahé kovy**

Drahé kovy jsou z obecného hlediska cenné materiály, které zahrnují látky s vysokou komerční hodnotou a průmyslovým využitím, jako jsou TK, ušlechtilé kovy a další průmyslové materiály, ty vstupují do proudu OV z různých domácích a průmyslových zdrojů, včetně čisticích prostředků, kosmetiky, léků, lidského odpadu, dešťové vody, chemikálií pro úpravu vody a neautorizovaných průmyslových OV. Existuje možnost extrakce relativně velkého množství cenných materiálů z ČK.

### **3.1.2 Získávání energie z odpadní vody**

Závislost české ekonomiky na fosilních zdrojích nese s sebou riziko zranitelnosti v případě cenových skoků a náhlých výpadků energie, způsobených politickými nebo přírodními okolnostmi ("Aktualizace Komplexní studie dopadů, zranitelnosti a zdrojů rizik souvisejících se změnou klimatu v ČR z roku 2015", 2019).

Jednou z cest pro částečnou energetickou neutralitu je rekuperace energie z OV. Tyto OV obsahují chemickou, tepelnou (Hao et al., 2019) a hydraulickou energii (Mo & Zhang, 2013). Získávání energie z OV se může provádět jak na stokové síti, tak i na ČOV.

Hlavní část energie (cca 80 %) obsažené v OV na ČOV%, je reprezentována tepelnou energií (díky tepelné kapacitě vody), cca 20 % tvoří chemickou energii (vyjádřenou CHSK), zatímco podíl hydraulické energie (potenciální a kinetická energie) činí méně než 1% (Gandiglio et al., 2017).

### **Chemická energie**

Chemická energie představuje energii obsaženou v OL v OV a je nejčastěji vyjádřena pomocí CHSK v jednotkách  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Tato energie je zahrnutá v biomase, která se nachází mimo jiné v ČK. Dodržováním zásad oběhového hospodářství a udržitelného rozvoje, sloučeniny C mohou být přeměněny na OL s vysokou hodnotou, jako jsou biopolymery, namísto konverze na  $\text{CH}_4$  a následně na  $\text{CO}_2$  klasickou AD (Hao et al., 2019). Technologie, jako je např. fermentace, AD, pyrolýza, spalování a zplyňování ČK, umožňují biorafineriím vyrábět paliva, elektřinu, teplo a produkty s přidanou hodnotou (Nizami et al., 2017). Chemická energie závisí nejen na množství biologicky rozložitelných CHSK obsažených v OV, ale také na účinnosti konverze chemické energie v kogenerační jednotce a na spotřebě tepla nebo ztrátě při vyžrávání kalů (Hao et al., 2019).

Za předpokladu, že 100 % CHSK z přítoku na ČOV je přeměněno na  $\text{CH}_4$  a následně na elektrickou a/nebo tepelnou energii, platí následující přepočty (Hao et al., 2019):

1 g CHSK \_\_\_\_\_ 0,25 g  $\text{CH}_4$

Čistá entalpie  $\text{CH}_4$  \_\_\_\_\_ 890,5 kJ·mol  $\text{CH}_4$

Nátok 400  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  CHSK \_\_\_\_\_ 13,9 kJ·g<sup>-1</sup> (1.54 kWh·m<sup>-3</sup>)

V praxi není možné získat a využít celý teoretický potenciál chemické energie. Chemická energie totiž závisí nejen na množství biologicky odbouratelných CHSK zachycených v OV, ale také na účinnosti přeměny chemické energie v kogenerační jednotce a na spotřebě nebo ztrátě tepla při vyhnívání kalu. Chemický energetický potenciál musí být odvozen z podrobných údajů o dané ČOV. (Hao et al., 2019).

### **Tepelná energie**

Tepelná energie z OV se může využívat jak pro vytápění, tak i pro chlazení (Ceconet et al., 2020) a možnost instalace zařízení pro její rekuperaci existuje v celé trase OV, od místa vzniku přes odtok z budov až po kanalizační síť a přítok do ČOV (VELIKOVSKÁ et al., 2019). Dopady rekuperace tepla z OV na následné biologické procesy na ČOV jsou zanedbatelné (Ceconet et al., 2020) z hlediska změny teploty OV. Ovšem, snížení teploty při odběru tepelné energie přes tepelný výměník z OV o teplotě nižší než 10 °C by mohlo narušit průběh denitrifikace na ČOV (VELIKOVSKÁ et al., 2019). Měrná tepelná kapacita vody je přibližně 4,2 kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>, což znamená že 1 m<sup>3</sup> městské OV, jehož teplota se změní o 1 °C, obsahuje cca 4,2 MJ (1,0 x 10<sup>3</sup> kcal) tepelné energie (*Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, 2014). V porovnání s topením lze získat 1,16 kWh tepelné energie při ochlazování 1 m<sup>3</sup> OV. V průběhu roku v stokové síti pozorujeme relativně stabilní teploty v rozmezí od 10 až 15 °C v zimním období a někdy více než 20 °C v letním období. (VELIKOVSKÁ et al., 2019).

Využití tepelné energie z odváděné OV přímo v místě jejího vzniku je možné pomocí decentralizovaných systémů, které jsou vhodné pro rodinné nebo bytové domy. Tyto systémy umožňují okamžité předání tepla z OV (VELIKOVSKÁ et al., 2019). Rekuperační centralizované systémy pro získávání tepla z OV pracují buď na principu instalace výměníku tepla do nádrže, do které se přivádí OV z kanalizace, nebo přímo do kanalizačního systému se splaškovými OV (VELIKOVSKÁ et al., 2019).

Hlavní částí rekuperačního systému pro zpětné získání tepla z OV je tepelné čerpadlo a tepelný výměník. Pro tento systém je nezbytný minimální průměr kanalizace 400 mm až 800 mm s minimálním průtokem vody 9 L·s<sup>-1</sup>. Maximální vzdálenost mezi kanalizačním potrubím a spotřebitelem by měla být z důvodů hospodárnosti v rozmezí 200 až 300 m (*Clean energy from sewage*, 2018).

Aplikací tepelných výměníků lze uspořit až 40 % tepelné energie vznikající v domácnostech (VELIKOVSKÁ et al., 2019).

### **Hydraulická energie**

Hydraulická energie vody je rozdělena na kinetickou a potenciální. Potenciální energie vody je úměrná výšce sloupce vody a je rovná 9,8 kJ·m<sup>-3</sup> na 1 m výšky, zatímco kinetická energie je definována jako 0,18 kJ·m<sup>-3</sup> při rychlosti toku 0,6 m·s<sup>-1</sup>.

Technologie využívající energie OV povyužívá turbíny nebo jiná zařízení, která jsou nainstalována v potrubí nebo v kanálech, a jsou prioritně určena k výrobě elektrické energie z tekoucí OV (Mo & Zhang, 2013).



Instalací vhodných turbín, určených pro nízké spády a vysoké průtoky, je možné implementovat rekuperaci kinetické energie z OV. I přes vysokou korozi a velký podíl pevných látek v OV existuje několik úspěšných aplikací v kanalizačních systémech (Jorge et al., 2021).

### 3.1.3 Recyklace vyčištěné odpadní vody

Vyčištěná OV se opětovně používá pro zemědělské a krajinné zavlažování, průmyslové procesy, jako šedá voda pro splachování toalet, pro doplňování podzemních vod a podobně ("EPA, Guidelines for Water Reuse", 2004).

Používání opětovně získané vody k částečnému nahrazení zavlažování v zemědělství může zmírnit místní nedostatek vody. Živiny obsažené v OV mohou také snížit potřebu hnojení (Mo & Zhang, 2013). Nicméně stále existují obavy ohledně zdrojů a kvality OV, které mohou způsobovat potenciální znečištění půdy a kontaminaci plodin (Mo & Zhang, 2013). Další obavou je vysoká cena za výstavbu a provoz potrubních systémů opětovně získané vody kvůli obvykle velkým vzdálenostem mezi městskými zdroji opětovně získané vody a hlavními zemědělskými oblastmi (Leverenz et al., 2011).

Průmyslová odvětví spotřebovávají velké množství vody a vzhledem k tomu jsou ideálními kandidáty pro využití recyklované vody. Tyto aplikace nevyžadují vysokou kvalitu vody jako při zásobování pitnou vodou. Současná opětovná využití vody v průmyslu zahrnují zejména chladicí vodu, doplňovací vodu do kotlů a průmyslovou procesní vodu ("EPA, Guidelines for Water Reuse", 2004).

Využití recyklované vody v městských oblastech zahrnuje mimo jiné zavlažování zeleně a spotřebu vody pro komerční účely, jako je např. mytí vozidel, zajištění požární ochrany anebo splachování toalet. Rezidenční zavlažování je hlavní aplikací recyklované vody v městských oblastech a představuje zhruba polovinu celkové spotřeby vody v domácnostech ("EPA, Guidelines for Water Reuse", 2004).

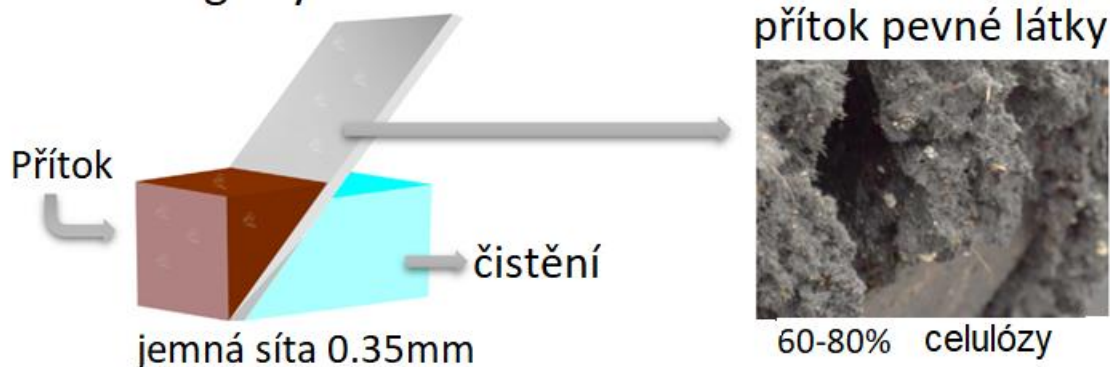
## 3.2 MOŽNOSTI ZÍSKÁVÁNÍ CELULÓZY Z ODPADNÍ VODY

Získávání celulózy z OV je v posledním desetiletí implementováno na několika ČOV, hlavně totiž v Evropě a v Severní Americe, kde se jedná primárně o alternativu pro primární odkalovače prostřednictvím navržených jemných sít (Espíndola et al., 2021). Charakterizace OV je pro tento způsob návrhu velmi důležitá, aby bylo dále možné předpokládat, jakou účinnost odstraňování a jakou hydraulickou kapacitu lze očekávat u daného síta (Rusten & Ødegaard, 2006). Jemná síta zahrnují stacionární síta, dále síta s rotujícím bubnem, a v neposlední řadě pak síta s rotujícím diskem a rotující pás se síty o velikosti 0,08 mm až 0,85 mm (Rusten & Ødegaard, 2006). Všechna síta mají jednoduché šnekové lisy pro odvodnění PCK, a to buď integrované, nebo jako samostatné jednotky (Rusten & Ødegaard, 2006).

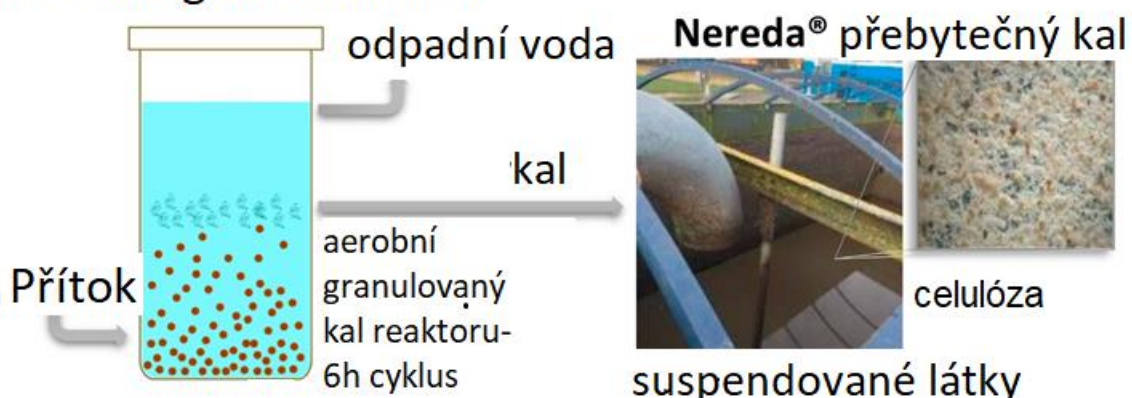
Celulózu lze získat proséváním surové OV, dále ze zpětného ČK nebo z přebytečného ČK např. technologií Nereda®. Na Obr. 2 je znázorněn proces získávání celulóзовých

vláken před biologickým stupněm čištění OV, který se provádí instalací jemných sít na přítoku OV na ČOV a dále pak je implementována separace celulózy po biologickém stupni čištění, tedy z přebytečného aerobního granulovaného kalu. Získaná celulóza se potom může dále používat jako zdroj pro výrobu celulózových nanokrystalů (Espíndola et al., 2021). Nereda® je technologie čištění OV, která vytváří aerobní granulovaný kal. Způsob regenerace celulózových vláken z přebytečného kalu na ČOV je stále předmětem výzkumu. Aplikace této technologie je aktuálně provozována na 16 ČOV o různých velikostech, od 12 500 EO (Kingaroy) přes 500 000 EO (Utrecht) až po 2 400 000 EO (Dublin) (Nereda® Aerobic Granular Biomass, 2020). Aplikace, která se v praxi široce uplatňuje je získávání buničiny TP z primárního kalu na ČOV.

### Před biologickým čištěním



### Po biologickém čištění



**Obr. 2** Separace celulózy před a po biologickém čištění (Espíndola et al., 2021)

Pro odstraňování pevných částic a OL z městských a průmyslových OV se používají jemná rotující pásová síta zobrazena na Obr. 3. Jedna z nejvíce používaných je technologie Salsnes (Salsnes Filter, 2017), která byla vyvinuta jako samostatná jednotka nebo jako doplněk k primárním zařízením na čištění OV. Rotační pásová síta Salsnes Filter se ukázala jako nejúčinnější pro primární čištění převážně městských OV. Tato síta mají proměnnou rychlost pásu od nuly a více, což usnadňuje ovládání sítím pomocí kontrolované filtrační podložky (Rusten & Ødegaard, 2006). Rotační pásová síta Salsnes Filter jsou také vybavena patentovaným vzduchovým nožem

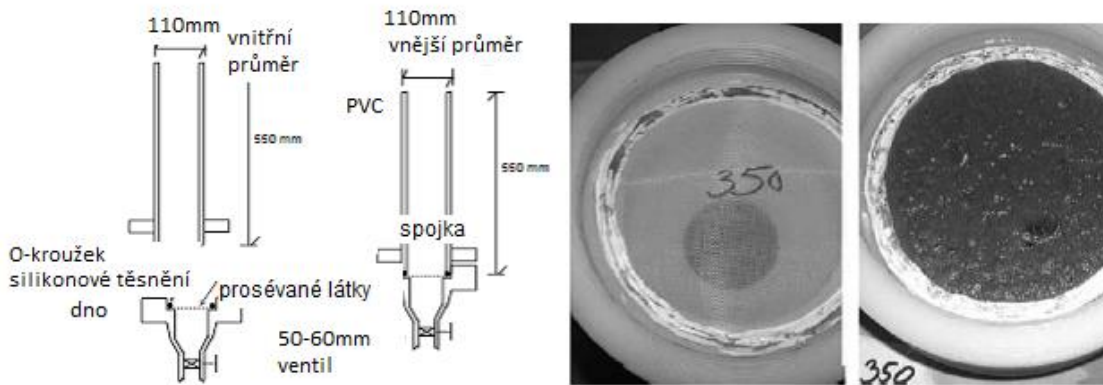
pro čištění pásu a tak vytváří produkt s vysokým obsahem sušiny (Espíndola et al., 2021).



**Obr. 3** Rotující pásová síta (Salsnes Filter SF6000) se síty o velikosti 0,35 mm (Rusten & Ødegaard, 2006)

Aplikací rotujících pásových sít Salsnes Filter (Salsnes Filter, 2017) dosahuje se požadovaná účinnost primárního stupně čištění. Podle charakteristik OV a požadované účinnosti odstraňování celulózových vláken, screeningové testy stanoví, jaká by měla být velikost návrhového síta z hlediska velikosti otvorů. Náčrt screeningového testovacího zařízení a fotografie čisté prosévané látky a prosévané látky s filtrační podložkou jsou zobrazeny na Obr. 4. Testovací zařízení se skládá z průhledné PVC (Polyvinylchlorid) trubice, která je označena ve dvou výškových bodech, konkrétně 200 mm a 300 mm nad povrchem síta. V první fázi je OV filtrována přes síto a ventil na dně zařízení je uzavřen. Následně je ventil částečně otevřen, což umožňuje postupné snižování hladiny vody v PVC trubici rychlostí 3 až 4  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jakmile na sítu vznikne adekvátní filtrační vrstva, ventil je plně otevřen, čímž se filtrovaná OV zachytává, zatímco hladina vody klesá z výšky 300 mm na 200 mm. Doba, po kterou dojde k poklesu hladiny vody z 300 mm na 200 mm, je zaznamenávána (Rusten & Ødegaard, 2006).

Provozní průtok přes síto se pohybuje v rozmezí od 20  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  do 300  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  a jeho optimální hodnota je 200  $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . Pro typické městské OV za normálních okolností vhodná jsou síta v rozmezí 0,25 až 0,50 mm, což se též stanoví screeningovým testem. V tomto rozmezí velikostí otvorů síta, jakmile se na sítu vytvoří filtrační koláč, neexistuje rozdíl ve výkonu síťových tkanin, s ohledem na procento odstranění suspendovaných látek a rychlost filtrace. Screeningové testy ukázaly, že OV, ve které se alespoň 20 % suspendovaných látek sestává z částic větších než 0,35 mm, je vhodná pro primární čištění jemnými síty. Pro OV, která byla původně klasifikována jako nepříznivá pro jemná síta, se může použít kationtový polymer na chemickou předúpravu. Šnekovým lisem se může odvodnit primární kal na přibližně 25–30 % celkových pevných látek (Rusten & Ødegaard, 2006).



**Obr. 4** Náčrt screeningového testovacího zařízení a fotografií čisté prosévané látky a prosévané látky s filtrační podložkou (Rusten & Ødegaard, 2006)

Obr. 5 ukazuje osm SFK600 Salsnes filtrů na ČOV Tomasjord v Norsku s kapacitou  $458 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  a maximální průtokovou kapacitou  $470 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ . Procento odstranění NL se pohybuje v rozmezí 40 až 60 %. Každá řada filtrů sdílí jeden šnek, který přepravuje PCK do odvodňovacích šnekových lisů, kde se vytváří PCK s obsahem sušiny mezi 30-40 % (Salsnes Filter-Municipal Installations, n.d.).

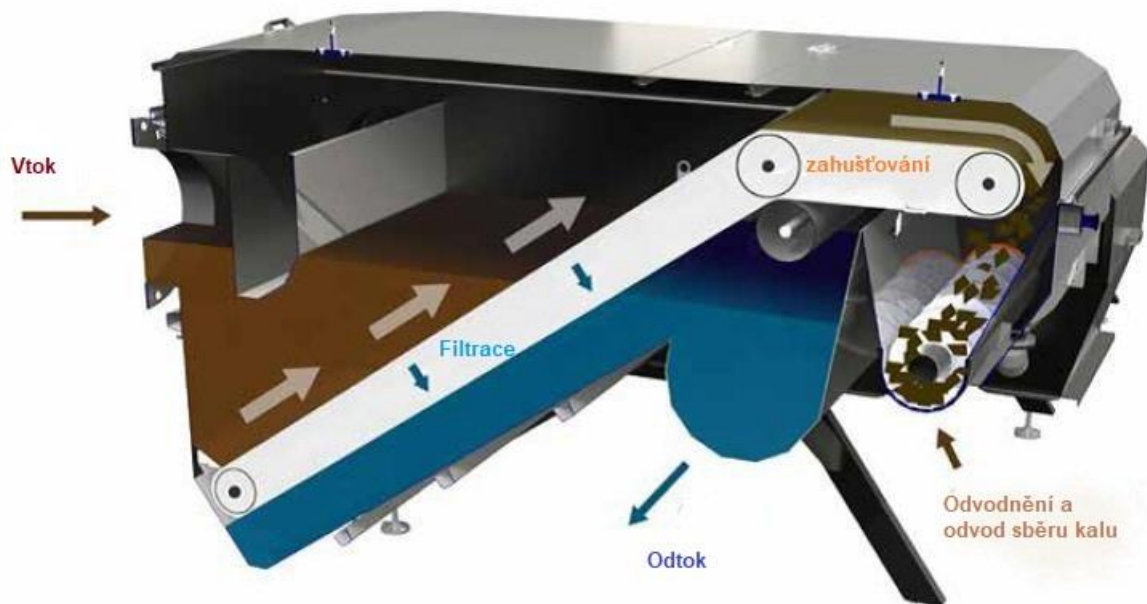


**Obr. 5** Osm SFK600 Salsnes filtrů na předúpravě  $1,650 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  OV na ČOV, Tomasjord v Norsku (Salsnes Filter-Municipal Installations, n.d.)

Na Obr. 6 je znázorněn proces odvodnění kalu pomocí Salsnes Filtrů, kde jsou separace, zahušťování a odvodňování dohromady v jedné kompaktní jednotce (Salsnes Filter, 2017), (Pikaar et al., 2022).

Proces odstranění pevných látek je realizován pomocí jemného síta s kontinuálním rotujícím pohybem. Pevné látky jsou zadržovány na sítu, kde vytvářejí vrstvu kalu. Během rotace síta se aktivuje patentovaný automatický systém dmýchání vzduchu, což vytlačuje zadržené částice ze síta do násypky síta a efektivně minimalizuje přenos pevných látek dále po síti. Tento postup je podporován patentovaným pravidelným oplachováním síta horkou vodou, což odstraňuje tuky a další nečistoty, které by se mohly přichytit na síťovou strukturu. K odvodnění zachycených pevných látek slouží

šnekový lis, zatímco čistý filtrát opouští jednotku a následně se vrací zpět do systému čištění OV.



**Obr. 6** Salsnes Filter - (Salsnes Filter, 2017), (Pikaar et al., 2022)

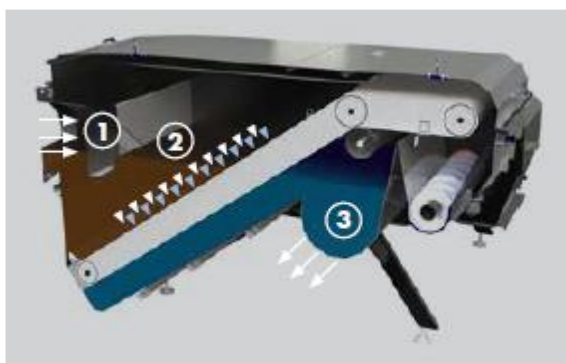
Technologický proces zahrnuje následující kroky: vstup OV, formování filtrační hmoty, filtraci, odvodňování filtrovaného OV, přepravu zahuštěného kalu, sběr kalu do nádrže, čištění filtračního síta a odvodňování separovaného PCK.

V **Tab. 1** je systematicky popsán postup separace celulósových vláken pomocí Salsnes filtrů po jednotlivých krocích od 1 až po 8. Technologický proces zahrnuje následující kroky: vstup OV, formování filtrační hmoty, filtraci, odvodňování filtrovaného OV, přepravu zahuštěného kalu, sběr kalu do nádrže, čištění filtračního síta a odvodňování separovaného PCK.

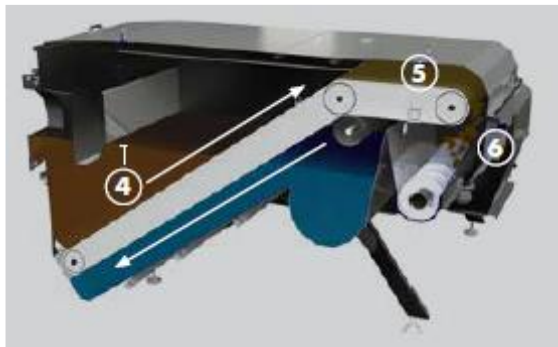
**Tab. 1** Postup odvodnění kalu pomocí Salsnes Filtrů (Salsnes Filter, 2017)

Grafické znázornění postupu separace

Jednotlivé kroky separačního procesu



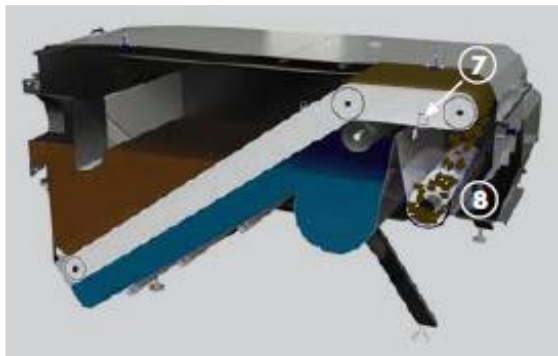
- i) OV vstupuje do vstupní komory.
- ii) Pevné látky nad filtračním sítem vytvářejí „filtrační koláč“ který zvyšuje výkon separace tím, že při hromáždění částic se otvory síta postupně zmenšují a na něm zůstávají stále menší částice.
- iii) Filtrovaná OV vytéká přes odvod.



iv) Hladina vstupné OV stoupá na určitou úroveň, kterou měří senzor a filtrační síto se začne otáčet jako dopravní pás, který přepravuje a zahušťuje kal.

v) Kal se gravitačně zahušťuje na 3 až 8 % suché materie.

vi) Kal klesá do nádrže.



vii) Pomocí vzduchu Air Knife systém automatického čištění odstraní všechny zbývající kal z filtračního síta do nádrže kalu.

viii) Před opuštěním jednotky šnekový lis dále odvodňuje PCK na 20–30 % sušiny.

Systém *Salsnes Filter* se používá pro instalaci v betonovém kanálu, v tomto případě na ČOV Salmar, Follafoss ( $2850 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) v Norsku, kde se oddělují celulózová vlákna z TP v primárním stupni čištění OV. Tento typ filtrů, model *SFK600*, znázorněný na Obr. 7, je určen pro montáž v otevřeném betonovém kanálu podle ukázky na stejném obrázku.



**Obr. 7** *Salsnes Filter* pro instalaci v betonovém kanálu na ČOV Salmar, Follafoss, Norsko  $2850 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  (*Salsnes Filter*, 2017)

OV protéká kanálem a prochází filtračním sítem, kde se oddělují pevné látky. Filtrační síto se otáčí a dopravuje kal nad hladinu vody kanálu do fáze zahušťování. Zahuštěný kal se poté sbírá do nádrže, a pak prochází procesem odvodnění a dezinfekce

(*Salsnes Filter*, 2017). Technické parametry filtrů typu *Salsnes Filter SFK600* jsou uvedené v Tab. 2.

**Tab. 2** Technické specifikace pro *Salsnes Filter SFK600* (*Salsnes Filter*, 2017)

Technické specifikace	Salsnes Filter SFK600
Maximální hydraulický průtok	576 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>
Průměrný průtok v procesu úpravy vody	325 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>
Účinnost odstranění celkového obsahu NL	30-80 % (záleží na projektu)
Obsah kalu po zahuštění	3-8 %
Obsah kalu po integrovaném odvodnění	20-40 %
Typická provozní spotřeba energie	2,3 – 5,0 kW
Rozměry (D x Š x V)	3 x 1,8 x 1,4 m
Velikost otvorů síta filtrů	350, 250, 150, 100, 40 mikronů

Skupina filtrů může tvořit modul pro požadovanou kapacitu, který umožňuje celou řadu instalačních konfigurací uvedených v Tab. 3.

**Tab. 3** Moduly *Salsnes Filterů* pro různé kapacity ČOV (*Salsnes Filter*, 2017)

Typ SF	Počet jednotek	Hydraulická kapacita pro 50-60% odstranění NL (L·s <sup>-1</sup> )	Hydraulická kapacita pro 40% odstranění NL (L·s <sup>-1</sup> )	Netto plocha kanálu a o dkalovací nádrže (m <sup>2</sup> )	Spotřeba energie při 40% odstranění NL (kWh)
Modul 4	1	200	400	30	17
Modul 6	1	300	600	40	25
Modul 8	1	400	800	60	34
Modul 10	1	600	1 200	80	42
Modul 12	1	800	1 600	100	51
Modul 12	2	1 600	3 200	230	102
Modul 12	4	3 200	6 400	460	204

Mechanická prosévací metoda na projekt ČOV Blaricum (30 000 EO) v Nizozemsku, která používá jemná síta (<0,35 mm) jako předúpravu pro biologické čištění městských OV, dává příležitost získat zdroje a zvýšit udržitelnost procesů čištění OV. Síta se tradičně používají pro jednostupňové mechanické zpracování (typické oko 0,35 mm) nebo v kombinaci s membránovým bioreaktorem (MBR) (typické oko > 0,7 mm). Když se na surovou OV používají síta s oky 0,35 mm, celulózová vlákna, která pocházejí hlavně z TP, jsou účinně odstraňována z přítoku s vysokou regenerací a čistotou. Použití síta jako předúpravy pro konvenční procesy aktivovaného kalu bylo vyhodnoceno na základě výzkumu pilotních zařízení na ČOV Blaricum v Nizozemsku (*SMART-Plant*, 2023).

### Způsoby získávání celulózy z odpadních vod, které jsou ve fázi výzkumu a předběžného testování:

i) Návrh biorefinerie PCK s cílem získávání mastných kyselin s krátkým řetězcem (*Short Chain Fatty Acid-SCFA*), využití P a CH<sub>4</sub>. PCK se odděluje dynamickým proséváním proti směru proudění a anaerobně se rozkládá k získání CH<sub>4</sub>. Jeho optimální acidogenní fermentační podmínky umožňují produkci cílených SCFA, zvyšují hodnoty PHA a zlepšují odstranění biologického P (Crutchik et al., 2018). Bylo popsáno maximální potenciální využití SCFA, zejména propionát, struvit a CH<sub>4</sub> z PCK. Na základě výsledků, optimální produkce propionátu byla získána fermentací PCK za mezofilních podmínek 37 °C a při počátečním pH mezi 7,5 a 8,0 (Crutchik et al., 2018).

ii) Zkoumání opětovného použití koncentrované OV z celulózy: mikrovlny a syntéza organických hnojiv s vlastnostmi zadržování vody. V této studii byla koncentrovaná celulózová OV opět použita k syntéze OL v hnojivu (které udržuje vodu) polymerizací podporovanou mikrovlnami. Organické hnojivo s vlastností zadržování vody bylo úspěšně připraveno z koncentrované celulózové OV přes mikrovlnnou troubu. Tento nový způsob opětovného použití OV z celulózy lze považovat za dobrý příklad recyklace celulózy (*Demonstration of an innovative process to produce biobased plastic out of cellulose recovered from domestic waste water*, 2021).

### **3.3 MATERIÁLOVÁ TRANSFORMACE CELULÓZY**

Celulóza je bohatá organická sloučenina s relativně vysokým energetickým potenciálem. Je to nejhojnější organický polymer na zemi, polysacharid vzorce (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>, chemicky homogenní lineární polymer obsahující až 10 000 molekul D-glukózy, který je spojen β-1,4 glykosidovými vazbami. Tvoří většinu buněčných stěn rostliny a v lidské potravě je důležitým zdrojem vlákniny. Modifikovaná celulóza může být přeměněna na širokou škálu derivátových produktů, jako jsou celofán, umělé hedvábí, bioplasty a stavební materiály. Správně oddělená a rafinovaná celulóza se může použít i pro výrobu biopaliv (Chen, 2014).

Celulóza v městských OV pochází hlavně z TP. Na ČOV západoevropských zemí celulóza se vyskytuje ve formě vláken TP (Wouters et al., 2017). Primární kal obsahuje velké množství biologicky odbouratelné organické sloučeniny, jako jsou bílkoviny, sacharidy a další OL. Mezi nimi celulóza tvoří přibližně 30 až 50 % NL v OV. Splachování TP může být považováno za ekologické ve srovnání např. s likvidací ve formě městského odpadu na toaletách a následným přepravováním na skládky nebo do spaloven, jak je to v zemích, kde kanalizační infrastruktura má problémy např. s ucpáváním (Crutchik et al., 2018).

Ve srovnání s bílkovinami a lipidy v OV, celulóza, jako druh sacharidů, je významným zdrojem C, nicméně podléhá mnohem pomalejší mikrobiální hydrolyze. Má nejvyšší podíl v nerozpustné frakci CHSK městské OV. Většina celulózy se v aktuálních podmínkách vysráží v procesu primárního čištění na ČOV. Vzhledem k tomu, že se vlákna TP během přepravy ve stoce nemění a celulóza z těchto vláken se obtížně



rozkládá v jednotce biologického čištění, většina celulózy se obvykle v rámci primárního stupně čištění vysráží nebo se mechanicky odstraňuje během primárního procesu čištění OV pomocí síta. Na konvencionálních ČOV je celulóza zpracována společně s přebytečným kalem z biologického čištění (Chen et al., 2017).

Proces enzymatické hydrolýzy omezuje rychlost degradace celulózy, což má vliv na její degradaci během konvenčních biologických úprav. Během 4-5 týdnů za aerobních podmínek se rozloží cca 60 % celulóзовého materiálu, a 40 % zůstává nerozložitelné v přebytečném kalu (Crutchik et al., 2018). V podmínkách eventuální AD přebytečného kalu, dalších 50 % přítomné celulózy se může rozložit. Experimentálně je potvrzeno 100 % rozložení celulózy po 8 dnech při teplotě 30 °C v anaerobních podmínkách, což mimo jiné potvrzuje, že je degradace celulózy pomalý proces. Přítomnost celulózy v aktivovaném kalu a procesy přeměny těchto vláken digescí je potřeba podrobněji prozkoumat (Crutchik et al., 2018).

Z důvodů pomalé odbouratelnosti celulózy v konvenčním procesu čištění a vzhledem k ostatním frakcím OL v městských OV a vzájemně velkém podílu v celkové OL, je atraktivní výzvou její odstranění hned na začátku, tedy v primárním stupni čištění OV na ČOV.

### 3.3.1 Opětovné využití celulózy

Celulóza v OV pochází hlavně z TP (Crutchik et al., 2018). Ve Střední a Západní Evropě se spotřebuje cca 10,8 kg (Statista, 2023) TP na osobu za jeden rok. Průměrná spotřeba TP na obyvatele za rok na různých kontinentech světa v roce 2023 je uvedena v Tab. 4 (Statista, 2023).

**Tab. 4** Průměrná spotřeba TP na obyvatele za rok (Statista, 2023)

Roční spotřeba TP na obyvatele	
Západní Amerika	9,95 kg
Střední a Západní Evropa	10,8 kg
Jižní Amerika	7,81 kg
Asie	5,61 kg
Afrika	3,18 kg

Celulóza je obecně atraktivní produkt pro opakované použití v mnoha výrobcích a procesech. Celulóza získaná z PCK z ČOV se může znovu použít na výrobu zelené energie, tedy jako bioenergetický zdroj pro výrobu pelet z biomasy, bioetanolu a bioplynu v anaerobním reaktoru (Cirtec, 2023) nebo jako surovina pro výrobu biomateriálů, například bioplastů (Cellvation, 2018). Využívá se také při výrobě vysoce kvalitních produktů z čistých celulóзовých vláken (SMART-Plant, 2018), které splňují hodnocení třídy a podle Environmental Protection Agency (EPA) (Cellulose Products Manufacturing Risk and Technology Review, n.d.) pro celulóзовé výrobky (SMART-Plant, 2018).

Popsané jsou dostupné metody regenerace pro zpětné získání celulózy aplikované na čtyřech městských ČOV v Nizozemsku: Ulrum (80 000 EO), Beemster (170 000 EO), Geestmerambacht (100 000 EO) a Aarle-Rixtel (272 000 EO). Zde je instalována technologie *CellCAP Finescreen* pro separaci celulózových vláken z TP na surové OV pro různé účely s důrazem na výrobu biopaliv z celulózy. Získaný PCK se zpracovává na výrobu zelené energie (výroba bioplynu, biopaliva) a biomateriálů (celulóza, bioplasty, fosfáty), také na plasty, izolace, výrobu papíru, stavebních materiálů a pro další průmyslová odvětví (*Cellvation*, 2018).

*Cellulose Assisted Dewatering of Sludge* (CADoS) (Wouters et al., 2017) projekt-odvodňování PCK z ČOV (pilot projekt, provozní prototyp na ČOV Ulrum (80 000 EO), Nizozemsko) se zaměřuje na opětovné použití celulózy z TP oddělením celulózových vláken od surového městského odpadu vody pomocí vyhrazeného *finescreening* procesu. CADoS je v provozu jako plnohodnotný prototyp v ČOV v Nizozemsku.

Technologie pro regeneraci celulózy z OV pro ČOV až do 80 000 EO, umístěna na ČOV Ulrum (80 000 EO) je zaměřena na separaci celulózových vláken z TP z OV pomocí technologie jemného čištění (*Cirtec*, 2023). Odvodněný kal v rámci projektu CADoS (Wouters et al., 2017) a buničina jsou transportovány do kontejneru a následně pak přepravovány kamionem do posledního bodu procesu, kde se vyrábí bioplyn (určený pro vytápění domácností, palivo pro automobily atd.), ale také jako surovina pro bioplasty (*Cirtec*, 2023).

ČOV Beemster (170 000 EO), Amsterdam, Nizozemsko využívá osm *Salsnes filtrů SF600* k oddělení jemných celulózových vláken z TP z OV. Vlákná se shromažďují a rozkládají na sacharidy a v dalším cyklu na mléčné kyseliny, které tvoří základní surovinu pro výrobu bioplastů.

*Cellu2PLA* projekt představuje konverzi celulózy na polylaktickou kyselinu (PLA-Poly Lactic Acid). PLA je bioplast, který může nahradit plasty na bázi ropy. Je biologicky rozložitelný a vyroben z obnovitelných zdrojů. Jako zdroj v projektu *Cellu2PLA* se používá buničina TP z městských OV. Získává se speciální fermentací, kde jsou mastné kyseliny zdrojem potravy pro bakterie, a ty produkují PLA, ze kterého se později vyrábí bioplast. Pomocí aplikace *Cellu2PLA* s velmi jemným sítem můžeme z OV odstranit velké množství pevných látek (přibližně 70 % z toho je TP). Odstraněním celulózových vláken pomocí technologie *Cellu2PLA* nové ČOV mohou ušetřit provozní náklady a ekonomicky zhodnotit získaná vlákna, například nechat je fermentovat do bioplynu. Aby bylo možné použít celulózová vlákna, ta musí projít procesem čištění a až poté je lze znovu použít na výrobu kartonů, krabic nebo nového TP. V současnosti se čerstvá celulózová vlákna často přidávají do asfaltových vrstev, aby se zabránilo usazování a propadání (*Demonstration of an innovative process to produce biobased plastic out of cellulose recovered from domestic waste water*, 2021).

Pomocí technologie *Cellvation* na ČOV Geestmerambacht (100 000 EO) v Nizozemsku je technicky možné extrahovat čistou celulózu z OV, která je k dispozici jako surovina. Instalace *Cellvation* na ČOV Geestmerambacht vyrábí cca 400 kg čisté celulózy denně (*SMART-Plant*, 2023). Realizace projektu

*CellVation* na ČOV Geestmerambacht je součástí inovativního projektu *Horizont 2020 „SMART Plant“* (SMART-Plant, 2023). Technologie *CellCap* je instalována na místě Geestmerambacht a produkuje kolem 400 kg čisté regenerované celulózy denně. Část této celulózy se používá jako surovina pro biokompozit. Zbývající celulóza je k dispozici pro vývoj dalších produktů. Materiál, který je izolován na začátku čištění konečnými buňkami *CellCap* se nazývá celulózová projekce. Tento materiál se skládá ze 70 až 80 % celulózy, zejména tedy z TP, ale také z vlasů, tuku, písku a dalších přísad.

Na ČOV Aarle-Rixtel (272 000 EO) v Nizozemsku, k získávání celulózy z OV pro opětovné použití byl nainstalován v roce 2014 systém na recyklaci OV pro 272 000 EO. Tento proces zaručuje 30 % snížení objemu produkce kalu množstvím získané celulózy (až 1 tuny denně) při 25 % obsahu suché hmoty a celkové snížení nákladů na ČOV o 15–30 %. Denní produkce vláken dosahuje 5 074 kg. Výsledkem je čistý pasterizovaný produkt, který je šetrný k životnímu prostředí - *Recyklóza* (recyklovaná celulóza). Tento výrobek je vhodný pro použití na výrobu plastů, izolací, při výrobě papíru, ve stavebnictví, k výrobě biopaliv a v dalších průmyslových odvětvích. Systém funguje tak, že surová OV prochází mechanickým čištěním a je čerpána do systému pro recyklaci OV-SRS (*Sewage Recycling System*). Při tomto procesu se používají pouze fyzikální vlastnosti (teplý vzduch nebo horká voda). Čistší OV je poté vrácena do ČOV k dalšímu dočištění. Surový produkt ze *Recyklózy* se potom zahřívá, čistí a suší, dokud není obsah vody nižší než 20 %. Vysušená směs *Recyklózy* ve formě buničiny se dále stlačuje. Tak vznikají CP, které jsou vhodné pro dlouhodobé skladování, přepravu a použití. Výrobky z *Recyklózy* by měly být skladovány za kontrolovaných podmínek vlhkosti (*Installation of SRS (Sewage Recycling System) at Aarle-Rixtel WWTP*, 2014).

### 3.3.2 Energetické využití celulózy

Energetické využití surové OV na ČOV minimalizuje požadavky na fosilní energie a vede k rozvoji energeticky neutrálních ČOV. Energetická hodnota OV je několiknásobně vyšší než energie potřebná k jejich čištění. Je potřeba maximálně využít chemicky vázanou energii modernizací technologií AD (Akyol et al., 2020).

Jemná prosetá frakce (*Fine Sieved Fraction- FSF*), v této práci označovaná též jako PCK, z OV na ČOV v západoevropských zemích se skládá z cca 60–80 % celulózy, zatímco zbývající podíl zahrnuje vlákna, písek a jíly (Ghasimi et al., 2016). FSF filtrovatelných látek celulózy v procesu primárního čištění proséváním jemnými filtry může být použita pro rekuperaci energie na místě pomocí AD, tedy místo oxidace v provzdušňovací nádrži. Avšak je třeba dbát na to, aby požadovaná kapacita odstraňování živin zůstala nedotčena. Přeměna FSF na CH<sub>4</sub> při vysokém obsahu suchých pevných látek může přispět k snížení požadavků na fosilní energii na konvenčních ČOV. FSF je heterogenní substrát izolovaný ze surových splaškových OV, který se skládá převážně z částečně rozpuštěného TP (s vysokým podílem celulózy), vlasů, sloučenin ligninu, jako jsou listy a skořápky z ovoce, jakož i

písku a nedefinovaných materiálů. Složení FSF obsahuje 60–80 % celulózy, 5–10 % hemicelulózy, 5–10 % ligninu, 5–10 % oleje a zbytek tvoří anorganické soli (5–10 %) (Ghasimi et al., 2016).

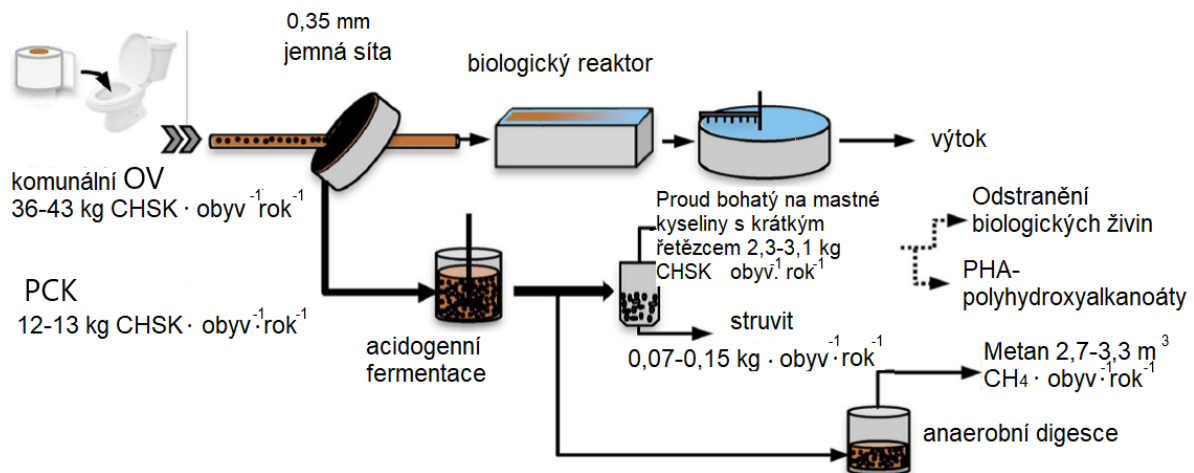
Potenciál konečného využití získaných materiálů s ohledem na požadavky trhu celkově velmi ovlivňuje jeho roli v oběhové ekonomice (Akyol et al., 2020).

Regenerovaná celulóza a sušená vlákna nebo stlačené CP (*Recell®*) jsou produkty, které lze extrahovat z městské OV jemným proséváním (proces *Cellvation®*) a mají energetickou hodnotu. Celulózová vlákna a CP jsou znázorněna na Obr. 8. CP jsou suché a snadné pro manipulaci, s obsahem celulózy 60-80 % (*SMART-Plant*, 2023).



**Obr. 8** Celulózová vlákna a CP (*SMART-Plant*, 2023)

Bez nutnosti předúpravy může 1 000 kg *Recyllose™* vyprodukovat až 500 L vysoce kvalitní bionafty. *Recyllose™* je nejvhodnějším materiálem pro výrobu bionafty ve srovnání s 20 dalších recyklovaných materiálů jako jsou kukuřice, cukrová třtina, dřevěné palety apod. Obsahuje převážně celulózová vlákna (60-80 %), olej (8-10 %) a minerály (3-12 %) (*Recyllose - Products From Sewage*, n.d.). Schéma biorafinérie PCK je znázorněna na Obr. 9 (Crutchik et al., 2018). Výstupní data jsou spočítána pro vstup 36 až 43 kg CHSK na obyvatele za rok, což odpovídá 12 až 13 kg CHSK z TP na obyvatele za rok. PCK lze oddělit pomocí dynamického síta a následně AD k získání 2,7 až 3,3 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> na osobu za rok. Optimální kyselé fermentační podmínky PCK umožňují výrobu mastných kyselin s krátkým řetězcem 2,3 až 3,1 kg CHSK na osobu za rok. Optimální podmínky pro dosažení nejvyšší produkce propionátu jsou teplota 37 °C a nastavení pH na hodnotu 8. To lze přičíst efektivitě hydrolýzy celulózních materiálů, a to až 44 %. Během acidogenní fermentace zachyceno je kolem 88 % P, což odpovídá až 0,15 kg struvitu na osobu za rok.

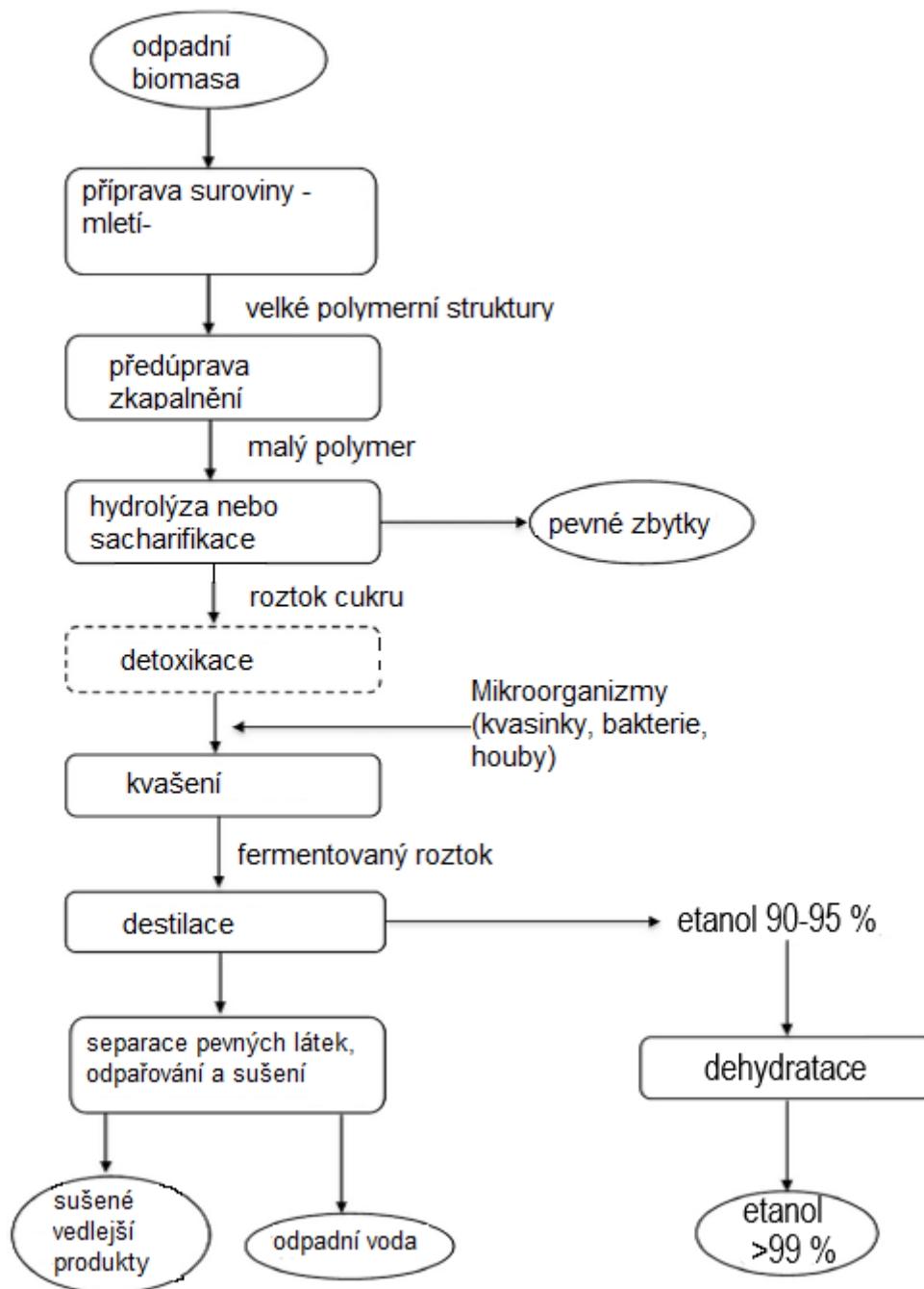


**Obr. 9** Biorafinerie primárního PCK

*Recyllose<sup>TM</sup>* se velmi dobře rozkládá v mezofilních a termofilních anaerobních podmínkách. Bylo zaznamenáno, že z TP se přeměnilo 70 % CHSK a z celulózy 90 % obsaženého CHSK (*Installation of SRS (Sewage Recycling System) at Aarle-Rixtel WWTP, 2014*).

Dostupné komerční aplikace *Recyllose<sup>TM</sup>* z aspektu energetického použití jsou kotle na dřevo a paliva na biomasu, kde se doporučuje míchání s jinými palivy, a to zejména z důvodu tvorby strusky, způsobené obsahem popela a nízkou teplotou tání, nižší než 1000 °C u 95 % vzorků (*Installation of SRS (Sewage Recycling System) at Aarle-Rixtel WWTP, 2014*). Blokový diagram procesu výroby bioetanolu z biomasy je znázorněn na Obr. 10, kde je ukázána výroba etanolu z odpadních zdrojů lignocelulóзовého a/nebo škrobového původu. Hlavní kroky tohoto technologického procesu lze kategorizovat následujícím způsobem:

- i) příprava suroviny včetně zmenšení velikosti vstupního materiálu mletím, drtěním nebo sekáním,
- ii) předúprava fyzikálně-chemickými nebo biologickými metodami, jako jsou párová exploze, kyselé, alkalické nebo mikrobiální procesy,
- iii) uvolňování fermentovatelných cukrů hydrolýzou nebo krystalizací s využitím mikrobiálních enzymů bakteriálního nebo plísňového původu,
- iv) fermentace s využitím mikroorganismů (kvasinek, bakterií nebo hub),
- v) destilace s výrobou etanolu.



**Obr. 10** Obecný blokový vývojový diagram výroby bioetanolu z odpadní biomasy (Nair et al., 2017)

Byly porovnány základní charakteristiky kalu z jemných sít s kalem z procesu konvenčního primárního čištění z hlediska jejich energetického potenciálu se zaměřením na AD a/nebo spalování. Byl analyzován obsah suchých pevných látek, těkavých látek, CHSK, také výhřevnost a metanový potenciál. Výsledky prokázaly, že kaly u jemných sít mají výrazně vyšší obsah těkavých látek a vyšší metanový potenciál než primární kaly. Energetický potenciál kalu je zvýšený, pokud se k primární úpravě používají jemná síta místo konvenčního mechanického čištění na ČOV s AD. Pokud kaly z procesu primárního čištění mají být spalovány nebo používány jako palivo v cementářských pecích, není významný

rozdíl v energetickém potenciálu (udávaný jako výhřevnost) pro dva typy primárního čištění (Paulsrud et al., 2014) .

Odpadní biorafinerie poskytují výrobu energie a odpad je používán jako potenciální surovina v různých biorafinérských technologiích. Druhy procesů přeměny odpadů na energii, produkty, které vznikají těmito procesy a jejich aplikace na výrobu energie, zdrojů a surovin jsou uvedeny v tabulce, kde jsou znázorněny čtyři základní typy procesů přeměny, na kterých je založen koncept biorafinerie: biologická, chemická, termochemická a fyzikální přeměna. Pro každý typ procesu jsou vyjmenovány konkrétní postupy. V rámci těchto procesů jsou uvedeny produkty, které z nich vznikají, a aplikace, kde lze daný produkt uplatnit (Nizami et al., 2017).

Tab. 5, kde jsou znázorněny čtyři základní typy procesů přeměny, na kterých je založen koncept biorafinerie: biologická, chemická, termochemická a fyzikální přeměna. Pro každý typ procesu jsou vyjmenovány konkrétní postupy. V rámci těchto procesů jsou uvedeny produkty, které z nich vznikají, a aplikace, kde lze daný produkt uplatnit (Nizami et al., 2017).

**Tab. 5** Procesy přeměny odpadů do energie a výrobků s přidanou hodnotou (Nizami et al., 2017)

Biologická přeměna	Produkt	Aplikace
AD	Bioplyn	Energie, teplo, chemikálie, motor, kotle
Kvašení	Kapaliny	Energie, teplo, chemikálie, motor, kotle
Enzym	Etanol, aminokyselina	Energie, teplo, chemikálie, paliva, olej
Aerobní trávení (kompostování)	Organominerální hnojivo	Zemědělství
Chemická přeměna	Produkt	Aplikace
Hydrolyza	Celulóza, hemicelulózy, lignin	Chemikálie/výrobky s přidanou hodnotou
Extrakce rozpouštědlem	Primární/sekundární metabolity	Chemikálie/výrobky s přidanou hodnotou
Superkritická konverze	Celulóza, hemicelulózy, lignin	Chemikálie/výrobky s přidanou hodnotou
Transesterifikace	Bionafta	Energie, palivo
Palivo vyrobené z odpadu	Tuhé palivo (pelety)	Elektrárny, energie, teplo
Termochemická přeměna	Produkt	Aplikace
Zkapalnění	Těžký olej	Kotle, energie, teplo, motor
Pyrolýza	Plyn/kapalné palivo, PUP	Kotle, energie, teplo, motor, chemikálie
Zplyňování	Syngas-palivový plyn	Kotle, energie, teplo, motor, chemikálie
Spalování	Horké výfukové plyny	Teplá voda, energie, teplo, kotle

Fyzická přeměna	Produkt	Aplikace
Mechanická extrakce	-	-
Briketování biomasy	Brikety	Elektřina, teplo, palivo
Destilace	-	-

Technologie AD je považována za základní technologii pro využívání zdrojů a energie. Hlavní výhodou AnMBR je schopnost regenerovat většinu energetického potenciálu z OV, který se v současné době využívá při aerobně-anaerobním čištění. Systémy kombinované výroby tepla a elektřiny využívající AD kalu uvedené v Tab. 6 se staly nejpoužívanějšími technologiemi v současných energeticky soběstačných ČOV. V Tab. 6 je prezentováno pět technologií, které kombinují AD, membránovou technologii, fermentaci, odvodnění a následnou úpravu, přičemž dochází k obnově energie ve formě CH<sub>4</sub> a získání recyklované vody pro další využití. Udaje v Tab. 6 ukazují, které zdroje a energie je možné zpětně získat pomocí určitých technologií, které kombinují uvedené procesy (Akyol et al., 2020).

PCK lze anaerobně rozložit za účelem výroby bioplynu nebo těkavé mastné kyseliny za optimálních acidogenních podmínek fermentace. Celulózu lze účinně využít k výrobě cenných chemikálií nebo biopaliv, jako jsou těkavé mastné kyseliny, kyselina polymléčná a bioetanol. Hodnota biomasy celulózy pro výrobu bioplynu a bioenergie je nižší než hodnota ostatních zdrojů, které jsou pro tento účel využívány. Využití celulózy je výhodnější pro získávání zdrojů než procesy v papírenském a kartonovém průmyslu, vzhledem k nákladům, které vyžaduje dezinfekce (Akyol et al., 2020).

Větší hodnota byla odvozena z valorizace PCK na těkavé mastné kyseliny a struvit z fermentační kapaliny. CH<sub>4</sub> byl poté znovu získán při AD zbývajících fermentačních pevných látek. Proto produkce těkavých mastných kyselin a struvitu před biometanizací vede ke zvýšení tržní hodnoty PCK (Akyol et al., 2020).

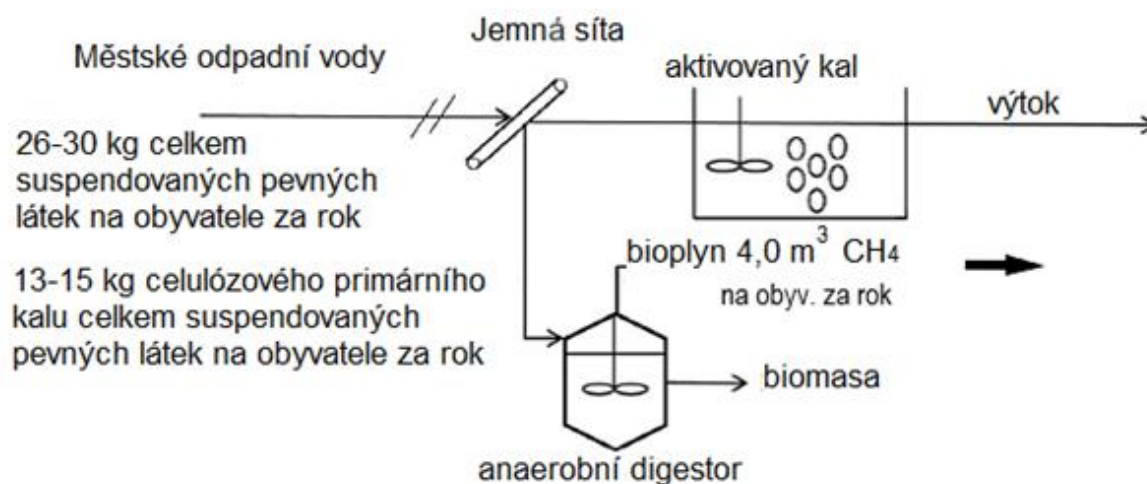
**Tab. 6** Obnova zdrojů pro různá schémata anaerobních procesů na ČOV (Akyol et al., 2020)

Technologie	Obnova zdrojů
Anaerobní proces + následná úprava	CH <sub>4</sub>
AnMBR + následná úprava	CH <sub>4</sub> , znovupoužití vody
Aerobní membrána + AD + odvodnění	CH <sub>4</sub> , N, P, znovupoužití vody
Membrána (dvoustupňová) + AD + odvodnění	CH <sub>4</sub> , N, P, znovupoužití vody
AD/fermentace + membrána	CH <sub>4</sub> , těkavé mastné kyseliny

PCK lze oddělit předúpravou dynamickým proséváním a AD, přičemž se dá získat až 4,02 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> na obyvatele za rok. Optimální acidogenní podmínky fermentace celulóзовého primárního kalu umožňují produkci cílených SCFA až 2,92 kg CHSK na obyvatele za rok. Obsah propionátu zde může být více než 30 %, což vede k optimalizaci procesů odstraňování biologického P nebo PHA (Crutchik et al., 2018). Komparativní schéma valorizace PCK na ČOV s konceptem bez biorafinerie je znázorněna na Obr. 11, a s konceptem biorafinerie na Obr. 12.

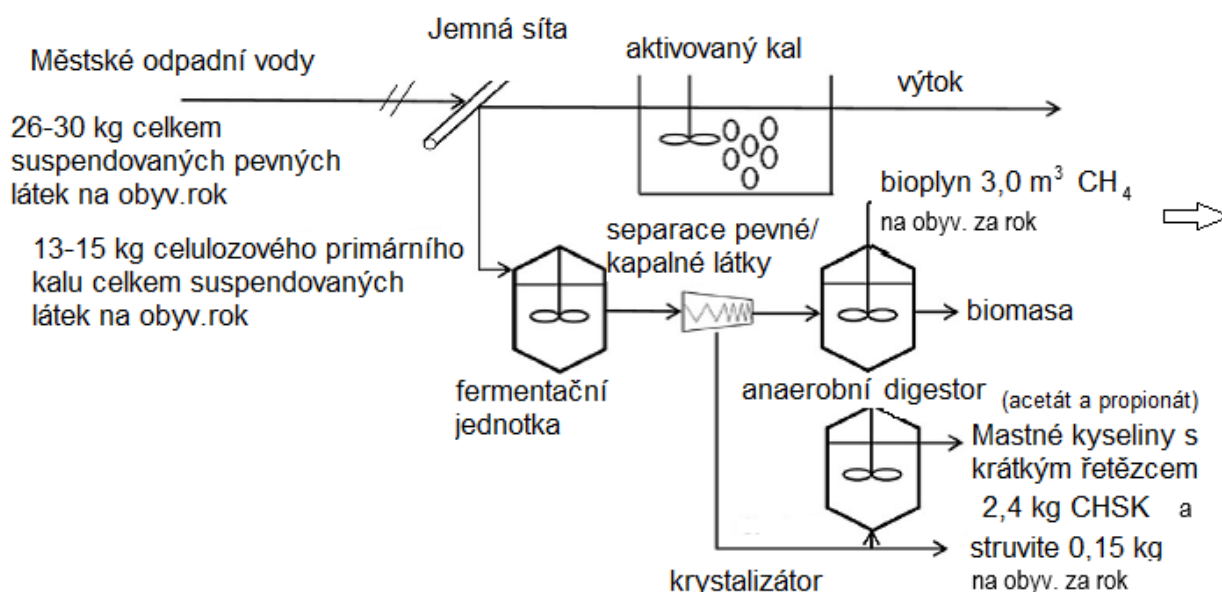


Jeden obyvatel ročně do městských OV vypouští přibližně 36 až 43 kg CHSK. Pozorovaná průměrná účinnost odstraňování CHSK při prosévání městských OV se pohybuje mezi 10 a 60 %, přičemž lze získat 12 až 13 kg CHSK na obyvatele za rok ve formě suspendovaných pevných látek z městských OV, jak je ukázáno na Obr. 11. Zároveň je patrné, že PCK může produkovat až  $0,30\text{--}0,34 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$  CHSK, což odpovídá  $3,7\text{--}4,5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$  na obyvatele za rok (Crutchik et al., 2018).



**Obr. 11** Schéma valorizace PCK na současných ČOV (Crutchik et al., 2018);

Ve scénáři konceptu biorefinérie, založeném na separaci PCK, jak je ukázáno na Obr. 12, s ohledem na pozorovanou produkci SCFA lze produkovat přibližně 3,0 kg CHSK na obyvatele za rok pomocí fermentace PCK. Avšak při implementaci fermentační jednotky PCK, jak ukazuje Obr. 12, mohlo by být vyprodukováno přibližně  $2,7\text{--}3,3 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$  navíc na obyvatele za rok reziduálního  $\text{CH}_4$ . Kromě toho, během fermentace PCK se uvolňují živiny a cca 88 % P by mohlo být získáno ve formě struvitu, což odpovídá  $0,07\text{--}0,15 \text{ kg}$  struvitu na obyvatele za rok.



**Obr. 12** Schéma valorizace na ČOV s konceptem biorefinerie PCK (Crutchik et al., 2018)

Optimální podmínky při 37 °C (ze třech různých teplot 37, 55 a 70 °C) a pH8 (ze třech různých počátečních hodnot pH 8, 9 a 10) pro optimalizaci celkových SCFA a obsahu propionátu z fermentace PCK, aplikované na sekvenční vsádkový fermentační reaktor, vedly k získání nejvyšší produkce propionátu (100-120 mg CHSK·g<sup>-1</sup> celkem těkavé pevné látky denně). To dále vedlo k vyšší účinnosti hydrolyzy celulósových materiálů (až 44 %), což zvýšilo selektivní růst *Propionibacterium acidipropionici* ve fermentační půdě až na 34 % (Crutchik et al., 2018).

Proces hydrolyzy během konvenčních biologických úprav v ČOV omezuje rychlost degradace celulózy. V aerobních podmínkách 60 % celulósového materiálu je odbouráváno během 4 až 5 týdnů, zatímco 40 % přetrvává nedegradováno v přebytečném kalu. Pokud je dosaženo AD přebytečného kalu, může dojít k degradaci dalších 50 % přítomné celulózy. Odhadnutá potenciální tržní hodnota pro zpětně získané materiály v tomto procesu se může ztrojnásobit oproti konvenčnímu scénáři využití bioplynu na současných městských ČOV (Crutchik et al., 2018).

Termofilní adaptovaná biomasa je pro degradaci frakce proseté jemnými síty vhodnější než mezofilní kal. Vyšší hodnoty specifické metanogenní aktivity, biometanového potenciálu, míra specifické produkce CH<sub>4</sub>, konstanta hydrolyzy a anaerobní biologická rozložitelnost jsou nalezeny za termofilních podmínek pro všechny poměry R<sub>1/S</sub> (inokula k substrátu) ve srovnání s mezofilní digescí (Ghasimi et al., 2016).

Specifická metanogenní aktivita určuje rychlostní kapacitu metanogenních mikroorganismů a jeho schopnost převést acetát na CH<sub>4</sub> v anaerobním systému (Ghasimi et al., 2016).

Biometanový potenciál čistá produkce metanu na gram těkavé pevné látky přidané během celé doby inkubace za standardních teplotních a tlakových podmínek (273 K, 100 kPa), což se vyjadřuje v jednotce mL CH<sub>4</sub>·g<sup>-1</sup> substrátu těkavé pevné látky (Ghasimi et al., 2016).

Míra specifické produkce CH<sub>4</sub> je denně produkovaný objem CH<sub>4</sub> přidáním gramů těkavé pevné látky inokula (mL CH<sub>4</sub>·g<sup>-1</sup> přidané těkavé pevné látky) (Ghasimi et al., 2016).

Konstanta hydrolyzy popisuje rychlost degradace a obvykle následuje kinetiku prvního řádu za předpokladu, že není omezen růst, což reprezentuje nulovou inhibici a v podstatě žádný nedostatek makroživin nebo mikroživin (Ghasimi et al., 2016).

Anaerobní biologická rozložitelnost je vyhodnocena jako naměřená konečná produkce CH<sub>4</sub> (vyjádřená v CHSK) přes počáteční celkovou CHSK substrátu (Ghasimi et al., 2016).

V Tab. 7 jsou znázorněny průměrné hodnoty využití energie, uvedené s odchylkou od středních hodnot menších než 5 %, také odhad výroby elektřiny pomocí digesce jemně proseté frakce (Ghasimi et al., 2016). Jak je uvedeno v Tab. 7, termofilní štěpení FSF

prokazuje vyšší hodnoty ve všech parametrech ve srovnání s mezofilními podmínkami. Pro různé poměry inokula k substrátu  $R_{I/S}$  jsou v Tab. 7 prezentovány parametry produkce  $CH_4$ , bioplynu, výhřevnosti, energie a rychlosti produkce bioplynu pro mezofilní a termofilní podmínky digesce FSF (Ghasimi et al., 2016).

**Tab. 7** Průměrné využití energie a odhad výroby elektřiny z mezofilní (horní, 35 °C) a termofilní (spodní, 55 °C) digesce jemně proseté frakce (Ghasimi et al., 2016)

$R_{I/S}$ - poměry inokula substrátu	$CH_4$ ( $N\ m^3 \cdot t^{-1}$ jemně proseté frakce)	Bioplyn ( $N\ m^3 \cdot t^{-1}$ jemně proseté frakce)	$MJ \cdot t^{-1}$ jemně proseté frakce (celková kombinovaná výroba tepla a elektřiny)	Jemně prosetá frakce-ef. 40 % ( $kW\ h \cdot t^{-1}$ )	$CH_4$ ( $m^3 \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$ )	Bioplyn ( $m^3 \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$ )
<b>Mezofilní podmínky (35 °C)</b>						
0.5	12	22	444	49	0,6	1,1
1	31	55	1 121	125	0,5	0,8
3	68	119	2 430	270	0,6	1,0
5	64	112	2 293	255	0,4	0,7
10	62	110	2 236	248	0,3	0,5
15	65	115	2 337	260	0,2	0,4
<b>Termofilní podmínky (55 °C)</b>						
0.5	74	139	2 635	293	3,3	6,2
1	72	137	2 595	288	2,2	4,2
3	74	140	2 664	296	1,0	1,9
5	70	131	2 495	277	0,7	1,4
10	65	124	2 343	260	0,4	0,8
15	66	124	360	262	0,3	0,6

Fyzikálně-chemická analýza reaktorového roztoku ukázala, že látky podobné proteinům byly přítomny ve vyšších koncentracích za termofilních podmínek než za mezofilních podmínek při všech aplikovaných  $R_{I/S}$ , což naznačuje zvýšené množství enzymů a tím také vyšší rychlost přeměny substrátu při vysokých teplotách (Ghasimi et al., 2016). Srovnání hodnot základních parametrů biometanového potenciálu v mezofilních a termofilních podmínkách je uvedeno v Tab. 8. Dále v Tab. 8 jsou uvedeny hodnoty biometanového potenciálu v závislosti na provozní teplotě, obsahu sušiny, pH, výtěžku plynu, maximální rychlosti produkce plynu a organickém zatížení, pro termofilní a mezofilní podmínky (Ghasimi et al., 2016).

**Tab. 8** Provozní podmínky a výroba bioplynu z mezofilní a termofilní digesce jemně proseté frakce (Ghasimi et al., 2016)

Parametry	Biometanový potenciál (mezofilní)	Biometanový potenciál (termofilní)
Provozní teplota (°C)	35 ± 1	55±1
Sušina (%)	23	23
pH	7,0 ± 0,1	7,4 ± 0,1
Retenční čas (den)	2,5–5,0 (R <sub>V/S</sub> = 3–15)	1,8–6,1 (R <sub>V/S</sub> = 0,5–15)
Výtěžek plynu (N m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	119 (R <sub>V/S</sub> = 3)	139–140 (R <sub>V/S</sub> = 0,5–3)
Maximální rychlost produkce plynu (m <sup>3</sup> v reaktoru na den)	1 (R <sub>V/S</sub> = 3)	6,2 (R <sub>V/S</sub> = 0.5)
Organické zatížení (těkavé pevné látky)	9 kg VS·m <sup>-3</sup> or 14.4 kg CHSK·m <sup>-3</sup> (R <sub>V/S</sub> = 3) (58 % konverze)	60 kg VS·m <sup>-3</sup> nebo 93,5 kg CHSK·m <sup>3</sup> (R <sub>V/S</sub> = 0,5) (61 % konverze)

### Metanogenní degradace celulózy z TP na ČOV v anaerobním membránovém bioreaktoru při pokojové teplotě

Celulóza z TP s bohatými, ale vůči procesu odolnými zdroji C je hlavní nerozpustná frakce CHSK v OV. V AnMBR nastaveném na pokojovou teplotu při čištění OV a s důrazem na účinnost metanogenní degradace TP bylo dosaženo vysoké organické redukce (95 %), vysoké přeměny CH<sub>4</sub> (90 %) a nízkého výtěžku kalu (0,08 g těkavých suspendovaných pevných látek v g CHSK). Celulóza z TP byla plně biodegradována bez akumulace ve směsi kapaliny a membránového kalového koláče. Účinnost biokonverze TP je skoro 100 % při vysoké míře organické zátěže 2,02 g CHSK·L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup> a může poskytnout přibližně 26 % celkové tvorby CH<sub>4</sub> pro veškerou organickou zátěž. Dlouhou retenční dobou kalu a rozkladem nerozpustných/rozpustných frakcí CHSK se dosáhlo vzájemného působení funkčních mikroorganismů, které přispěly k biodegradaci celulózy z TP. Tímto způsobem AnMBR implementoval současně metanogenní biokonverzi celulózy z TP a rozpustného CHSK v OV při pokojové teplotě. Degradace celulózy je proces enzymatické hydrolyzy, který je možné označit za proces biofilmu s časovým zpožděním pro mikrobiální kolonizaci, a proto je obtížné provést biodegradaci celulózy současně s běžnými OL na ČOV. Enzymatická hydrolyza může trvat mnohem déle, než je průměrná hydraulická retenční doba (6-12 h) pro konvenční aerobní biologický proces čištění OV (Chen et al., 2017).

Pro degradaci celulózy jsou vhodnější anaerobní podmínky než aerobní podmínky. V procesu AD celulózy celulolytické mikroby produkují enzymy, které depolymerizují celulózu, čímž vzniká glukóza. Ta je následně fermentována celulolytickými a jinými sacharolytickými mikroorganismy. To znamená, že ve vodě nerozpustná celulóza se pravděpodobně převede na CH<sub>4</sub> pro výrobu energie AD. Ke zvýšení účinnosti AD celulózy se vždy používala termofilní teplota a kyselé pH, protože celulolytická celulóza má optimální aktivitu v teplotním rozmezí 40–55 °C a pH v rozmezí 4,5–5,5. Celulóza v OV je však obvykle v nízké koncentraci, tedy

nižší než 200 mg·L<sup>-1</sup>, ale vzhledem k velké produkci OV, množství je nakonec pozoruhodné. Termofilního stavu lze těžko dosáhnout kvůli vysoké spotřebě energie na vytápění. Podobně, snížení pH z relativního neutrálního stavu na kyselé v OV vede ke spotřebě velkého množství chemikálií. V tomto smyslu je realizace současné AD celulózy z TP a rozpustných OL v OV výzvou zejména při pokojové teplotě a v relativně neutrálních podmínkách (Chen et al., 2017).

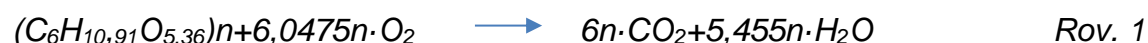
TP značně přispívá k výrobě energie na ČOV pomocí AnMBR, který integruje AD s membránovým reaktorem. V AnMBR je retence biomasy oddělena od hydraulické retence membránovou separací, a proto lze dosáhnout dlouhé retenční doby kalu, i když je hydraulická retenční doba krátká, aby udržovala vhodnou rychlost organického zatížení při nízkém přílivu OV. Dlouhá retenční doba kalu spojená s krátkou hydraulickou retenční dobou způsobuje vysokou koncentraci biomasy v AnMBR, což je příznivé pro vysokou účinnost AD a produkci energie (Chen et al., 2017).

Základní vzorec použitého TP (C<sub>6</sub>H<sub>10,91</sub>O<sub>5,36</sub>)<sub>n</sub> je velmi blízký složení čisté celulózy (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>, takže můžeme obecně konstatovat, že je TP většinou složená z celulózy. Hmotnostní a molární složení použitého TP je uvedeno v Tab. 9. Dále v Tab. 9 jsou uvedena procentuální hmotnostní a molární složení molekulů TP pro chemické prvky C, H, O a N.

**Tab. 9** Složení organických prvků použitého TP (Chen et al., 2017)

Organické prvky použitého TP				
Chemický prvek	C	H	O	N
Hmotnostní složení (%)	41,72	6,32	49,67	<0,3
Molární složení (n)	6n	10,91n	5,36n	0

Teoretická hodnota CHSK 1 g TP je 1,15 g CHSK (Chen et al., 2017) jak znázorňuje Rov. 1):



S rostoucí mírou organického zatížení způsobeného zkrácením hydraulické retenční doby se zvětšuje množství plynu CH<sub>4</sub>, zatímco odpadní CHSK a rozpuštěný CH<sub>4</sub> jsou udržovány na poměrně nízké úrovni. Vysoká účinnost přeměny CH<sub>4</sub> 85 %, 89 %, 89 %, 90 % a 90 % z odstraňování CHSK je získána při různé míře organického zatížení 0,34; 0,67; 1,01; 1,35 a 2,02 g CHSK ·L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>, v daném pořadí. Na základě bilance CHSK je možné odvodit maximální možnou tvorbu CH<sub>4</sub> z biodegradace TP pomocí následující rovnice (Chen et al., 2017) :

$$M_{tp} = M_o + M_r + CHSK_v + CHSK_b - CHSK_r \quad \text{Rov. 2}$$

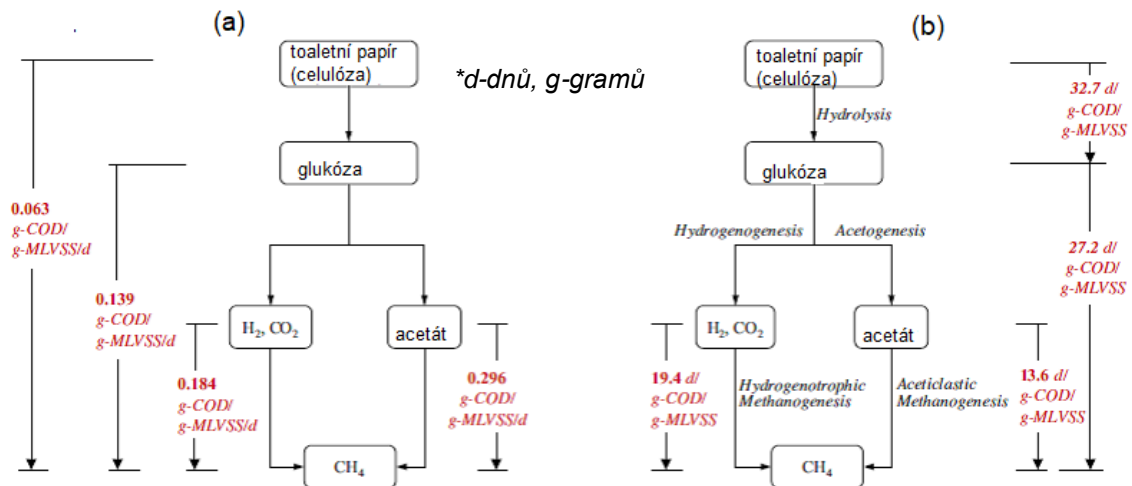
Veličiny v Rov. 2 jsou v jednotkách g CHSK·d<sup>-1</sup> a označují:

- možnou produkci CH<sub>4</sub> z degradace TP M<sub>tp</sub> (g CHSK ·d<sup>-1</sup>)
- množství odebraného plynu bioplynu denně M<sub>o</sub> (g CHSK ·d<sup>-1</sup>)

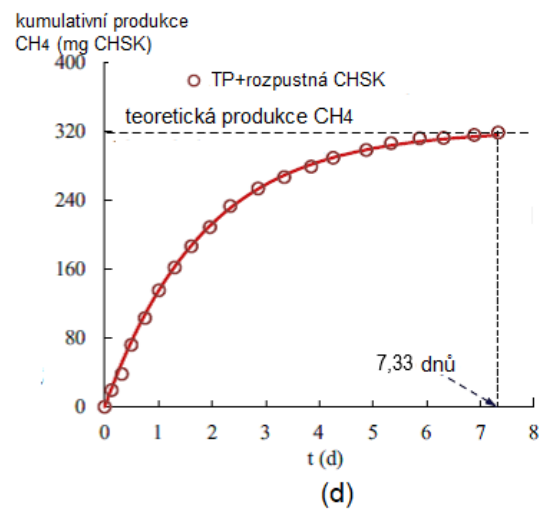
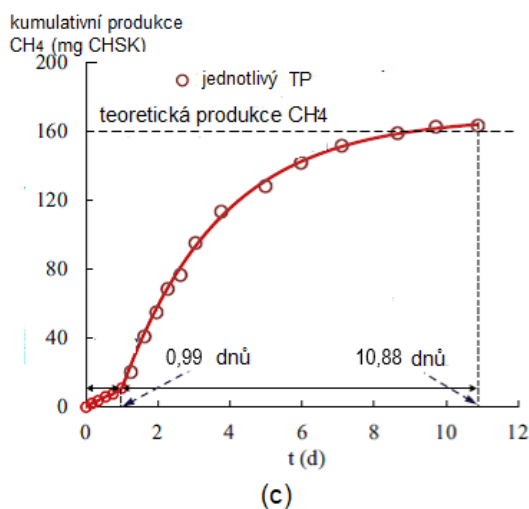
- množství odebraného plynu rozpuštěného CH<sub>4</sub> ve výtoku denně  $M_r$  (g CHSK · d<sup>-1</sup>)
- zbytkovou hodnotu CHSK ve výtoku  $CHSK_v$  (g CHSK · d<sup>-1</sup>)
- spotřeba CHSK pro produkci biomasy  $CHSK_b$  (g CHSK d<sup>-1</sup>)
- množství rozpustné CHSK v přítoku  $CHSK_r$  (g CHSK · d<sup>-1</sup>)

Ner rozpustná celulóza z TP v OV pomocí AnMBR při pokojové teplotě může být současně biologicky odbourávána s rozpustnými OV v procesu čištění OV. Zdroje C v celulóze se plně hydrolyzují a metabolizují a přispívají k zisku energie. Malý výtěžek kalu dosahuje dlouhé retenční doby, což přispívá kulturám funkčních mikroorganismů, a na druhé straně společné trávení rozpustných OL a ner rozpustné celulózy dosahuje vzájemné mikrobiální komunity (Chen et al., 2017). Výsledky dávkových zkoušek pro výrobu CH<sub>4</sub> z různých zdrojů C jsou znázorněny na Obr. 13.

Jak je ukázáno na Obr. 13 (a), TP (celulóza), glukóza, acetát, molekula vodíku (H<sub>2</sub>) a CO<sub>2</sub>, tvoří účinnou cestu v procesu degradace celulózy. Zároveň byla určena specifická konverzní rychlost na Obr. 13 (b), který ukazuje časovou spotřebu následných kroků v tomto procesu. Zvýšené degradační účinky společné degradace TP a rozpustných frakcí CHSK jsou znázorněny na Obr. 13 (c) a Obr. 13 (d). Pokud jde jen o TP jako zdroj C, jak je ukázáno na Obr. 13 (a), proces degradace lze rozdělit do dvou fází. První fáze od 0 do 0,99 dní (cca 23 hodin a 45 minut) byla produkce CH<sub>4</sub> relativně nízká a lineárně závislá na dnech. Druhá fáze, od 0,99 do 10,88 dní, měla exponenciální průběh. Ve srovnání se samotným TP pro smíšené zdroje C s TP a rozpustnými frakcemi CHSK, jak je ukázáno na Obr. 13 (d), spoluexistující rozpustné OL zlepšily degradaci celulózy z TP (Chen et al., 2017).



\* MLVSS (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids)-Směs roztoků těkavých suspendovaných pevných látek ; COD-CHSK



**Obr. 13** Výsledky dávkových zkoušek pro výrobu CH<sub>4</sub> z různých zdrojů C: a) Specifické metanogenní aktivity TP, glukózy, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> a acetátu; b) Specifické rychlosti konverze související s hydrolyzou, hydrogenogeneze/acetogeneze a metanogeneze; c) výroba CH<sub>4</sub> z individuálního TP jako zdroje C; a d) výroba CH<sub>4</sub> ze směsného TP a rozpustné frakce CHSK jako zdroje C (Chen et al., 2017)

### Metanogenní syntrofická asociace s houbami v AnMBR

V AnMBR dochází k vyváženému procesu metanogenní degradace v důsledku společné kultury bakterií a metanogenů a jejich syntrofická asociace vede k hydrolyze, acidogenezi, acetogenezi a metanogenezi směrem ke komplexním organickým sloučeninám. V AnMBR jsou částice celulózy v průměru od 1 do 1,2 mm zadržovány ve směsi kapaliny membránou. Běžné průměry archeí a bakterií jsou 0,5 μm a houby jsou v rozmezí od 0,1 do 10 μm. Průměry archeí, bakterií a hub souvisejících s mikrobiální digestí jsou větší nebo srovnatelné s velikostí pórů membrány používaných při mikrofiltraci, které mají průměr od 0,1 do 0,2 μm. Vzhledem k pozorování růstu hub na vláknech celulózy v mnoha studiích se předpokládá, že tato vlákna vstupují do membránového bioreaktoru s přítokem OV, a v tomto systému mohou obývat populace hub, které mají schopnost navázat syntrofickou interakci s

metanogeny pro metanogenezi v anaerobním nebo anoxickém prostředí (Chen et al., 2017).

Zvýšená produkce CH<sub>4</sub> se sníženým výtěžkem biomasy je přičítána asociaci mezi houbami a metanogeny v AnMBR. Produkce CH<sub>4</sub> je zvýšena s 92,6 % účinnosti CHSK převedenou na CH<sub>4</sub> a 80 % podílem CH<sub>4</sub> ve vyrobeném bioplynu, zatímco výtěžek biomasy je nejmenší za nejkratší hydraulickou retenční dobu 8 hodin. Mikrobiální analýza ukázala, že houby *Basidiomycota* a metanogen *Metanoregula* vytvořily asociaci, kde *Basidiomycota* dosáhla 93 % relativního množství při hydraulické retenční době 8 hodin. Testy specifické metanogenní aktivity a biochemického metanového potenciálu naznačují, že asociace byla odvozena od produkce H<sub>2</sub> plísněmi a spotřeby H<sub>2</sub> metanogeny během procesu degradace celulózy. Metanogenní degradace OV obsahujících celulózu je výrazně podporována prostřednictvím syntrofické asociace hub metanogenů (Chen et al., 2017).

### 3.3.3 Dopad separace celulózy na technologii ČOV

V této kapitole je prezentována rešerše vlivů separace celulózy na kapacitu ČOV a kalové hospodářství. Metody těžby celulózy na ČOV jsou velmi jednoduché, spotřeba chemikálií je minimální, menší je spotřeba elektřiny při provzdušňování, menší pravděpodobnost uvolňování fosfátů a nižší objemy kalu, což vede ke snížení délky přepravování kalu a následných nákladů (*Cellvation*, 2018).

Výhody těžby celulózy pro technologii na ČOV na příkladech jednotlivých ČOV s aplikací technologie získávání celulózy z OV, jsou uvedeny v celulózy na biologický stupeň, kalové hospodářství, spotřebu elektrické energie a chemikálií, investiční náklady a další faktory pro určité provedené projekty separace PCK: *Cellvation*, *SMART-Plant* a aplikace jemných filtrů typů *Salsnes Filter* (*Cellvation*, 2018), (*SMART-Plant*, 2018), (*SMART-Plant*, 2023), (*Salsnes Filter*, 2017).

Tab. 10, kde jsou prezentovány empirické závěry o dopadu a pozitivním vlivu procesu separace celulózy na biologický stupeň, kalové hospodářství, spotřebu elektrické energie a chemikálií, investiční náklady a další faktory pro určité provedené projekty separace PCK: *Cellvation*, *SMART-Plant* a aplikace jemných filtrů typů *Salsnes Filter* (*Cellvation*, 2018), (*SMART-Plant*, 2018), (*SMART-Plant*, 2023), (*Salsnes Filter*, 2017).

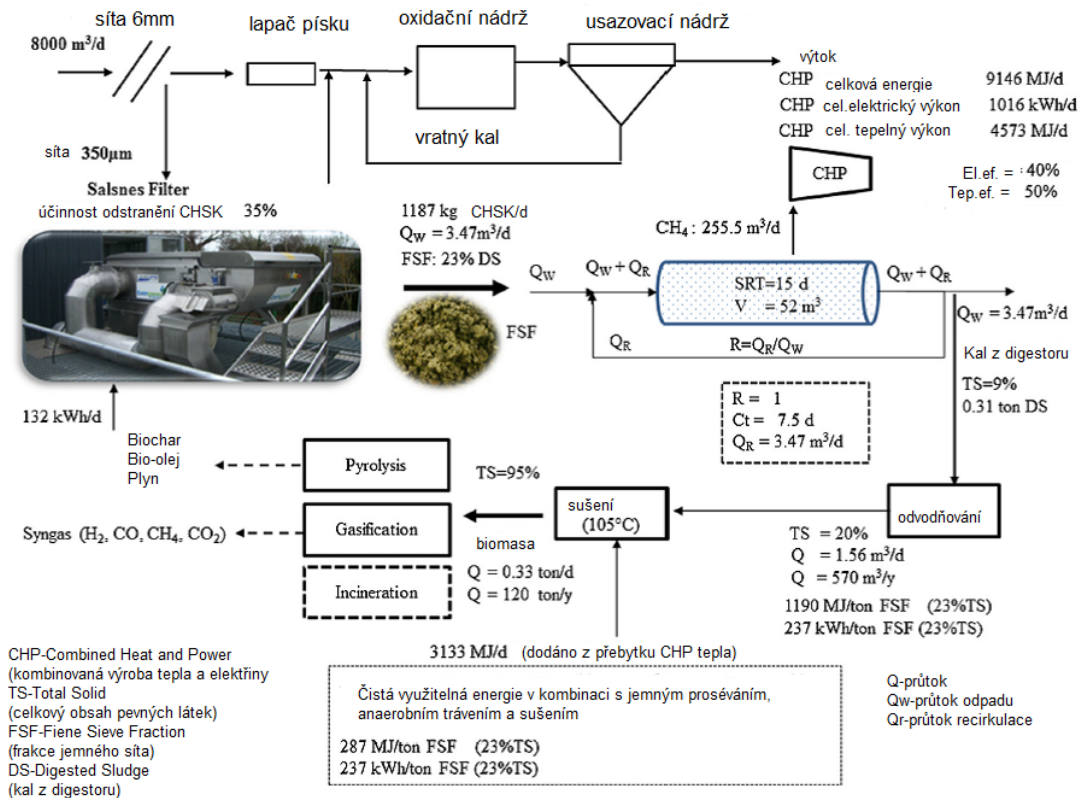


**Tab. 10** Přednosti těžby celulózy pro technologii ČOV

Aplikace získávání celulózy na ČOV	Přednosti těžby celulózy pro technologii ČOV
Projekt Cellvation ( <i>Cellvation</i> , 2018)	Odvodněné primární kaly obsahují vyšší obsah OL, z nichž se vyrobí více bioplynu Odstranění OL před biologickým stupněm čištění Snížení objemu přebytečného kalu až o 75 % Biologický kal je okamžitě odvodněný, což brání uvolňování fosfátů z kalu Proces úpravy kalu je zjednodušený
Projekt SMART-Plant ( <i>SMART-Plant</i> , 2018)	Snížení spotřeby energie provzdušňování až o 20 % Snížení OL v aktivovaného kalu Snížení použití polymeru pro odvodňování kalů Menší náklady na přepravu kalu
Ve srovnání s konvenčním primárním čištění aplikace jemných filtrů typů <i>Salsnes Filter</i> ( <i>Salsnes Filter</i> , 2017) Projekt SMART-Plant ( <i>SMART-Plant</i> , 2023)	30-60 % menší investiční náklady na primární čištění 10x menší instalační plochu Integrované zahušťování a odvodňování PCK Výrazně nižší náklady na životní cyklus (Life Cycle Assessment-LCA) Menší objem sušého kalu, což snižuje náklady na kalové hospodářství Stejně nebo větší odstranění celkových NL a biologické spotřeby kyslíku - BSK <sub>5</sub> (v průměru 50 % a 20 % resp.) Menší biologický stupeň čištění (menší potřeba provzdušňování a/nebo prostoru) Nižší provozní náklady (nákup chemikálií) Plně automatizované zařízení, rychlá a snadná údržba

Při oddělování PCK pomocí rotačních jemných sít a využití celulózy jako zdroje má celkový dopad na klima recyklačního střediska hodnotu 360 000 kg CO<sub>2</sub> ekvivalentů za rok, aniž by byly provedeny další úpravy na získaném PCK. (Marcelis & Wessels, n.d.).

Při prosévání aplikovaném na tok za suchého počasí může být celková spotřeba energie ČOV včetně čištění kalů snížena nejméně o 40 % s dobou návratnosti cca 7 let (*SMART-Plant*, 2023). Hmotnostní a energetický průtok materie a energie na ČOV Blaricum (30 000 EO) (Ruiken et al., 2013) je znázorněn na Obr. 14 (Ghasimi et al., 2016). Obr. 14 ilustruje schematický pohled na ČOV Blaricum v kombinaci s jemnými síty, digescí s uzávěrem, kogenerační jednotkou, odvodňovacími a sušícími jednotkami a konečným určením biomasy. Poté Obr. 14 zachycuje další podrobnosti o hmotnostním průtoku frakce z jemného síta, objemu fermentoru, hrubé energii tepla a elektřiny, v neposlední řadě pak o čisté využitelné energii na tunu FSF při 23 % obsahu celkových pevných látek.



**Obr. 14** Hmotnostní průtok materií proseté jemnými síty, objem digestoře, celková energie (teplo a elektrina) a čistá využitelná energie na tunu prosévané materií na ČOV Blaricum (30 000 EO) (Ghasimi et al., 2016)

Z technického a ekonomického hlediska integrace dynamického prosévání OV pro regeneraci PCK v ČOV může způsobit nadbytečnost existujících jednotek (např. zahušťovače gravitačního kalu). Kromě toho, využití SCFA, struvitu a biomethanizace může zvýšit potenciální tržní hodnotu kalu. Nakonec byla předběžně odhadnuta potenciální tržní hodnota regenerovaných materiálů, která může ztrojnásobit hodnotu konvenčního scénáře využití bioplynu v současných ČOV (Crutchik et al., 2018).

### 3.3.4 Materiálová transformace čistírenského kalu pomocí technologie pyrolýzy

Stabilizovaný ČK, též nazývaný biosolid, vzniká jako vedlejší produkt procesu čištění OV na ČOV. Termín ČK se používá pro označení neupraveného primárního a sekundárního pevného organického kalu a převážně se skládá z vody, OL a minerálů. Rozdíl v termínech mezi biopevnými látkami (biosolidy) se týká pevných OL, které prošly stabilizační úpravou na ČOV, a ostatních typů ČK vyskytujících se na ČOV (NOVOTNÝ et al., 2022). Výhřevnost surového odvodněného ČK (25 % sušiny) je 3,5 MJ·kg<sup>-1</sup> a výhřevnost vyhnílého odvodněného ČK (25 % sušiny) je 2,5 MJ·kg<sup>-1</sup>. Výhřevnost suchého a vyhnílého ČK se pohybuje mezi 8,5 a 17 MJ·kg<sup>-1</sup> a nevyhnílého až 23 MJ·kg<sup>-1</sup> (Racek et al., 2020).

Fyzikální a chemické vlastnosti ČK závisí na technologii zpracování, procesu úpravy a době zdržení v procesu na ČOV. Chemické složení ČK se mění v závislosti na původu, vzniku, času a ročním období. Po mechanickém

odvodnění má ČK strukturu s hrudkovitým uspořádáním a objemovou hmotností v rozsahu od 650 do 800 kg·m<sup>3</sup>. (NOVOTNÝ et al., 2022).

Obsah sušiny v ČK kolísá mezi 2–12 % hmotnosti a představuje jeden z nejdůležitějších parametrů při energetickém zpracování odpadů. Obsah OL v ČK z měst liší se v závislosti na procesu čištění OV a úpravách prováděných na ČK (Paz-Ferreiro et al., 2018).

Mezi technologie pro nakládání s ČK patří mimo jiné: termické zpracování, AD, kompostování a přidávání vápna (NOVOTNÝ et al., 2022). Výroba PUP prostřednictvím STP je vhodná pro ČOV, které provádějí anaerobní stabilizaci ČK s nízkým obsahem TK. Sušením a pyrolýzou ČK dochází k eliminaci patogenních mikroorganismů, což vede k jeho hygienizaci (Pohořelý et al., 2017).

Mezi metody termického zpracování ČK řadíme následující procesy: spalování, pyrolýzu, zplyňování a další termické procesy, které se mohou lišit v závislosti na přítomnosti oxidačního činidla, procesních teplotách a dalších parametrech. V současnosti jsou v oboru čištění OV diskutovány nejvíc spalování a pyrolýza ("Termické zpracování sušených čistírenských kalů: Pyrolýza", 2021).

Pyrolýza je termický rozklad materiálů v inertní atmosféře za nepřístupu oxidačních činidel, produkující výpary tvořené kondenzujícími PO, nekondenzujícími složkami PP a pevnými složkami PUP. Při ohřevu materiálu bez přístupu kyslíku dochází k rozkladu původních chemických vazeb a současné tvorbě kondenzačních molekul (voda, olej, OL) a nekondenzujících molekul (plyny) (HLAVÍNEK, 2015).

Klíčovým procesem pyrolýzy je tepelné štěpení (krakování) uhlovodíků v ČK. Přeměnu složitějšího uhlovodíku na jednodušší za současného vzniku pevného uhlikatého zbytku a vodíku popisuje rovnice Rov. 3 ("Termické zpracování sušených čistírenských kalů: Pyrolýza", 2021):



Při vyšších procesních teplotách se dosahuje vyšších výtěžků PP a nižšího množství PUP. ("Termické zpracování sušených čistírenských kalů: Pyrolýza", 2021).

Spalování kalu je redoxní exotermní reakce – hoření, při kterém je zapotřebí hořlavina a oxidační činidlo. Oxidační spalování je popsáno rovnicemi Rov. 4 a Rov. 5 ("Termické zpracování sušených čistírenských kalů: Pyrolýza", 2021) :



Pyrolýza představuje termochemický redukční proces, který přeměňuje ČK na tři produkty: i) PUP, tedy materiál s vysokým obsahem C, dále pak ii) PO, což je směs vody a oleje, a iii) PP (Racek et al., 2020).

Většina pyrolýzních systémů v současnosti využívá termický rozklad biomasy v rotační peci vytápěné zevně spalinami, které vznikají z následného

spalování pyrolýzních plynů v termoreaktoru. Topení reaktoru může být provedeno různými způsoby. Pyrolýza je proces, který mění biomasu na produkty vyšší energetické úrovně, jako jsou PP, PO a PUP. PP může být využit jako chemická surovina nebo jako palivo pro motory a plynové turbíny. PO může být vyroben z libovolného tuhého biopaliva a po další úpravě může sloužit jako kapalné palivo. Předúprava biomasy sušením je nezbytná pro omezení obsahu vody v PO. Rozdrcení biomasy na částice o velikosti cca 3 mm zabezpečuje rychlý průběh reakce a snadnou separaci pevných částí (HLAVÍNEK, 2015).

Ze všech výstupních produktů pyrolýzy má PO nejvyšší potenciál pro energetické využití. PO má podobné vlastnosti jako motorová nafta a lze ho použít jako motorové palivo. Nicméně i PUP má také určitý energetický obsah. Čím vyšší obsah C má PUP, tím je jeho obsah energie vyšší. Výhřevnost PUP po pyrolýze závisí na původním materiálu použitém pro pyrolýzu a může se pohybovat v intervalu hodnot 5–21 MJ·kg<sup>-1</sup>. Hodnoty blízké 5 MJ·kg<sup>-1</sup> jsou vhodné pro spalování, ale pro jiné energetické využití nejsou příliš atraktivní (Racek et al., 2020).

Pyrolýzní procesy se mohou rozdělit podle doby zdržení, procesní teploty a druhu použitého plynu. Nejzákladnější rozdělení lze provést podle procesní teploty a doby zdržení, protože zejména teplota má významný vliv na výtěžky procesu ("Termické zpracování sušených čistírenských kalů: Pyrolýza", 2021).

Technologicky lze procesy pyrolýzy klasifikovat podle dosahované teploty na (HLAVÍNEK, 2015):

- nízkoteplotní (< 500°C),
- středněteplotní (500 - 800°C),
- vysokoteplotní (> 800°C).

Pyrolýzní procesy se dělí na pomalé, rychlé a bleskové v závislosti na době expozice materiálu tepelnému rozkladu. Každý z těchto procesů má své charakteristiky, které jsou popsány v Tab. 11 ("Termické zpracování sušených čistírenských kalů: Pyrolýza", 2021). v Tab. 11 jsou pro tři pyrolýzní technologie (pomalou, rychlou a bleskovou) uvedeny odpovídající doby zdržení, rychlosti ohřevu a procesní teploty.

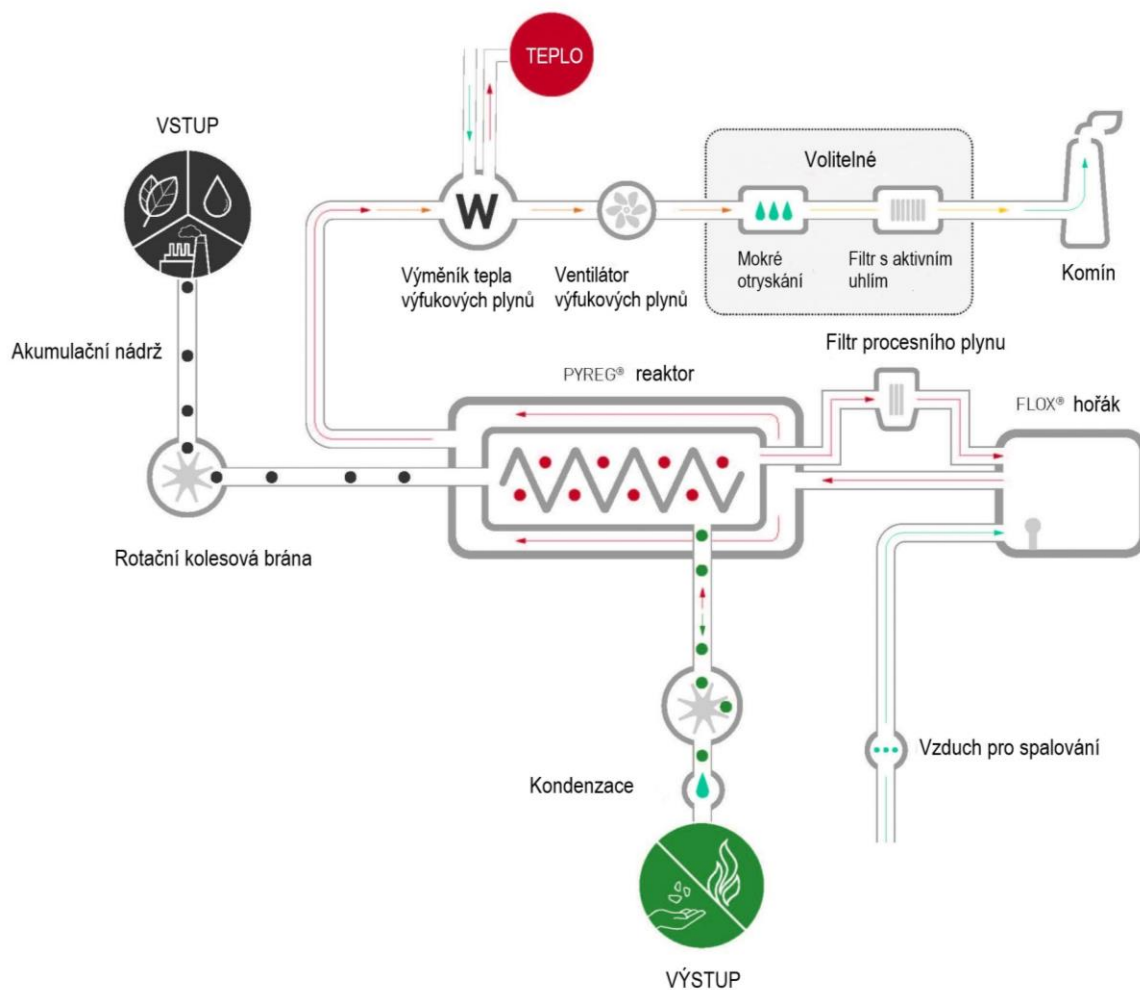
**Tab. 11** Pyrolýzní technologie dle doby zdržení ("Termické zpracování sušených čistírenských kalů: Pyrolýza", 2021).

Pyrolýzní technologie	Doba zdržení (s)	Rychlost ohřevu (°C·s <sup>-1</sup> )	Procesní teplota (°C)
Pomalá	450 (420) – 550	0,1 – 1	277 – 677 (> 400)
Rychlá	0,5 – 10 (20)	10 – 200 (300)	577 – 977
Blesková	< 0,5	> 1 000	777 (800) – 1 027 (1 300)

Poznámka: rozsah parametrů se může v závislosti na zdroji informací lišit cca 10 %, což je uvedeno v závorce.

Vzorová technologická linka typu PYREG (PYREG, 2023) je určena pro město s cca 60 000 EO v kontejnerovém provedení s integrovanou sušárnou. Proces PYREG je

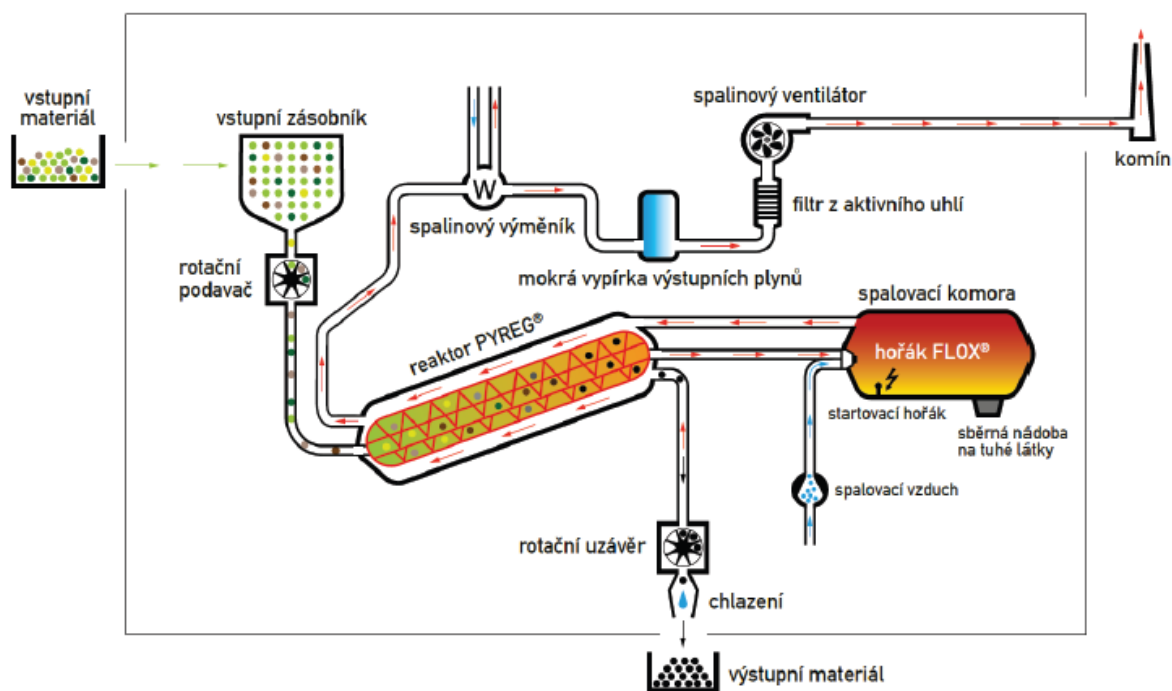
autotermní. K udržení provozu systému se využívá pouze energie generovaná během karbonizace odpadního materiálu. Technologické schéma procesu je znázorněno na Obr. 15. Vstup do procesu je OL nebo biomasa, která prochází akumulací nádrží a přes rotační kolesovou bránu vstupuje do reaktoru (PYREG, 2023). Generované teplo se využívá pro nepřímý ohřev pyrolyzní jednotky a výrobu regenerovaného tepla. Tato zbylá tepelná energie je pak přeměněna výměníkem na užitečné teplo, které se může použít k sušení strojově odvodněného ČK v nízkoteplotní pásové sušárně (Pohořelý et al., 2017). Výstupem z procesu je mimo jiné PUP. Procesní plyn se spaluje v hořáku a výfukový plyn je následně, po volitelném mokré otřyskání a filtrování přes aktivní uhlí, vypouštěn komínem (PYREG, 2023).



**Obr. 15** Autotermní proces přeměny odpadu na PUP (PYREG, 2023)

Jeden technologický modul je navržen na cca 1 000 t suchého ČK za rok s minimální výhřevností  $10 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Grafická prezentace technologického toku je znázorněna na Obr. 16. Sestava technologického zařízení zahrnuje zásobník velmi suchého ČK, rotační podavač dávkování suchého ČK s tlakovým uzávěrem, rotační pec PUP, mezi-zásobník PUP pro svedení PUP z rotační pece a vírníku. Primární PP je bezpečně dopraven do spalovací komory nad teplotou kondenzace vroucích OL. K

dosažení požadované spalovací teploty 1 200 °C a zajištění doby zdržení delší než 2 sekundy se používá speciální hořák navržený pro primární plyn. Uvedená teplota a čas zdržení převyšují zákonné požadavky na termickou likvidaci nebezpečných odpadů a zajišťují kompletní destrukci všech hořlavých OL obsažených v PP. Systém čištění spalin zahrnuje filtr pevných částic, skrubr s použitím hydroxidu vápenatého-Ca(OH)<sub>2</sub> nebo hydroxidu sodného-NaOH a aktivní uhlí (Pohořelý et al., 2017).



**Obr. 16** Shéma procesního toku pro výrobu PUP (Pohořelý et al., 2017)

Proces pyrolýzy výrazně ovlivňuje kvalitu PUP (NOVOTNÝ et al., 2022) a také některé další vlastnosti PUP vyrobeného z ČK, které jsou uvedeny v Tab. 12. Jak uvádí (Pohořelý et al., 2017) typický obsah P v PUP vyrobeného za teploty 600 °C je 6–8 % hmotnosti a N 2–2,5 % hmotnosti. v Tab. 12 je pro maximální procesní teplotu 600 °C uvedeno procentuální zastoupení základních prvků: C, vodíku (H), N, kyslíku (O).

**Tab. 12** Chemické složení PUP získaného pyrolýzou z ČK při maximální procesní teplotě 600°C (NOVOTNÝ et al., 2022)

Surovina	Maximální procesní teplota (°C)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)
ČK	600	7,75÷21,80	1,10÷1,74	0,69÷3,20	0,94÷7,90

V procesu pyrolýzy se do PUP koncentrují TK, kromě rtuti, která odchází s primárním PP. S rostoucí teplotou pyrolýzy až na cca 600 °C se zvyšuje stabilita TK a retence vody v PUP. Kvalitu pyrolytického C nejvíce ovlivňuje teplota, při které probíhá pyrolýza (Pohořelý et al., 2017).

Vlastnosti PUP jsou ovlivněny vstupní surovinou a podmínkami pyrolýzy (Novotný et al., 2023). Základní vlastnosti PUP vyrobeného procesem pyrolýzy suchého ČK jsou uvedeny v Tab. 13 (Pohořelý et al., 2017). V Tab. 13 jsou uvedeny hmotnost sušiny a specifický povrch PUP. Zároveň je stanoveno, že C je hlavní chemická složka PUP, stejně jako skutečnost, že obsah hlavních živin (P, C, N) je ovlivněn pyrolýzní teplotou.

**Tab. 13** Vlastnosti PUP vyrobeného ze ČK (Pohořelý et al., 2017)

Vlastnosti PUP vyrobeného ze ČK	
hmotnost sušiny	60 % hmotnosti sušiny ČK
Hlavní složka PUP	chemicky stabilní C
Specifický povrch PUP	25–150 m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> (ovlivněna je typem reaktora, pyrolýzní teplotou a časem zdržení)
Velký obsah živin	P, N, C (ovlivněn je pyrolýzní teplotou)

S rostoucí teplotou pyrolýzy obecně klesá výtěžek PUP, ale zvyšuje se hodnota pH, obsah popela a celková koncentrace TK. Vyluhovací potenciál TK z PUP se výrazně snižuje s rostoucí teplotou, což snižuje potenciální ekologická rizika spojená s TK pro životní prostředí. Zvyšování teploty pyrolýzy snižuje poměr vodíku (H/C) k C, zvyšuje specifický povrch a celkový objem pórů zatímco průměrná šířka pórů se zmenšuje, avšak snižuje velikost PUP a obsah C, H a N (Wang et al., 2021).

PUP představují komplexní hnojivo obsahující N, P a K, a zároveň také vápnato-hořečnatou složku. Použití PUP na zemědělské půdě, namísto přímé aplikace stabilizovaného ČK má za následek zachycení C a tím i snížení emisí skleníkových plynů (Pohořelý et al., 2017). Zároveň lze PUP využít jako stabilní organickou složku substrátů pro tuto účelovou aplikaci (Novotný et al., 2023). Uhlíkaté složky obsažené v PUP zůstávají chemicky stabilní, nevystavené dalšímu rozkladu a oxidaci v půdě (Pohořelý et al., 2017). PUP se jeví jako atraktivní materiál pro zlepšení pedologických vlastností půdy (Wang et al., 2021).

Výsledkem použití PUP jsou pozitivní účinky, jako je zlepšená retence vody (vodní retence) v půdě a omezení úniku živin, konkrétně P, N a vápníku (Ca) z hnojiv do podzemních vod (Pohořelý et al., 2017). Použití PUP v substrátech pro městskou zelenou infrastrukturu, jako jsou zelené střechy, zelená parkoviště a zelené stěny nebo fasády, získává stále větší pozornost. Tyto materiály přinášejí pozitivní přínosy pro růst rostlin, efektivitu hnojiv a retenci dešťové vody (Novotný et al., 2023). Přeměna ČK na PUP pyrolýzou je atraktivní metodou pro materiálovou transformaci ČK (Wang et al., 2021).

### 3.4 LEGISLATIVNÍ PŘEDPISY A EKONOMICKÉ PROGNÓZY

Současný trend legislativních nařízení v oblasti odpadového hospodářství a ochrany životního prostředí výrazně ovlivnil vývoj a implementaci nových technologií v oblasti čištění OV, kde právě nová legislativa přinesla změny v hospodaření se zdroji mimo jiné na ČOV. Na ekonomické úrovni je možné propojit statistická data o prognóze

výroby TP se známými údaji o světové produkci, sběru a čištění OV. Tím získáme přehled o strategicky vhodných lokalitách, kde by exploatace PCK mohla být výnosná.

#### Legislativní předpisy

Nové světové trendy související s dostupnými zdroji změnil způsob pohledu na technologie čištění a zpětného využívání OV. Způsob nakládání s OV se změnil v důsledku nových světových trendů souvisejících s dostupností zdrojů. Snahou EU je prostřednictvím legislativních opatření výrazně snížit objem biologicky rozložitelného odpadu, který se doposud ukládal na skládky, a současně vylepšit metody nakládání s ČK pocházejícími z městských ČOV, které se stávají zařízeními nejen pro čištění ale i pro využití zdrojů z OV (Fernández-Arévalo et al., 2017). Toto jsou v zásadě střednědobé a dlouhodobé cíle pro vodní a odpadové hospodářství měst definované evropskou legislativou respektující principy cirkulární ekonomiky ("Nový akční plán EU pro oběhové hospodářství – Čistší a konkurenceschopnější Evropa (2020)", 2020). Evropská legislativa zaměřená na podporu, principy a praktickou implementaci cirkulární ekonomiky, považuje OV mimo jiné za zdroj živin, energie a recyklované vody. V kontextu současné světové energetické krize se prosazují nové trendy a současně výzvy, které kladou značný důraz na efektivní využívání zdrojů (odpadů) a směřují k úsporám energií. Postupné vyčerpávání surovinových zdrojů a ekologické principy udržitelného rozvoje jsou hlavními důvody pro získávání surovin z OV a jejich opětovné využití. Jedná se o proces, který tvoří životní cyklus od získávání surovin přes výrobu, užívání, úpravu až po ukončení životnosti.

V podmínkách ČR je strategickým dokumentem, zpracovaným Ministerstvem životního prostředí a definujícím konkrétní legislativu v oblasti nakládání s městskými odpady Státní politika životního prostředí 2030, respektive s výhledem do 2050, která ukládá povinnost zvyšování podílu materiálového využití biologicky rozložitelných odpadů ("Státní politika životního prostředí České republiky 2030 s výhledem do 2050", 2020).

Současná kritéria EU pro primární čištění na ČOV vyžadují minimálně 20 % odstranění OL a 50 % odstranění suspendovaných látek. Samotná sedimentace často není dostačující pro efektivní primární čištění OV bez využití chemických procesů (Rusten & Ødegaard, 2006). Výzva k omezení spotřeby energie při procesu provzdušňování a snížení množství přebytečného kalu vedla k odstranění OL před biologickým stupněm čištění OV (Cellvation, 2018). Uvedené poznatky mají dopad na instalaci a zprovoznění jemných sít mechanického předčištění pro optimalizaci výkonů primární úpravy na ČOV (Rusten & Ødegaard, 2006). Tento způsob dočištění a úpravy primárního stupně přispívá k zlepšení celkového procesu čištění OV (Chen et al., 2017) a má pozitivní dopad na jednodušší úpravy ČK a současně pak i menší náklady na jeho přepravu (SMART-Plant, 2018).

Vzhledem k požadavkům EU na čištění OV se v roce 2006 Norská státní agentura pro kontrolu znečištění (Rusten & Ødegaard, 2006) ujala iniciativy vyhodnocení a testování několika různých technologií pro zlepšení primárního čištění. Cílem bylo najít spolehlivé a nákladově efektivní technologie, které splňují přísná



kritéria EU pro primární čištění na ČOV, které vyžadují alespoň 20 % odstranění OL (měřeno jako BSK<sub>5</sub>) a 50 % odstranění suspendovaných látek (Rusten & Ødegaard, 2006).

Historicky synonymem pro primární čištění na ČOV byla vždy sedimentace. Často distribuce OV byla taková, že sedimentací nebylo možné dosáhnout efektivního primárního čištění a to bez ohledu na to, jak malá byla přelivná plocha. Proto bylo za normálních okolností nutné provést chemické vylepšení primárního čištění, mezi jehož hlavní nedostatky patří vysoké náklady na chemikálie a zvýšená produkce kalu (Rusten & Ødegaard, 2006).

V procesu primárního čištění na ČOV nebylo možné dosáhnout kvality podle požadavků EU. Hlavním cílem bylo navrhnout a zprovoznit jemná síta pro optimalizaci výkonu primární úpravy na ČOV (Rusten & Ødegaard, 2006).

### 3.4.1 Ekonomické prognózy toaletního papíru

Rešerše o očekávané globální produkci TP v jednotlivých světových regionech jsou spojené s analýzou míry rozvinutosti stokové sítě a ČOV, což má za cíl přiblížit perspektivu využívání recyklace celulózy z TP na celosvětové úrovni.

#### Globální prognóza výroby toaletního papíru

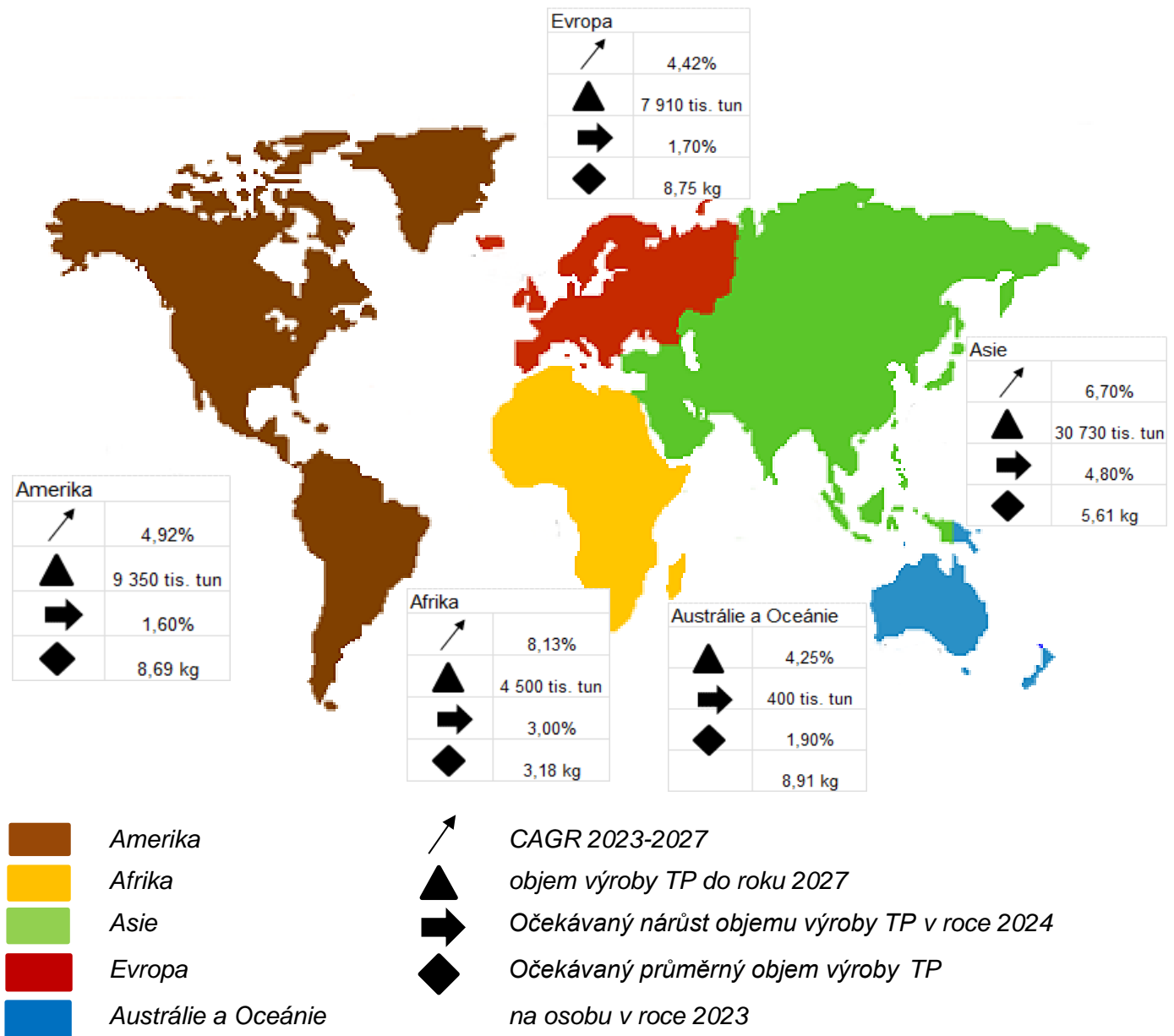
Parametry, které jsou sledovány a týkají se produkce, spotřeby na osobu a recyklace TP na ČOV, zahrnují kombinovanou roční míru růstu (CAGR - Compound Annual Growth Rate), objem výroby TP do roku 2027, předpokládaný nárůst produkce TP v roce 2024 a očekávaný průměrný objem výroby TP na osobu v roce 2023.

Celosvětový trh s TP očekává roční růst 5,92 % v letech 2023-2027, s dominantní rolí Číny. Produkce do roku 2027 dosáhne pravděpodobně 52 890 tis. tun, a růst v roce 2024 se odhaduje na 3,5 %. Očekává se, že průměrná produkce TP na osobu v roce 2023 na globalní úrovni dosáhne 5,98 kg (*Statista*, 2023). Celkově lze pozorovat rostoucí trendy a perspektivy pro TP na celosvětovém trhu.

V rámci EU se předpokládá, že trh s TP bude každý rok v letech 2023 až 2027 růst o 4,03 %, zatímco v ČR se očekává, že tento trh bude ročně růst o 3,98 % v tomto období. Pokud porovnáme data s EU, kde celková produkce TP do roku 2027 dosáhne pravděpodobně 4 410 tis. tun, s očekávaným růstem produkce o 1,4 % v roce 2024, v ČR se celkový objem výroby TP do roku 2027 odhaduje na 128,60 tis. tun, s předpokládaným nárůstem produkce o 1,7 % v roce 2024 (*Statista*, 2023). Předpokládaný růst trhu s TP v období 2023 až 2027 je podobný jak v rámci EU, tak v ČR, a pohybuje se kolem 4,0 %. Očekává se, že v roce 2024 dojde k srovnatelnému nárůstu produkce v odvětví TP jak v EU, tak v ČR.

Průměrná produkce TP na osobu v EU v roce 2023 je 9,41 kg, a v ČR obnáší 11,24 kg (*Statista*, 2023). Tento indikátor podporuje myšlenku recyklace a zpětného využití TP z OV zemí EU, v tomto případě mimo jiné i na území ČR. Zejména proto, že průměrná výroba TP na osobu v ČR je o 20 % vyšší než v zemích EU.

Na Obr. 17 jsou zobrazeny hlavní sledované charakteristiky globálního trhu s TP v pěti hlavních světových regionech: Afrika, Amerika, Asie, Austrálie vč. Oceánie a Evropy.



**Obr. 17** Charakteristiky globálního trhu s TP v hlavních světových regionech (Statista, 2023), (study.com, 2023)

Největší kombinovaná míra růstu od roku 2023-2027 se očekává v Africe (8,13%) a také v Asii (6,70%). Velikost CAGR je v Evropě, Americe a Austrálii a Oceánii vyrovnaná a pohybuje se od 4,25 % přes 4,42 % až do 4,92 %. Mírně větší nárůst v Americe je způsoben zeměmi Jižní Ameriky. Objem celkové výroby TP je určován nejen spotřebními preferencemi, ale také rozlohou daného regionu. Očekává se, že v roce 2024 dosáhne největšího nárůstu produkce TP v Asii (4,80 %), která bude následována Afrikou (3,00 %). Zatímco v regionech Ameriky, Evropy, Austrálie a Oceánie se očekává mírnější růst, který se pohybuje v rozmezí od 1,60 % do 1,70 % pro Ameriku a Evropu až po 1,90 % pro Austrálii a Oceánii. Evropa,

Amerika, Austrálie a Oceánie vykazují v roce 2023 srovnatelnou hodnotu očekávaného průměrného objemu výroby TP na jednoho obyvatele (8,75 %, 8,69 %, 8,91 % v tomto pořadí). Naopak v Asii a v Africe jsou pozorovány nižší hodnoty (5,61 % a 3,18 % v tomto pořadí).

Všechny uvedené hodnoty naznačují, že trh s TP v Evropě, Americe, Austrálii a Oceánii vykazuje podobné charakteristiky, zatímco největší progres lze očekávat v oblasti Afriky, následně pak i v Asii, kde trh momentálně dosahuje nejnižšího objemu.

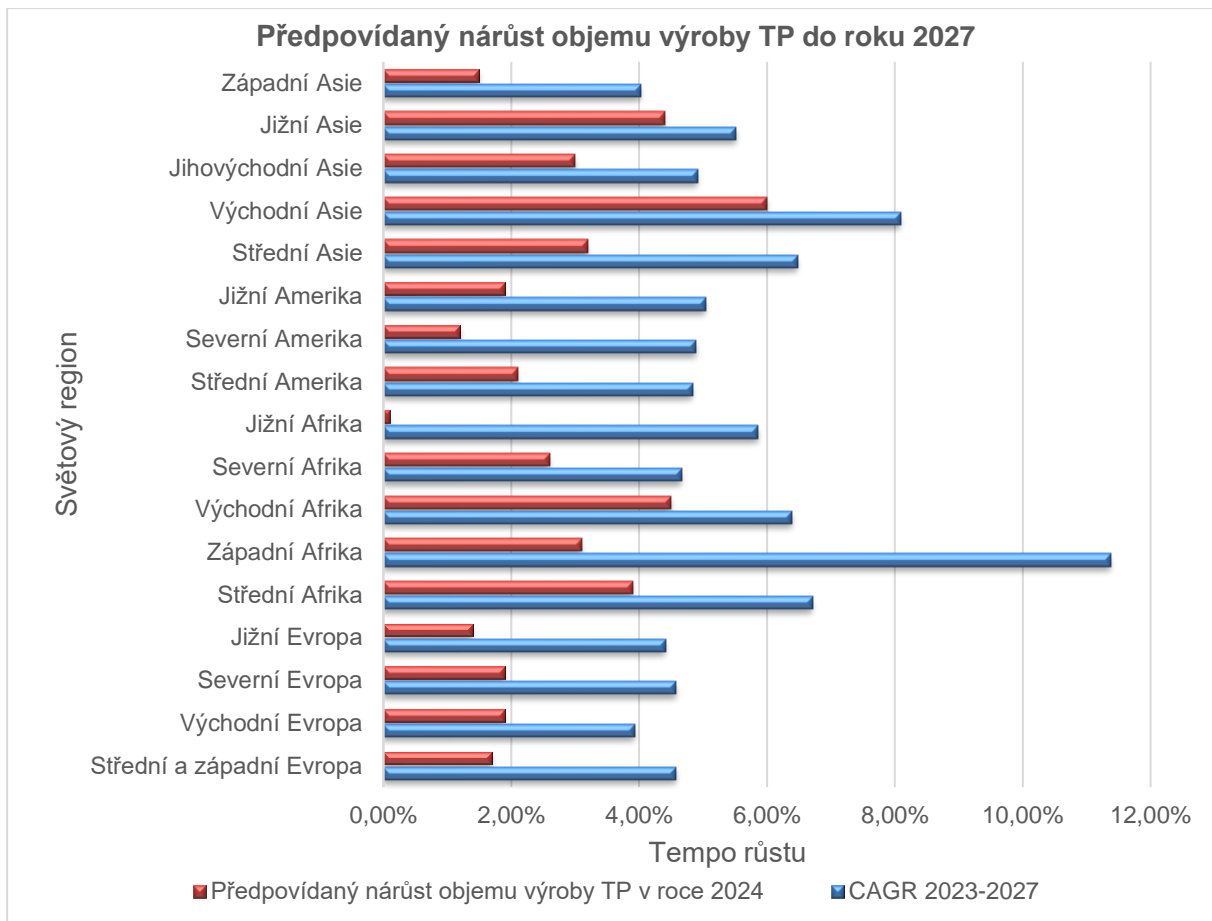
Kromě statistik o výrobě TP je třeba brát v úvahu míru rozvinutosti kanalizační infrastruktury v různých světových regionech s cílem získat komplexní odhad recyklačního potenciálu TP z OV.

Pokud se zaměříme na globální subregiony, situace je popsána v datech uvedených v Tab. 14 a dále graficky ilustrována v grafech Graf. 1, Graf. 2 a Graf. 3. Data byla zpracována celkem pro 17 charakteristických podoblastí.

**Tab. 14** Předpověď trhu s TP do roku 2027 (*Statista, 2023*)

Světový region	CAGR 2023-2027 (%)	Předpokládaný nárůst objemu výroby TP v roce 2024 (%)	Objem výroby TP do roku 2027 (tis. tun)	Předpokládaný průměrný objem výroby TP na osobu v roce 2023 (kg)
Střední a západní Evropa	4,6	1,7	3 700	10,4
Východní Evropa	3,9	1,9	1 800	7,1
Severní Evropa	4,6	1,9	400	10,8
Jižní Evropa	4,4	1,4	2 000	7,9
Střední Afrika	6,7	3,9	400	3,8
Západní Afrika	11,4	3,1	1 300	3,0
Východní Afrika	6,4	4,5	1 200	2,2
Severní Afrika	4,7	2,6	1 200	4,3
Jižní Afrika	5,9	0,1	400	5,5
Střední Amerika	4,8	2,1	300	5,6
Severní Amerika	4,9	1,2	5 300	10,0
Jižní Amerika	5,0	1,9	3 500	7,8
Střední Asie	6,5	3,2	400	4,5
Východní Asie	8,1	6,0	17 100	8,1
Jihovýchodní Asie	4,9	3,0	4 200	5,4
Jižní Asie	5,5	4,4	7 500	3,4
Západní Asie	4,0	1,5	1 600	6,9

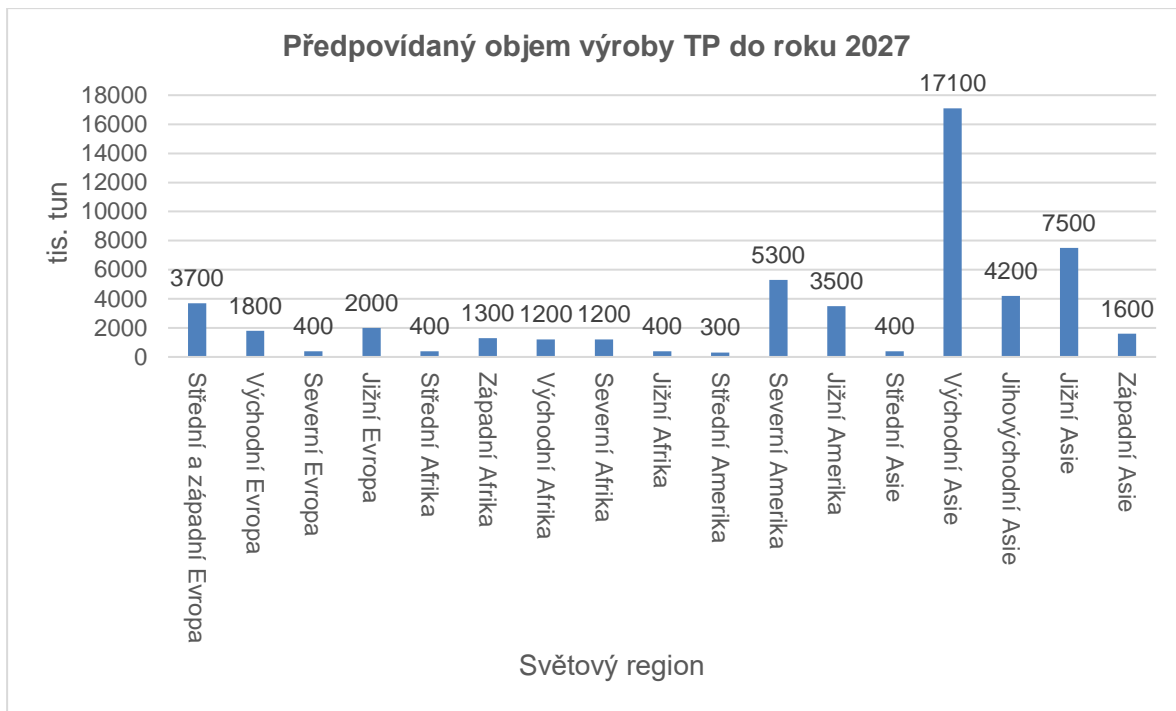
Graf. 1 komparativně znázorňuje předpokládaný nárůst objemu produkce TP v roce 2024 a do roku 2027, což naznačuje perspektivu vývoje určitých trhů.



**Graf. 1** Předpovídaný nárůstu objemu výroby TP do roku 2027 v hlavních světových regionech (Statista, 2023)

Z uvedených dat v Tab. 14 a Graf. 1 vyplývá, že nejvyšší kombinovaná roční míra růstu objemu výroby TP do roku 2027 se předpokládá pro Západní Afriku (11,4 %) a Východní Asii (8,1 %). Pak následují Střední, Východní a Jihovýchodní Afrika a Střední Asie, pro kterou je CAGR kolem 6 %. Nejvyšší předpokládaný nárůst objemu výroby TP v roce 2024 se očekává ve Východní Asii (6 %) a poté v Střední a Východní Africe a Jižní Asii, pro které je očekáván nárůst kolem 4 % (Statista, 2023).

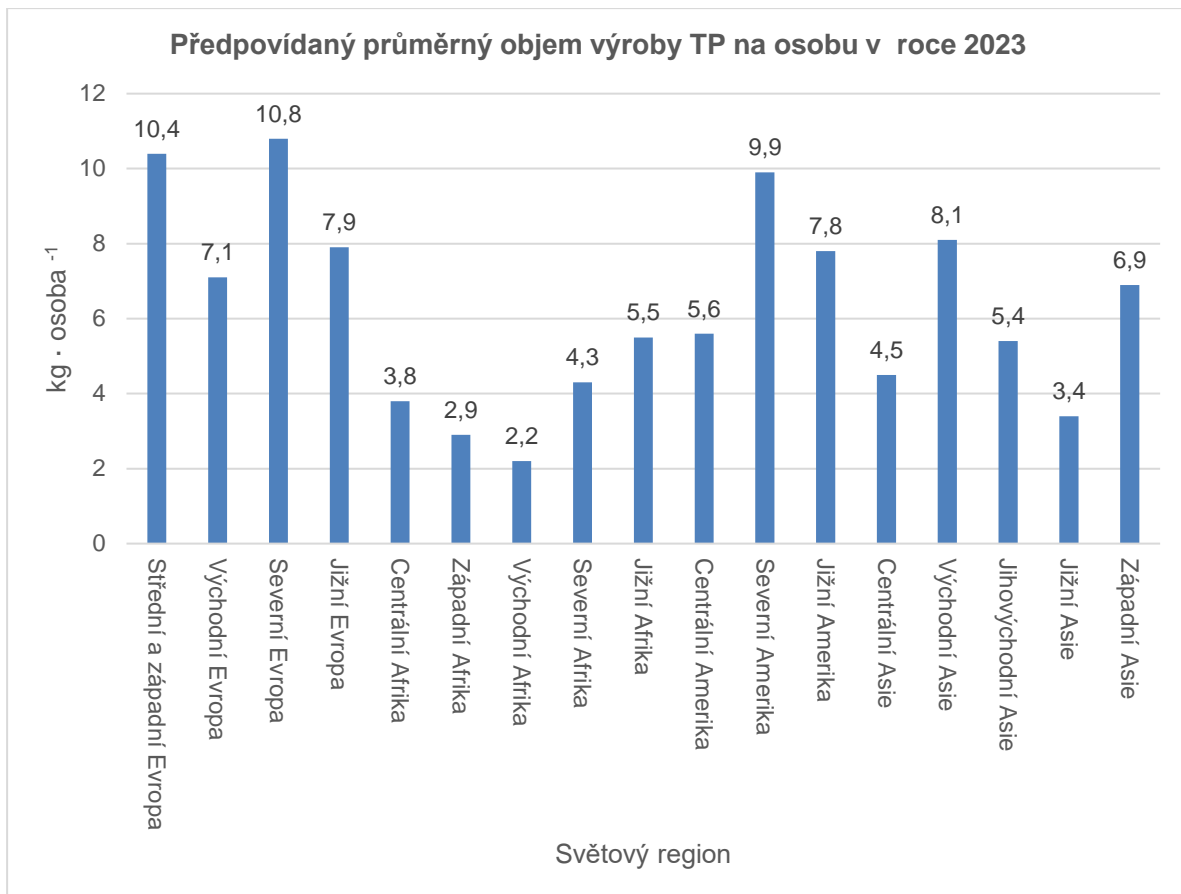
Graf. 2 znázorňuje odhadovaný objem výroby TP až do roku 2027. Tento odhad nabízí přehled tržního potenciálu recyklace TP z OV bez ohledu na regionální rozlohu a počet obyvatel, současně je ale třeba propojit ho s mírou výstavby kanalizační infrastruktury, což bude podrobněji popsáno v závěru této kapitoly.



**Graf. 2** Předpovídaný objem výroby TP do roku 2027 v hlavních světových regionech (Statista, 2023)

Z hodnot uvedených v Graf. 2 je patrné, že výroba TP na východoasijském trhu do roku 2027 bude významně předčít ostatní regiony s předpokládaným objemem produkce ve výši 17 100 tis. tun, a bude ho následovat Jižní Asie s objemem 7 500 tis. tun. Poté Severní Amerika s produkčním objemem 5 300 tis. tun, a pak Jihovýchodní Asie s 4 200 tis. tun, Střední a Západní Evropa s 3 700 tis. tun a Jižní Amerika s 3 500 tis. tun. V rámci celosvětové produkce TP Severní Evropa, Střední a Jižní Afrika a Střední Asie zaujímají nejnižší pozici s objemem 400 tis. tun, přičemž Střední Amerika se umísťuje na posledním místě s objemem 300 tis. tun (Statista, 2023).

Průměrný objem výroby TP na osobu v roce 2023, který je zobrazen v Graf. 3 ilustruje aktuální potenciál recyklace TP vzhledem k počtu obyvatel. Jedná se o nejlepší specifický ukazatel spotřeby TP v různých světových regionech.



**Graf. 3** Předpovídaný průměrný objem výroby TP na osobu v roce 2023 (Statista, 2023)

Na Graf. 3 dle předpokládaných průměrných hodnot objemu výroby TP na jednu osobu v roce 2023 lze pozorovat, že nejvyšší spotřeba na osobu momentálně převažuje v zemích Střední, Západní a Severní Evropy, stejně jako v Severní Americe, kde se hodnoty za rok pohybují kolem 10 kg·osoba<sup>-1</sup>. Nejnižší spotřeba byla očekávaná ve Východní a Západní Africe, kde roční spotřeba činí přibližně 2,5 kg·osoba<sup>-1</sup> (Statista, 2023).

#### Prognóza vývoje kanalizačního systému na celosvětové úrovni

Za účelem vytvoření adekvátního zobrazení kvantitativního výskytu TP v OV na celosvětové úrovni je nezbytné zohlednit objemy produkce, distribuce a úpravy OV v celkovém kontextu.

Tab. 15 prezentuje data týkající se produkce OV na jednoho obyvatele a celkovou produkci, sběr a úpravu OV. Data v Tab. 15 jsou předložena na globální úrovni, jsou rozdělena do regionů a podle úrovně ekonomického rozvoje. Na druhé straně,

Zastoupení úpravy OV (C) sleduje obdobné regionální vzory jako produkce OV. Úprava OV je menší než sběr v regionech Latinské Ameriky a Karibiku a Jižní Asie. Země s vysokými příjmy sbírají a provádějí úpravu větší části svých OV v rozmezí 82 % a 74 %, zatímco země s nízkými příjmy mají nižší míry sběru a úpravy v rozmezí 9 % a 4 %. V kategoriích zemí s dolními středními a nízkými příjmy zůstává neupraveno 40 % a 53 % ze sbíraných OV .

poskytuje informace o OV na úrovni jednotlivých zemí v relačním kontextu za rok na obyvatele, ohledně produkce, procenta produkovaných OV určeného k sběru a úpravě a také globální distribuce ČOV, což umožňuje přímočaré srovnání mezi jednotlivými státy.

Významné disparity v produkci, sběru a úpravě OV se projevují v různých geografických regionech a na různých úrovních ekonomického rozvoje.

**Tab. 15** *Produkce, shromažďování a čištění OV podle světového regionů (Jones et al., 2021)*

Světový region	Globální populace (%)	Produkce OV na osobu ( $\text{m}^3 \cdot \text{rok}^{-1} \cdot \text{osoba}^{-1}$ )	Produkce OV ( $10^9 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$ )	Shromažďování OV ( $10^9 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$ )	Čištění OV ( $10^9 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$ )
Globální	100	49	359,4	225,6	188,1
Severní Amerika	4,9	209,5	74,7	59,1	50,6
Latinská Amerika a Karibik	8,5	67,6	42,1	25,2	15,4
Západní Evropa	5,7	91,7	38,5	33,7	33
Střední východ a Severní Afrika	5,8	51,4	21,9	16,1	11,4
Subsaharská Afrika	13,6	11	11	2,5	1,8
Jižní Asie	23,8	14,6	25,6	7,8	4
Východní Evropa a střední Asie	6,6	57,9	28,2	18,4	14,9
Východní Asie a Tichomoří	31,1	51,5	117,6	62,8	57

zobrazuje údaje o produkci, shromažďování a čištění OV, podané na úrovni jednotlivých zemí, které jsou seskupeny v Tab. 15 (Jones et al., 2021).

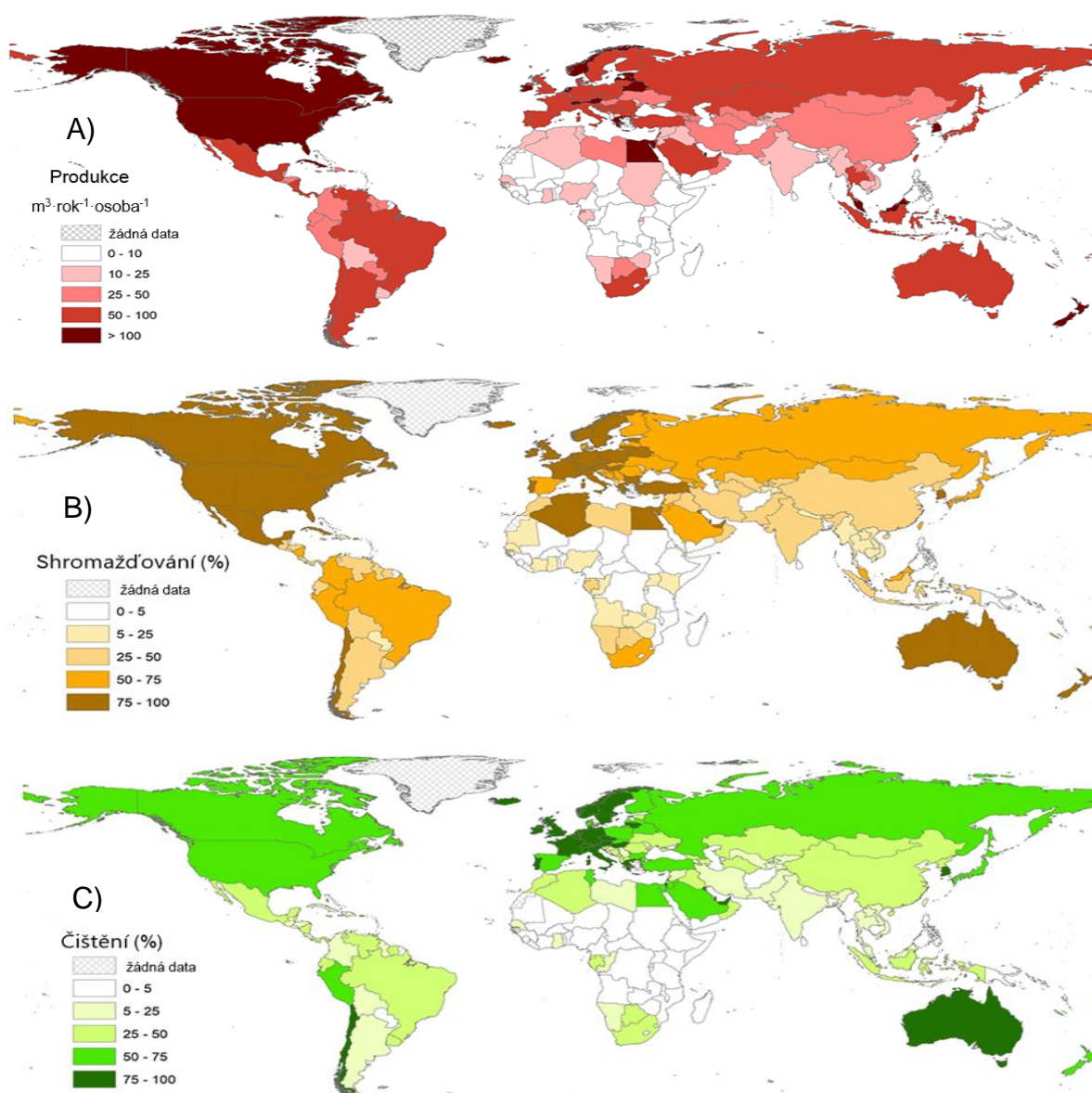
Produkce OV na jednoho obyvatele (A) vykazuje výrazně nejvyšší hodnoty v Severní Americe, dosahující  $209,5 \text{ m}^3 \cdot \text{rok}^{-1} \cdot \text{osoba}^{-1}$ , což představuje více než dvojnásobek produkce v Západní Evropě, kde bylo změřeno  $91,7 \text{ m}^3 \cdot \text{rok}^{-1} \cdot \text{osoba}^{-1}$  (Jones et al., 2021). Oproti tomu většina sub-saharských afrických zemí produkuje méně než  $11 \text{ m}^3 \cdot \text{rok}^{-1} \cdot \text{osoba}^{-1}$ , což je přibližně dvacetkrát méně OV než v Severní Americe (Jones et al., 2021).

Na (B) je vidět, že region Východní Asie a Pacifiku produkuje největší objemový průtok OV ( $109 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$ ), což koresponduje s vysokým podílem na světové populaci 31,1 % (Jones et al., 2021). Naopak Jižní Asie přispívá pouze cca 7 % celosvětových OV přes svůj podíl ve světové populaci 23,8 %, zatímco Severní Amerika, s 4,9 % obyvatel světa, přispívá cca 20 % celosvětové produkce OV (Jones et al., 2021).

Sběr a úprava OV (B a C) vykazují nejvyšší hodnoty v Západní Evropě, kde dosahují úrovní 88 % a 86 %, zatímco nejnižší hodnoty zaznamenáváme v Jižní Asii (31 % a 16 %) a sub-saharské Africe (23 % a 16 %) (Jones et al., 2021). Region Východní Asie a Pacifiku, i přes vysokou celkovou produkci OV, eviduje nízké míry

sběru OV a naopak, sběr OV v regionu Středního východu a Severní Afriky dosahuje vysoké hodnoty 74 %, což lze vysvětlit nedostatkem obnovitelných zdrojů vody (Jones et al., 2021).

Zastoupení úpravy OV (C) sleduje obdobné regionální vzory jako produkce OV. Úprava OV je menší než sběr v regionech Latinské Ameriky a Karibiku a Jižní Asie. Země s vysokými příjmy sbírají a provádějí úpravu větší části svých OV v rozmezí 82 % a 74 %, zatímco země s nízkými příjmy mají nižší míry sběru a úpravy v rozmezí 9 % a 4 %. V kategoriích zemí s dolními středními a nízkými příjmy zůstává neupraveno 40 % a 53 % ze sbíraných OV (Jones et al., 2021).

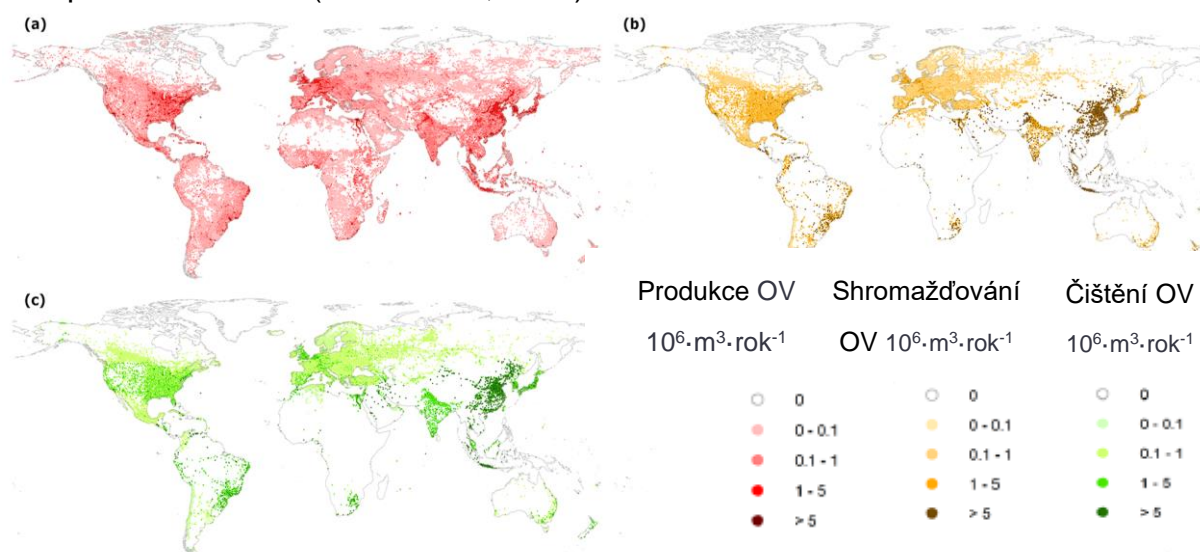


**Obr. 18** Produkce, shromažďování a čištění OV v regionech světa (Jones et al., 2021)

A) produkce, B) shromažďování a C) čištění



Obr. 19 umožňuje identifikaci geografických oblastí s výraznou koncentrací OV. Produkce OV souvisí s přítomností rozlehlých městských regionů, kde se shromažďuje značná část domácích a průmyslových aktivit (Obr. 19a). V opačném extrému se produkce OV přibližuje nule v oblastech s nízkou hustotou zalidnění a minimálními průmyslovými aktivitami, jako jsou oblasti Sahary, vnitrozemská Austrálie a oblasti s vysokou zeměpisnou šířkou, jako jsou severní Kanada a Rusko. V zemích s výrazným centrálním uspořádáním a minimálním počtem měst, například na Středním východě a v Austrálii, jsou patrné omezené skupiny s významnou produkcí OV. Sběr OV (Obr. 19b) a jejich následná úprava (Obr. 19c) jsou koncentrovány převážně v urbanizovaných oblastech, jako je tomu v Jižní Americe a subsaharské Africe. Naopak decentralizovaný sběr a úprava OV jsou přítomny v oblastech, kde jsou míry sběru a úpravy OV vysoké, jak lze vidět v západní Evropě a Skandinávii (Jones et al., 2021).



**Obr. 19** Hustota produkce, shromažďování a čištění OV ve světovém měřítku (Jones et al., 2021):

a) produkce, b) shromažďování a c) čištění

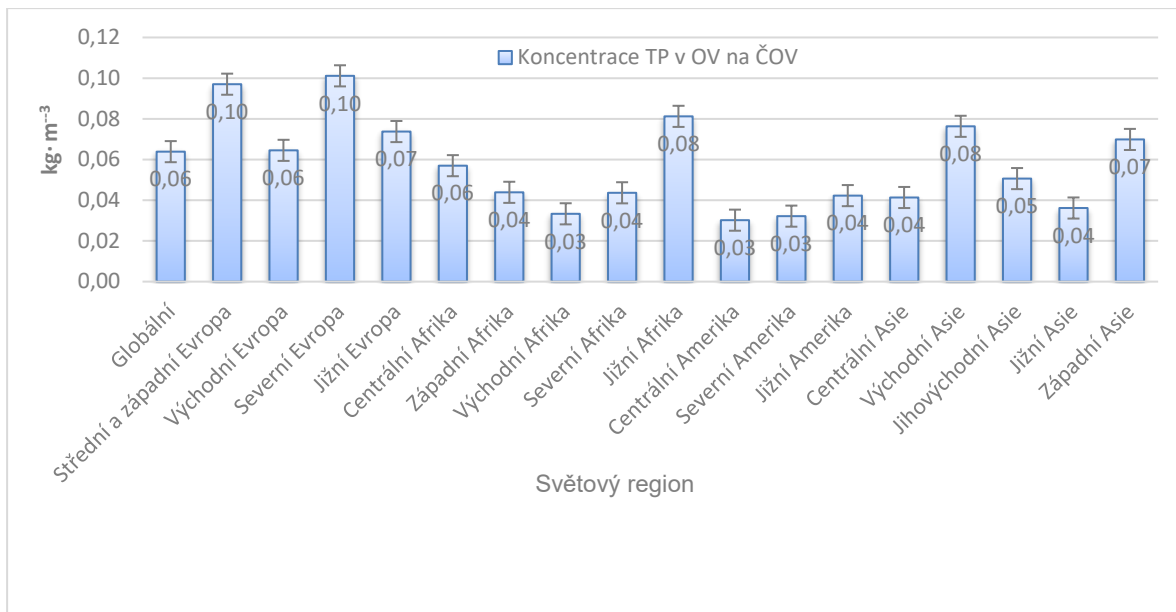
Bez ohledu na geografickou polohu existují výrazné rozdíly mezi ekonomickými kategoriemi, poměry mezi bohatstvím a produkcí OV (Jones et al., 2021). Produkce OV na osobu se zdvojnásobuje s každou úrovní klasifikace příjmů a obnáší  $6,4 \text{ m}^3 \cdot \text{rok}^{-1} \cdot \text{osoba}^{-1}$  při nízkém příjmu až po  $126,0 \text{ m}^3 \cdot \text{rok}^{-1} \cdot \text{osoba}^{-1}$  pro oblasti s vysokým příjmem (Jones et al., 2021).

V Tab. 16 jsou zpracovaná statistická data týkající se prognózy výroby TP (sloupec 2) propojena s prognózou rozvoje kanalizační infrastruktury (sloupec 3 a 5) (Jones et al., 2021) s cílem získat orientační hypotetické údaje o koncentraci TP v OV ve světovém měřítku (sloupec 4 a 6). Parametr uvedený ve sloupci 6 v Tab. 16 poskytuje hrubý přehled o tom, v kterých světových regionech by se mohlo uvažovat o exploataci celulózy z OV z hlediska ekonomické rentability.

**Tab. 16** Hypotetická koncentrace TP v OV ve světovém měřítku

1-Světový region	2-Předpovídaný průměrný objem výroby TP na osobu v roce 2023 (kg·rok <sup>-1</sup> osoba <sup>-1</sup> )	3-produkce OV na osobu (m <sup>3</sup> ·rok <sup>-1</sup> osoba <sup>-1</sup> )	4-Koncentrace TP v produkované OV (kg·m <sup>-3</sup> )	5-procento čištění z produkované OV %	6-Koncentrace TP která končí na ČOV (kg·m <sup>-3</sup> )
Globální	5,98	49,0	0,12	0,52	0,06
Střední a západní Evropa	10,4	91,7	0,11	0,86	0,10
Východní Evropa	7,1	57,9	0,12	0,53	0,06
Severní Evropa	10,8	91,7	0,12	0,86	0,10
Jižní Evropa	7,9	91,7	0,09	0,86	0,07
Střední Afrika	3,8	11,0	0,35	0,16	0,06
Západní Afrika	3,0	11,0	0,27	0,16	0,04
Východní Afrika	2,2	11,0	0,20	0,16	0,03
Severní Afrika	4,3	51,4	0,08	0,52	0,04
Jižní Afrika	5,5	11,0	0,50	0,16	0,08
Střední Amerika	5,6	67,6	0,08	0,37	0,03
Severní Amerika	10,0	209,5	0,05	0,68	0,03
Jižní Amerika	7,8	67,6	0,12	0,37	0,04
Střední Asie	4,5	57,9	0,08	0,53	0,04
Východní Asie	8,1	51,5	0,16	0,48	0,08
Jihovýchodní Asie	5,4	51,5	0,10	0,48	0,05
Jižní Asie	3,4	14,6	0,23	0,16	0,04
Západní Asie	6,9	51,4	0,13	0,52	0,07

V Graf. 4 jsou graficky zpracovány poměry mezi hypotetickou přepočítanou hodnotou koncentrace TP, který končí v OV na ČOV na celosvětové úrovni. Data prezentována na Graf. 4 ilustrují přepočítané hodnoty ze sloupce 6 Tab. 16.



**Graf. 4** Hypotetická koncentrace TP v OV na ČOV ve světovém měřítku

Nejvyšší hodnoty; hypotetické koncentrace TP v OV jsou přepočítány na 0,10 kg·m<sup>-3</sup> pro Severní, Západní a Střední Evropu. Následují Jižní a Východní Asie s hodnotou 0,08 kg·m<sup>-3</sup> a Západní Asie a Jižní Evropa s hodnotou 0,07 kg·m<sup>-3</sup>. Východní Evropa a Centrální Afrika odpovídají hodnotě 0,06 kg·m<sup>-3</sup> na globální úrovni.

Analýza uvedená v této kapitole může sloužit k orientačnímu určení zaměření těžby TP z OV na ČOV v určitých světových regionech v časovém horizontu pěti let.

### 3.5 OD ODPADNÍ CELULÓZY AŽ K PRODUKTU

Celulóza je jedním z materiálů, který lze získat z OV, obdobně jak je tomu například u recyklace P a N. Odstraněním celulózy z přítoku OV na ČOV se nevyrobí pouze materiál využitelný například v biokompozitech a stavebnictví, ale také jeho separací na začátku čistícího cyklu se sníží samotná produkce sekundárního ČK a sníží se spotřeba elektrické energie na ČOV.

Separaci celulózy na přítoku OV na ČOV dochází nejen k těžbě materiálu vhodného pro následné využití v biokompozitech a stavebnictví, ale při separaci na začátku procesu čištění OD dojde také ke snížení produkce CHSK a ke snížení potřeby energie na ČOV. V Nizozemsku například je cílem získat zpět 25 % veškeré celulózy z nizozemských OV během 10 let a současně je důležitým aspektem možnost opakovaného využití regenerované celulózy jako atraktivního recyklovaného biologického zdroje (Marcelis & Wessels, n.d.).

Aplikace regenerované celulózy, při dodatečné úpravě nebo bez ní, byla zkoumána ohledně potenciální aplikace v asfaltu, možnosti přeměny celulózy na PLA, AD za účelem výroby biometanu a aplikace sušené regenerované celulózy v biokompozitech. Analýza trhu ukázala, že existuje velký zájem o celulózu, která se získává z OV a kterou lze použít jako recyklovatelný udržitelný produkt (Marcelis & Wessels, n.d.). Odhadnutá produkce celulózy z OV na ČOV je

2-7,3 kg·EO<sup>-1</sup>·rok<sup>-1</sup> (*Scale-Up Of Low-Carbon Footprint Material Recovery Techniques In Existing Wastewater Treatment Plants*, 2023).

V rámci této kapitoly je popsáno 6 komerčních produktů vyrobených z regenerované celulózy: i) celulózová vlákna, ii) čistá regenerovaná celulóza, iii) produkce PLA, iv) produkt *Recel*®, v) produkt *Recylóza*® a vi) celulózové nanokrystaly.

#### i) Celulózová vlákna

Na ČOV Blaricum (30 000 EO) po hrubém sítu 6 mm a po lapači písku bylo nainstalováno poloprovozní síto <0,35 mm při konstantním průtoku 200 m<sup>3</sup>·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>. Průměrná účinnost separace přes síto byla zhruba 50 % pro NL v rozmezí 10-75 %, 35 % pro CHSK v rozmezí 10-60 % a přibližně 1 % pro N a <1 % pro P. Na základě pilotního výzkumu bylo zjištěno, že síto s průlinami <0,35 mm odstraňuje většinu celulózových vláken. Byl použit *Salsnesův filtr typ SF200*, s průtokovou kapacitou 35 L·s<sup>-1</sup> a 0,35 mm síto na 0,5 m<sup>2</sup> efektivního povrchu pásu. Průměrní délka celulózových vláken v TP je v rozmezí 1-1,2 mm a během přepravy v stokové síti se nemění. Aby většina zbývající částicové frakce prošla sítím, musí být udržováno nízké hydraulické zatížení (Ruiken et al., 2013). Proséváním aplikovaném při suchém počasí může být celková spotřeba energie ČOV včetně sušení kalu snížena nejméně o 40 % s dobou návratnosti 7 let. Síta lze použít k odstranění frakce inertních CHSK v OV (Ruiken et al., 2013).

#### ii) Produkt čisté regenerované celulózy

Projekt *CADoS* se zaměřuje na opětovné použití celulózy z TP oddělením celulózových vláken od surové městské OV pomocí vyhrazeného *finescreening* procesu (Wouters et al., 2017).

Projekt odvodňování kalu *CADoS* (Wouters et al., 2017) je zaměřen na separaci celulózových vláken z TP z OV pomocí technologie jemného prosévání. Technologie spočívá ve vytvoření filtračního koláče na rotačním pásu jemných filtrů tím, že se oddělují menší částice na sítu. Potom filtrační koláč klesne do drenážního lisu obsahujícího 60 až 80 % celulózových vláken. Biologický stupeň produkuje přebytek aktivovaného kalu extrahovaného z proudu konvenčním způsobem. Kal se stahuje přímo z aktivační nádrže a současně se přivádí do odvodňovacího lisu, který je odvodněný na nejméně 30 % sušiny. Odvodněný kal a buničina jsou přepravovány do kontejneru a poté kamionem do posledního bodu procesu, kde se vyrábí bioplyn (pro vytápění domácností, palivo pro automobily atd.), ale i jako surovina pro bioplasty (Wouters et al., 2017).

#### iii) Produkce bioplastu-polylaktické kyseliny

*Cellu2PLA* projekt představuje konverzi celulózy speciální fermentací na sacharidy, které jsou zdrojem potravy pro bakterie, které produkují bioplast - PLA. Odstraněním celulózových vláken pomocí technologie *Cellu2PLA* s velmi jemným filtrem můžeme z OV odstranit přibližně 70 % vláken TP. Získaná vlákna se mohou nechat fermentovat do bioplynu (*Demonstration of an innovative process to produce biobased plastic out of cellulose recovered from domestic waste water*, 2021).

iv) Produkt *Recell*®

Pomocí instalace procesu *Cellvation*® na ČOV Geestmerambacht v Nizozemsku, který má kapacitu  $90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , z městských OV je možné separovat kolem 400 kg čisté celulózy denně. Technologie dynamického prosévání v rámci projektu *SMART-Plant* je ilustrována na Obr. 20 (*SMART-Plant*, 2023). Tato středně velká ČOV pracuje s průtokem v suchém počasí  $4\,160 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a maximálním průtokem  $16\,300 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Instalace *Cellvation*® je mimo jiné složená z jemného síta. Prosetá frakce obvykle obsahuje 80 % vláken celulózy a zbývající část tvoří proteiny, tuky a popel. Množství ČK produkovaného na místě se snížilo o 35 % při použití instalace *Cellvation*®. Separace PCK má další dopad na celkový technologický proces, například na snížení energetické náročnosti provzdušňování až o 20 %, snížení objemu kalu až o 10 %, snížení NL až o 55 % a CHSK až o 30 % ve východním influentu a také snížení uhlíkové stopy až o 15 % (Pikaar et al., 2022).

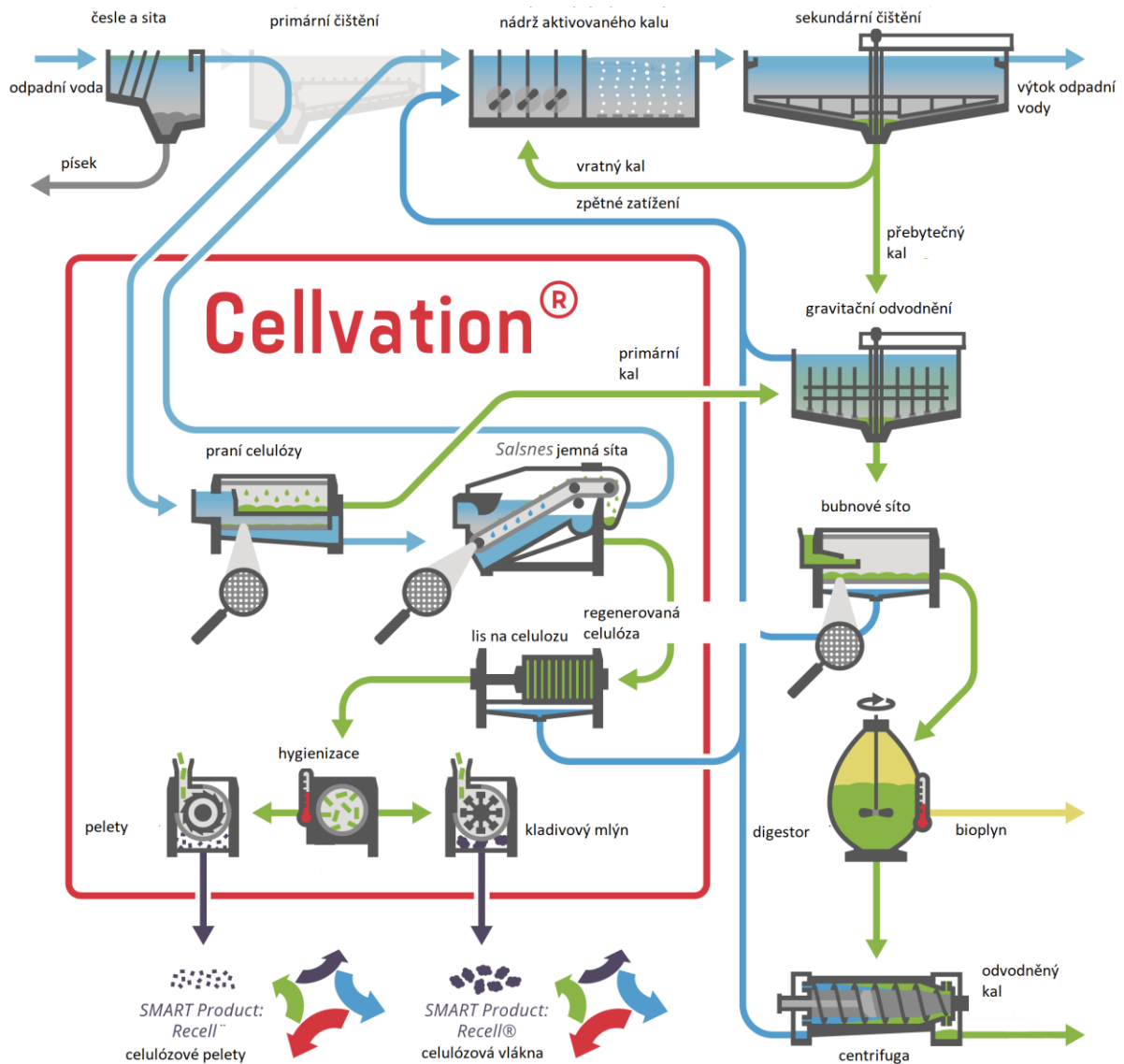


**Obr. 20** Získávání celulózy dynamickým proséváním v primárním čištění, ČOV Geestmerambacht, Nizozemsko (Pikaar et al., 2022)

Proces získávání celulózy pomocí technologií CellCap je znázorněn na Obr. 21. Byl vyvinut speciální proces s názvem *Cellvation*® k oddělení celulózy z přítoku splaškové vody a jejímu zpracování do čistých celulózových vláken: produkt *Recell*®. Během primárního čištění speciální *Salsnes* jemné síto oddělovalo celulózová vlákna od splaškové vody v samostatném stupni, kde se dále PCK zpracovávala na čistá celulózová vlákna (*SMART-Plant*, 2023). Tyto produkty ze separovaných celulózových vláken mohou být využity při stavbě silnic jako přísada do asfaltu, nebo jako surovina pro výrobu biokompozitů a dalších stavebních materiálů (*SMART-Plant*, 2018).

Na Obr. 21 je prezentován zjednodušený schématický přehled celého procesu *Cellvation*<sup>®</sup>. Syrová OV vstupuje do ČOV a prochází hrubým sítem a lapákem písku, který odstraňuje velké částice. Poté začíná proces *Cellvation*<sup>®</sup>, při kterém je OV čerpána přes dosazovací pískovou nádrž, aby se odstranily snadno usazující pevné látky. Zbývající OV prochází zařízením, které odděluje celulózová vlákna od větších částic a vlasů (Pikaar et al., 2022). Nátok OV je pak přiveden k jemným síťovým filtrům RBF (*Rotating belt filtration*) (Franchi & Santoro, 2015). Filtrát je vypouštěn a pevné látky jsou odstraňovány z filtru pomocí čistícího systému, který využívá tlak vzduchu na konci oblasti filtrace (Franchi & Santoro, 2015). Celulózová vlákna pocházející z RBF prochází zvlhčovací jednotkou spojenou s filtrem a následně jsou dalšími etapami odváděna pomocí lisu na celulózu. Suché pevné látky opouštějící lis na celulózu jsou hygienizovány, vysoušeny a upravovány na celulózová vlákna nebo CP (Pikaar et al., 2022).

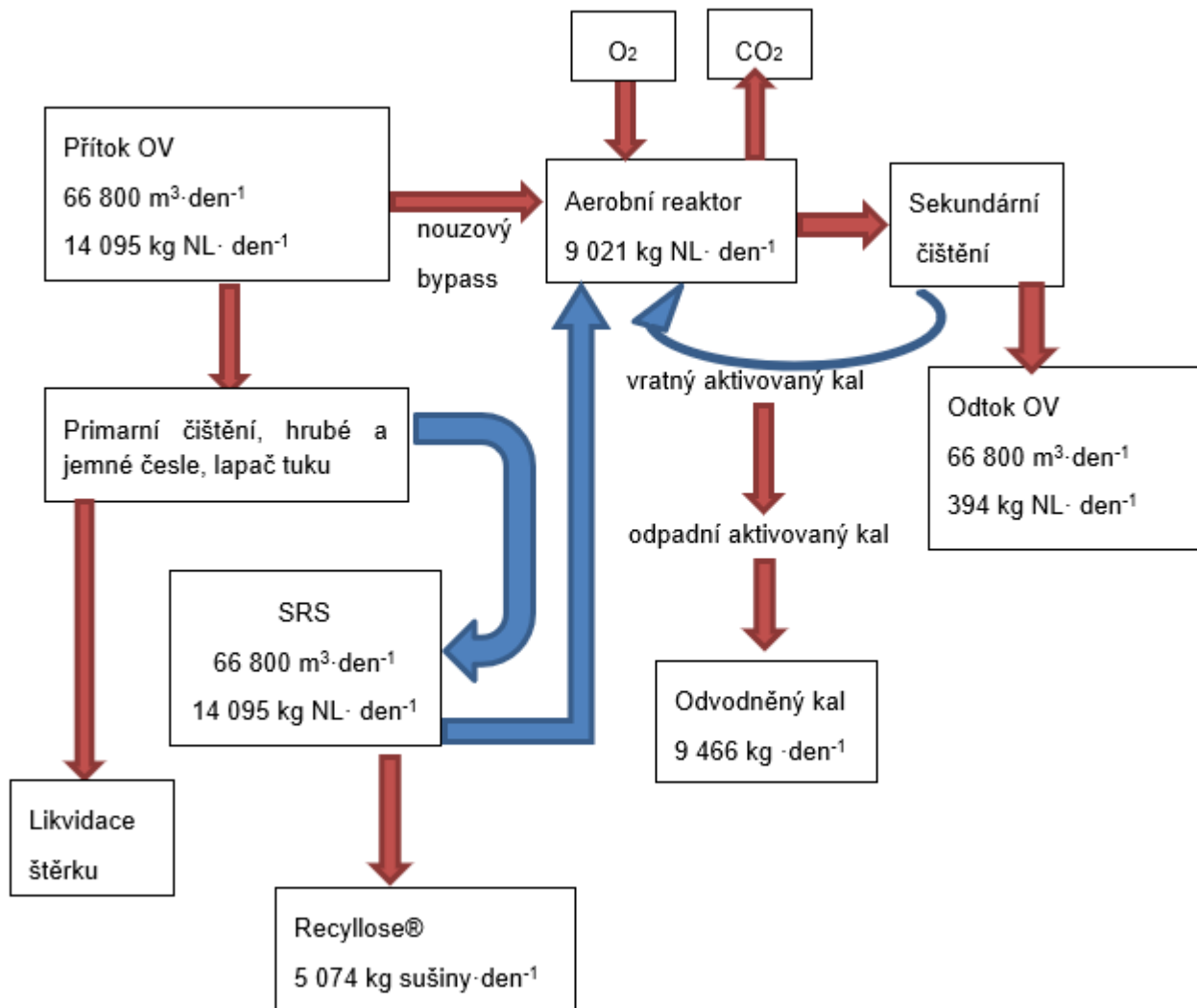
V nádrži aktivovaného kalu je redukována zátěž OL díky objemu PCK, což vedlo k zvýšení kapacity čištění a snížení spotřeby energie pro provzdušnění až o 20 % (*SMART-Plant*, 2018). Proces hygienizace PCK vede k dosažení hodnocení EPA třídy pro výsledný celulózový produkt (*Cellulose Products Manufacturing Risk and Technology Review*, n.d.). Díky separaci PCK v primárním stupni se snižuje objem přebytečného kalu, což vede k redukci spotřeby polymerů pro odvodnění a k nižším nákladům na jeho likvidaci (*SMART-Plant*, 2018).



**Obr. 21** Technologické schéma procesu výroby CP a vláken v rámci projektu SMART-Plant, Cellvation® na ČOV Geestmerambacht, Nizozemsko (Pikaar et al., 2022)

#### v) Produkt Recylóza®

Obr. 22 schematicky prezentuje SRS na ČOV Aarle-Rixtel (272 000 EO) instalovaný v Nizozemsku. Výsledkem procesu recyklace celulózy je produkce 240 kg·den<sup>-1</sup> Recyllose™, která má 82 % sušiny. Redukce kalu je 30 % a úspory pro ČOV vynášejí kolem 31 % denních provozních nákladů. Produkt recyklované celulózy je ve formě buničiny nebo CP, která je dále využívána jako biopalivo nebo pro jiné účely (*Installation of SRS (Sewage Recycling System) at Aarle-Rixtel WWTP, 2014*).



**Obr. 22** Systém pro recyklaci celulózy (Sewage Recycled System) v plném měřítku. Data jsou založena na extrapolovaných hodnotách a hmotnosti jsou založeny na sušině (Installation of SRS (Sewage Recycling System) at Aarle-Rixtel WWTP, 2014)

#### vi) Celulóзовé nanokrystaly

Získávání celulóзовých nanokrystalů z celulóзовého kalu je stále předmětem výzkumů. Na ČOV Blaricum (30 000 EO, 1600 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>) v Nizozemsku, velká část celulózy (13-15 %) byla obsažena v přebytečném kalu aerobního granulátu produkovaného technologií OV Nereda®. OV je prosévána nejprve jemným sítem velikosti 6 mm a poté je jemně prosetá rotačním pásovým filtrem vybaveným sítem o velikosti pórů <0,35 mm. Separované pevné látky byly složeny převážně z vláken TP a zbytků písků, vlasů, listů a nedefinovaných materiálů. Celkový obsah pevných látek byl 162 ± 8 g·kg<sup>-1</sup>, a tekutých látek 150 ± 9 g·kg<sup>-1</sup> (Espíndola et al., 2021). K izolaci celulóзовých nanokrystalů z TP a celulózy získané z OV byla použita řízená kyselá hydrolýza (Espíndola et al., 2021). Během této studie, byla vyvinuta metoda extrakce celulózy, umožňující regeneraci buničiny s čistotou přes 86 % hmotnosti.



Nanocelulózové kompozity prokázaly vynikající mechanické a tepelné vlastnosti a zároveň zachovaly propustnost světla a biologickou rozložitelnost. Biokompozity z OV, případně i ve spojení s jinými regenerovanými materiály, mohly by vést k vývoji nových udržitelných vysoce výkonných materiálů (Espíndola et al., 2021).

## 4 ZÍSKÁVÁNÍ CELULÓZY PRO MATERIÁLOVOU TRANSFORMACI

V rámci čtvrté kapitoly jsou prezentovány materiály a metody využitě k získávání celulózy pro její následnou materiálovou transformaci. Konkrétně je zde analyzována metodologie experimentálního výzkumu, která tvoří praktickou část disertační práce.

Úkolem praktické části disertační práce bylo získat celulózu z přítoku OV na ČOV Brno – Modřice proséváním přes jemná síta 0,3 mm. PCK bylo nutné gravitačně odvodnit a solárně usušit. Z připravené filtrační hmoty byly vyrobeny CP stlačením připraveného PCK na požadovanou velikost. Energetická hodnota CP byla určena technologií STP. Termickým zpracováním PCK metodou STP vznikly PUP, PO a PP.

Zařízení stíraného válcového síta na separaci PCK v primárním stupni čištění OV bylo instalováno na ČOV Brno – Modřice. Pro materiálovou transformaci vytěženého PCK bohatého na OL, zahrnujícího mimo jiné vysoký podíl gastro odpadu, byla použita STP instalovaná a provozovaná ve výzkumném centru AdMaS.

V rámci svého výzkumu jsem provedla tři etapy experimentů:

1. Etapa I experimentu: automatická dynamická separace přes mikro síto vláken TP,
2. Etapa II experimentu: manuální statická separace přes mikro síto vláken TP,
3. Etapa III experimentu: peletizace a pyrolýza PCK.

V rámci etapy I výzkumu byla nainstalována poloprovozní jednotka stíraného válcového mikrosíta s velikostí průlin 0,3 mm za lapákem písku a tuku na místě primárního čištění na ČOV Brno – Modřice. V tomto kroku byl jednostupňově separován a solárně usušen PCK původem z TP v nátoce OV na ČOV.

Jako součást etapy II byla provedena manuální statická dvoustupňová separace PCK, který byl separován v etapě I experimentu. Prosévání přes mikrosíto s průlinami velikosti 0,4 mm bylo provedeno na AdMaS.

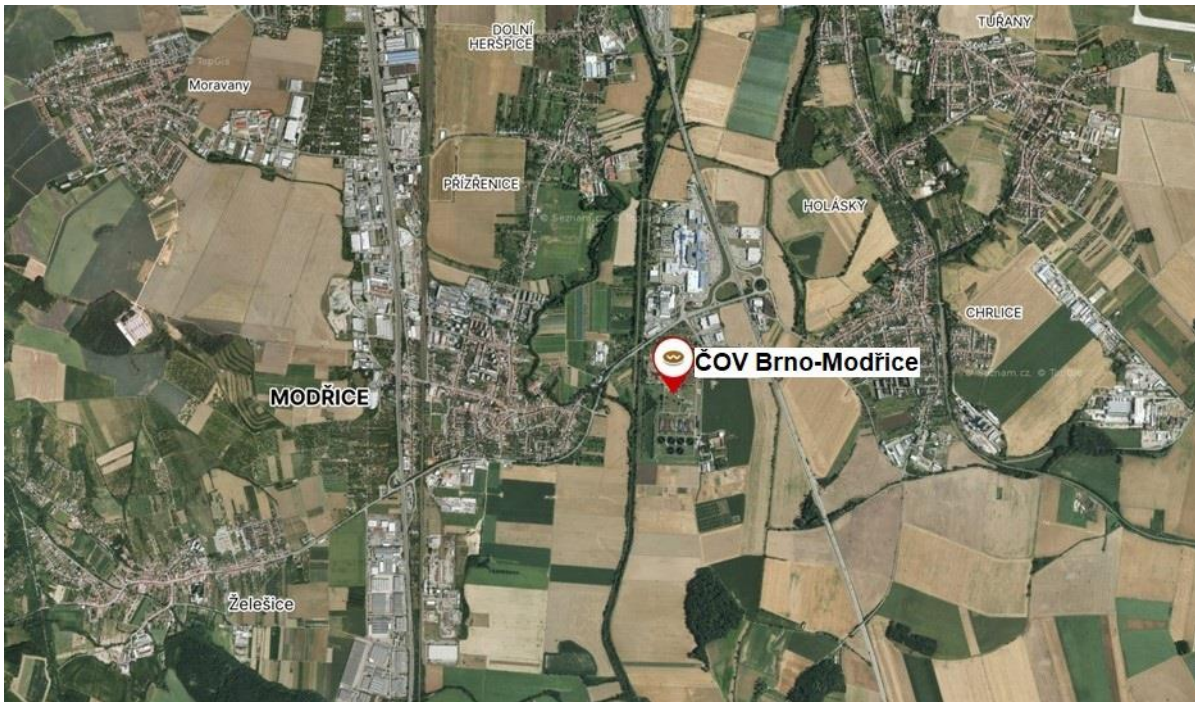
Etapa III experimentální části zahrnovala přípravu CP z usušeného PCK a jejich následnou STP na pyrolytické jednotce v AdMaS. Během tohoto procesu materiálové transformace z PCK byly získány PUP, PO a PP.

Dále byly provedeny vybrané laboratorní analýzy, a to stanovení vlhkosti, ztráty žíháním, obsahu OL, výhřevnosti a TK. Bylo také provedeno pozorování celulóзовých vláken z TP pod mikroskopem.

### 4.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE O PODMÍNKÁCH EXPERIMENTU

Etapa I výzkumu probíhala na ČOV Brno – Modřice, která sídlí ve městě Modřice, jižně od Brna. Na Obr. 23 je zobrazena situace širších vztahů ČOV Brno – Modřice. ČOV Brno – Modřice je určena pro čištění OV přiváděných systémem kanalizačních stok z města Brna a částečně z širokého okolí Brna. Jedná se o konvenční dvoustupňovou mechanicko-biologickou ČOV s nitrifikačním a denitrifikačním

stupněm a anaerobní stabilizací ČK, s návrhovou kapacitou 640 000 EO (ČOV Brno – Modřice, n.d.).

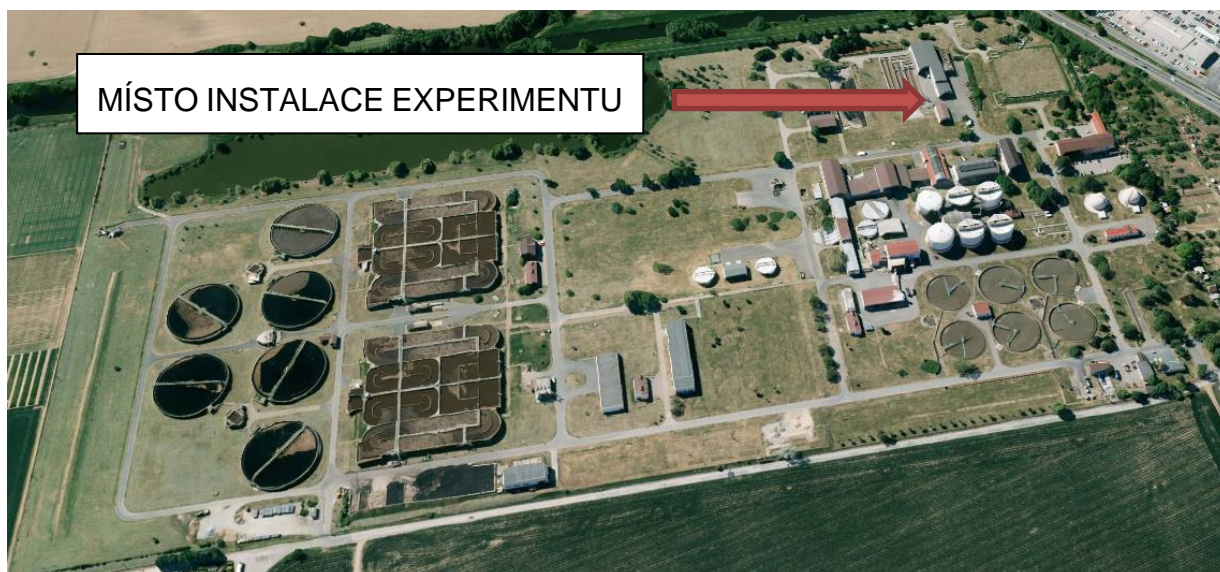


**Obr. 23** Situace širších vztahů lokality ČOV Brno – Modřice (Mapy.cz, 2023)

První stupeň mechanického předčištění zahrnuje dešťovou zdrž na nátoky na ČOV Brno – Modřice, lapák štětku, strojně stírané jemné česle (s průlinou 6 mm), lapáky písku s provzdušňováním a zachycováním tuků pomocí flotace, hlavní čerpací stanice a primární usazovací nádrže (ČOV Brno – Modřice, n.d.).

Biologická část ČOV Brno – Modřice je složena z nitrifikace a denitrifikace s chemickým srážením P ve stanicích pro přidání síranu železitého. Biologické reaktory celkového objemu 110 300 m<sup>3</sup>, jsou rozděleny do čtyř samostatných linek. Z aktivačních nádrží proudí aktivační směs do šesti dosazovacích nádrží o průměru 50 metrů, odkud je vyčištěná voda vedena do řeky Svatky (ČOV Brno – Modřice, n.d.).

Sestava kalového hospodářství je tvořena mechanickým gravitačním zahušťováním primárního kalu, flotačním zahušťováním přebytečného kalu, AD, uskladňovacími nádržemi, strojním odvodněním kalu a sušárnou kalu. Vyprodukovaný bioplyn z procesu vyhnívání je akumulován v membránových plynojemech a je dále využíván v kogeneračních jednotkách na výrobu elektrické energie a tepla (ČOV Brno – Modřice, n.d.).



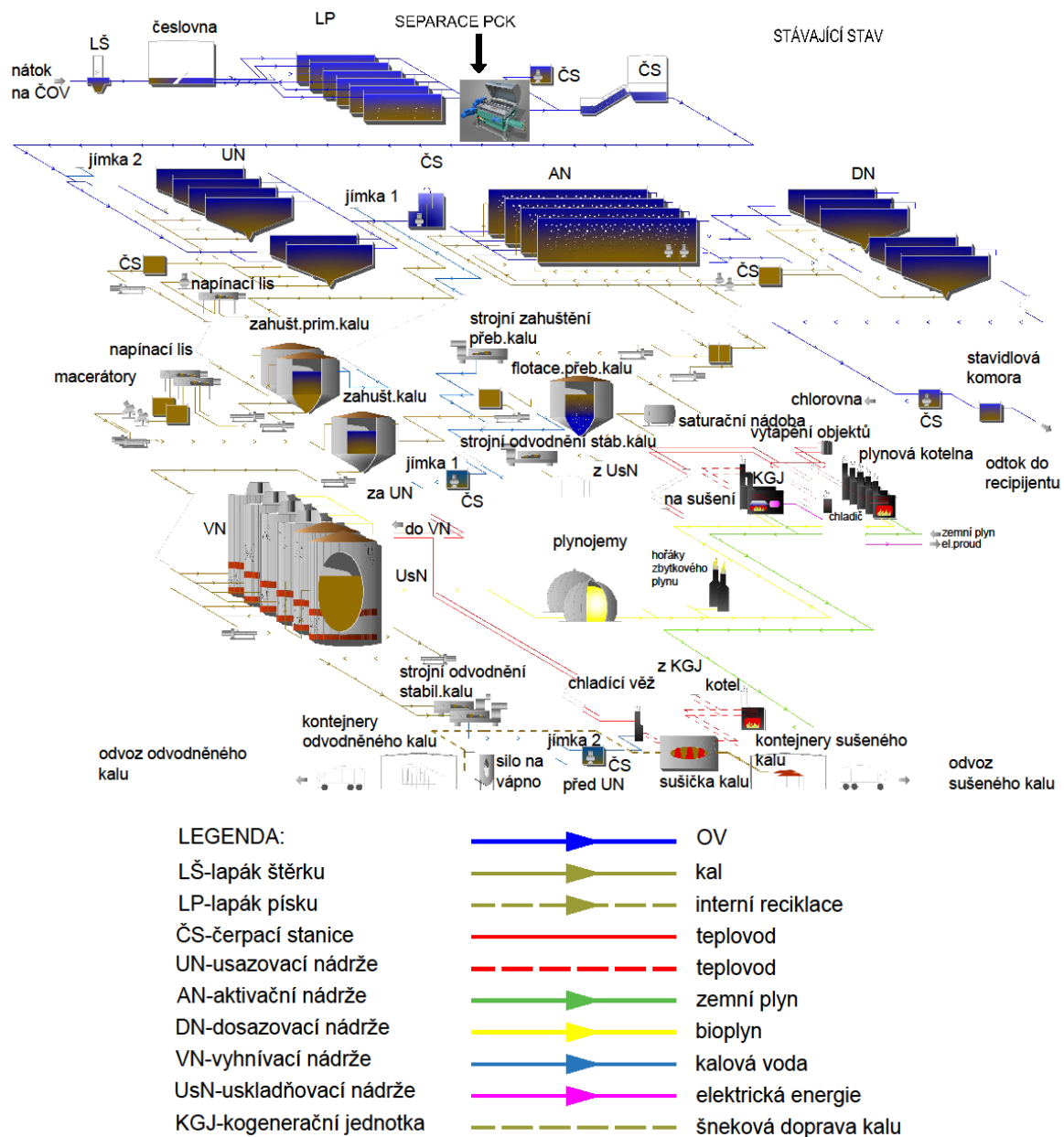
**Obr. 24** Arelál ČOV Brno – Modřice se zobrazením místa instalace zařízení pro provedení experimentu (Mapy.cz, 2023)

Umístění experimentálního poloprovodního zařízení bylo na místě primárního čištění za lapákem písku a tuku (Obr. 24, Obr. 25) .



**Obr. 25** Lokalita experimentu v areálu ČOV Brno – Modřice, detailnější zobrazení (Mapy.cz, 2023)

Na Obr. 26 je zobrazeno technologické schéma ČOV Brno – Modřice, na kterém je šipkou označeno místo instalace separace PCK umístěné za lapákem písku a před čerpací stanicí OV.



**Obr. 26** Dispozice zařízení pro separaci PCK na technologickém schématu ČOV Brno Modřice, zdroj: ("Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.", 2019)

Další navazující výzkum v rámci etap II a III byl lokalizován v areálu výzkumného centra AdMaS VUT v Brně.

#### 4.1.1 Meteorologické podmínky při zahájení experimentu

Výzkum v rámci etapy I probíhal v období od 18. 07. do 31. 07. 2022. Základní informace o klimatických podmínkách (Meteocentrum, 2022) jsou uvedeny v Tab. 17.

**Tab. 17** Základní meteorologické údaje (Meteocentrum, 2022)

Datum	T <sub>min</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	Srážky (mm)
18. 07. 2022	10,0	29,1	0,0
19. 07. 2022	14,0	32,7	0,0
20. 07. 2022	16,0	34,9	0,0
21. 07. 2022	18,0	34,7	0,0
22. 07. 2022	20,0	33,6	0,3
23. 07. 2022	20,0	34,0	0,0
24. 07. 2022	17,0	29,7	0,5
25. 07. 2022	14,0	33,0	0,0
26. 07. 2022	18,0	25,6	22,9
27. 07. 2022	15,0	26,1	5,8
28. 07. 2022	15,0	27,2	1,3
29. 07. 2022	18,0	25,0	0,0
30. 07. 2022	18,0	23,0	1,5
31. 07. 2022	17,0	27,0	21,8

Výzkum v rámci etapy II proběhl dne 15. 09. 2022 na otevřené ploše v areálu výzkumného centra AdMaS za suchého počasí.

Etapa III, skládající se ze dvou fází, byla zahájena první částí, kterou byla peletizace, provedená na otevřené ploše v rámci areálu AdMaS v suchém počasí. Následně, jako druhý krok etapy III, byla provedena STP na pyrolýzní jednotce rovněž v areálu výzkumného centra AdMaS.

## 4.2 POPIS SEPARACE CELULÓZOVÝCH VLÁKEN

### Etapa I experimentu - dynamická separace přes mikro síto vláken TP

Stírané válcové síto-SVSL (výrobce Fontana R, s. r. o) s mikro sítím 0,3 mm je instalováno za lapákem písku a tuku po mechanickém předčištění na ČOV Brno – Modřice (Obr. 27). Zařízení bylo kontinuálně provozováno cca 4 hodiny denně, a to z provozních důvodů (přetížení zařízení, instalace/deinstalace čerpadla, instalace potrubí a zprovoznění zařízení). Zařízení pak pracovalo v kontinuálním čtyřhodinovém cyklu po dobu čtyř dnů (19., 20., 21. a 27. 07. 2022).



**Obr. 27** Zařízení stíraného válcového síta-SVSLs s mikro sítím 0,3 mm, výrobce Fontana R, s. r. o. na ČOV Brno – Modřice

Instalace stíraného válcového síta je znázorněna na fotografiích Obr. 28. OV se na síto čerpala čerpadlem pro OV se základními pracovními parametry  $Q_{\max} = 150 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$  a  $H_{\max} = 7,5 \text{ m}$ . Přecezená voda se vypouštěla zpět do areálové kanalizace OV a získaná hmota se shromažďovala v nádobě a následně solárně sušila.



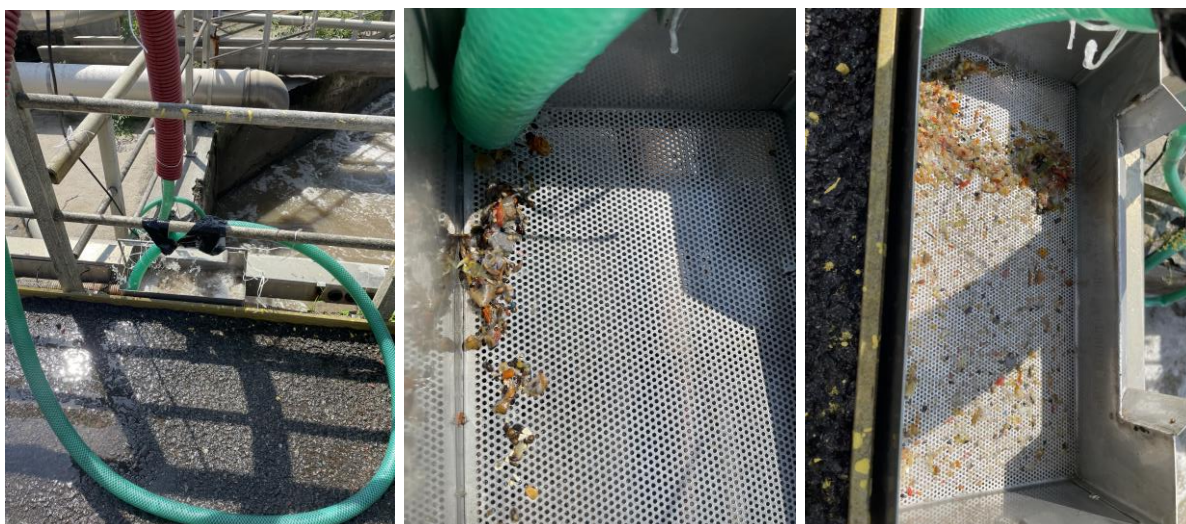
**Obr. 28** Instalace stíraného válcového síta-SVSLs s mikro sítím 0,3 mm, výrobce Fontana R, s. r. o

Šnekové zařízení se zapínalo a vytlačovalo vytěžený PCK, a to do doby, než se dosáhlo určitého množství, což je znázorněno na Obr. 29.



**Obr. 29** Provoz zařízení a separace PCK

Bylo také vyzkoušeno síto 2 mm, aby se posoudilo množství PCK bez ostatních ingrediencí, jako jsou zbytky jídla, semínka apod. Posouzení je ověřeno pomocí instalace síta 2 mm a čerpáním OV na síto, jak je znázorněno na Obr. 30. Bylo zjištěno, že pro filtraci TP je nezbytné stírání nebo ostříkávání síta. Po ostříkávání síta TP se filtruje skrz oka 2 mm a na síti zůstávají jen zbytky jídla a ostatní nečistoty. Vytěžený kal je dopravován do česlovny.



**Obr. 30** Statická filtrace OV přes síto 2 mm

#### Etapa II experimentu - manuální statická separace přes mikro síto vláken TP

V etapě I experimentu na ČOV Brno – Modřice na základě vizuálního zhodnocení bylo konstatováno, že vytěžený PCK obsahuje značné množství gastro odpadu, semena a další organický materiál. Z toho důvodu byla navržena 2. experimentální část-etapa II, ve které se, z předem separovaného a usušeného PCK v laboratorních podmínkách dále separovala přes mikro síto čistá frakce vláken TP (celulóza) pro laboratorní rozборы. Laboratorní instalace pro etapu II výzkumu byla nastavena v areálu výzkumného centra AdMaS VUT v Brně. Stejně jako v prvním vzorku z etapy I experimentu byly vyhodnocovány parametry vlhkosti, ztráty žiháním a TK. Cílem bylo zejména vyhodnotit jen PCK bez ostatních OL. Pro tento účel bylo použito laboratorní síto z nerezové oceli s velikostí ok 2 mm s obdélníkovou prosévací plochou s velikostí ok 0,4 mm a dále pak s kruhovou prosévací plochou průměru 200 mm s rámem 50 mm, viz fotografie na Obr. 31.



**Obr. 31** Laboratorní síta z nerezové oceli: s velikostí ok 2 mm (vlevo) a s velikostí ok 0,4 mm (vpravo)



### 4.3 CHARAKTERISTIKA ODPADNÍ VODY

Základní parametry nátoku OV na ČOV Brno – Modřice během experimentu jsou uvedeny v Tab. 18.

**Tab. 18** Základní parametry nátoku na ČOV Brno – Modřice, zdroj: ("Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.", 2022)

Datum	20. 07. 2022	21. 07. 2022	22. 07. 2022	27. 07. 2022	28. 07. 2022
Průtok (m <sup>3</sup> ·den <sup>-1</sup> )	77 530	77 796	76 436	98 064	78 613
BSK <sub>5</sub> (mg·L <sup>-1</sup> )	395	385	345	375	285
CHSK-Cr (mg·L <sup>-1</sup> )	814	792	743	898	620
VL (mg·L <sup>-1</sup> )	1 300	1 240	1 140	1 340	1 110
NL (mg·L <sup>-1</sup> )	396	314	298	480	290
RL (mg·L <sup>-1</sup> )	904	926	842	860	820
pH	7,59	7,58	7,69	7,57	7,65
Konduktivita (S·m <sup>-1</sup> )	1 444	1 422	1 382	1 313	1 380
NH <sub>4</sub> (mg·L <sup>-1</sup> )	64,1	62,2	61,6	52,7	57,0
N-NH <sub>4</sub> (mg·L <sup>-1</sup> )	50,0	48,5	48,0	41,1	44,5
NO <sub>3</sub> (mg·L <sup>-1</sup> )	<0,20	<0,20	-	<0,20	<0,20
N-NO <sub>3</sub> (mg·L <sup>-1</sup> )	<0,05	<0,05	-	<0,05	<0,05
NO <sub>2</sub> (mg·L <sup>-1</sup> )	<0,02	<0,02	-	<0,02	<0,02
N-NO <sub>2</sub> (mg·L <sup>-1</sup> )	<0,01	<0,01	-	<0,01	<0,01
N-celk. (mg·L <sup>-1</sup> )	68,0	67,3	64,0	62,6	61,7
P-celk. (mg·L <sup>-1</sup> )	8,16	8,71	7,06	8,44	7,33
AOX (mg·L <sup>-1</sup> )	0,395	0,374	-	0,384	0,299

Poznámky: VL – sušina při 105 °C, RL-rozpuštěné látky, AOX – adsorbovatelné organicky vázané halogeny, NO<sub>2</sub> – dusitan, N-NO<sub>2</sub>-celkový dusitan, NO<sub>3</sub> – dusičnan, N-NO<sub>3</sub>-celkový dusičnan, NH<sub>4</sub> amoniakální N, N-NH<sub>4</sub> celkový amoniakální N

### 4.4 ODVODNĚNÍ A SUŠENÍ

Vytěžený PCK bylo nutné v rámci předpřípravy na proces pyrolýzy vysušit (Racek et al., 2020). Vytěžený kal se neprodleně po separaci solárně sušil a po dokončení pracovního dne byl vždy složen do česlovny jako ochrana před případným deštěm (Obr. 32).



**Obr. 32** Solární sušení separovaného PCK

Během celého procesu separace PCK v rámci výzkumu bylo získáno cca 3 kg suchého PCK. Z tohoto množství byl cca 1 kg usušeného PCK opětovně naředěn pro účely dvoustupňové separace a zbývající cca 2 kg suchého PCK bylo využito pro zpracování STP s cílem získání PUP, PO a PP.

#### 4.5 ODBĚR VZORKŮ A PŘÍPRAVA VZORKŮ

Analýzy vlhkosti, pH a ztráty žíháním byly prováděny v laboratoři po dobu 4 dnů experimentu na vzorku čerstvě vytěženého PCK jednostupňovou separací pomocí stíraného válcového síta. V této výzkumné části byly odebrány 4 vzorky čerstvého PCK (vzorek-1, vzorek-2, vzorek-3 a vzorek-4). Během dne a v průběhu dnů se měnila vizuální podoba PCK, včetně vlhkosti, barvy, konzistence a struktury. Vzorek-3 byl odebrán po deštivém dni pro rozšířené laboratorní rozbor, kde byly navíc sledovány další parametry: TK, N, P a TOC. Vzorek vysušeného PCK (vzorek-5) byl odebrán za účelem vytvoření fotografií z mikroskopu a určení vlhkosti a ztráty žíháním. Za účelem mikroskopického sledování bylo nutné tento vzorek v laboratoři homogenizovat a dále zpracovat. Vzorek-6 byl odebrán z dvoustupňové separace, a to v etapě II.

Vizuální stránka, vlhkost, barva, konzistence a struktura kalu se měnila v průběhu dne, a pak i během několika dnů. Obr. 33, Obr. 34 a Obr. 35 vizuálně vykreslují rozdíl v struktuře a barvě PCK v bezdeštném a deštivém období. Po dešti PCK byl tmavý, pravděpodobně tvořený částicemi zeminy a měl více příměsí z listí, semen, trávy apod.



**Obr. 33** Charakteristiky separovaného PCK během bezdeštného období



**Obr. 34** Charakteristiky separovaného PCK během deštivého období



**Obr. 35** Srovnání charakteristiky separovaného PCK v bezdeštném (vlevo) a deštivém (vpravo) období

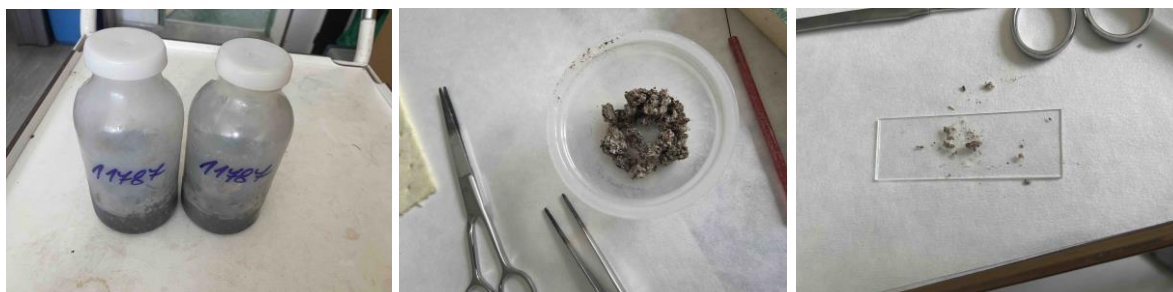
Vzorek-1 čerstvého PCK byl odebrán do laboratoře ve středu 20. 07. 2022.

Vzorek-2 čerstvého PCK byl odebrán do laboratoře ve čtvrtek 21. 07. 2022.

Vzorek-3 čerstvého PCK byl odebrán do laboratoře ve středu 27. 07. 2022 a kal byl tmavý a naředěný po dešti.

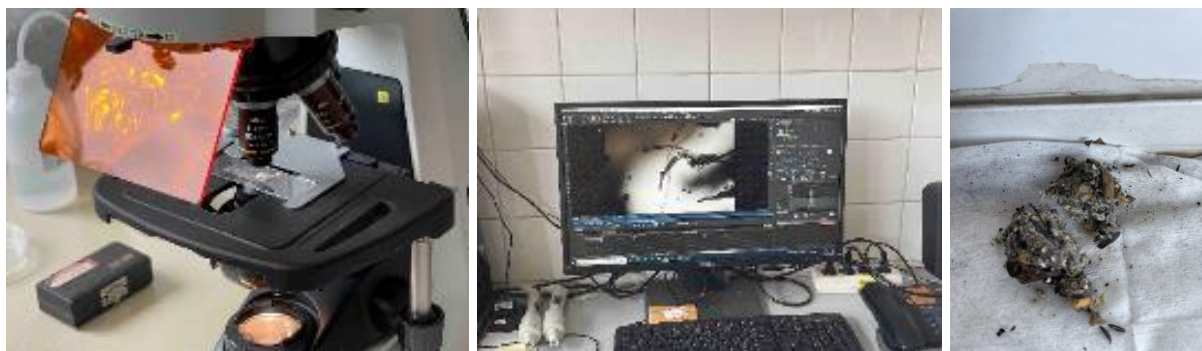
Vzorek-4 čerstvého PCK byl odebrán do laboratoře ve středu 27. 07. 2022.

Vzorek-5 usušeného PCK, který byl odebrán pro účel vytvoření fotografií z mikroskopu (Obr. 36) bylo nutno v laboratoři homogenizovat a zpracovat. Tento vzorek byl odebrán 27. 07. 2022 po srážkách, které byly zaznamenány 26. 07. 2022.



**Obr. 36** Vzorek-4 separovaného PCK z ČOV Brno – Modřice odebrán k určení TK (vlevo) a vzorek-5 (uprostřed a vpravo) určen k pozorování mikroskopem

Na základě usušeného vzorku-5 PCK byly pořízeny fotografie vláken zvětšené 200x pod mikroskopem (Obr. 37).



**Obr. 37** Pozorování vláken TP pod mikroskopem

Z vytěženého a vysušeného PCK na ČOV Brno – Modřice během první části experimentu bylo odebráno cca 1 kg PCK ve sušeném stavu. Kal byl poté naředěný vodou a manuálně rozdrobený a promíchaný v plastové vaně. Byla sestavena instalace pro manuální prosévání kalu, nejprve přes síto 2 mm za účelem separace větších částic odpadu z jídla a poté i separace vláken TP větších než 0,4 mm, které zůstaly v přecezené vodě.

Poté se směs vody a PCK z první etapy nabírala a prosévala přes síto 2 mm za stálého ostříkování čistou vodou z hadice a manuálního protlačování a míchání plastovou lopatkou, dokud na síť nezůstaly jen větší frakce. Potom se přecezená voda nalévala přes mikro síto 0,4 mm, ze kterého se nashromážděný PCK skladoval v nádobě a gravitačně procedil. Postup manuálního dvoustupňového prosévání PCK je znázorněn na Obr. 38.



**Obr. 38** Postup manuálního dvoustupňového prosévání PCK

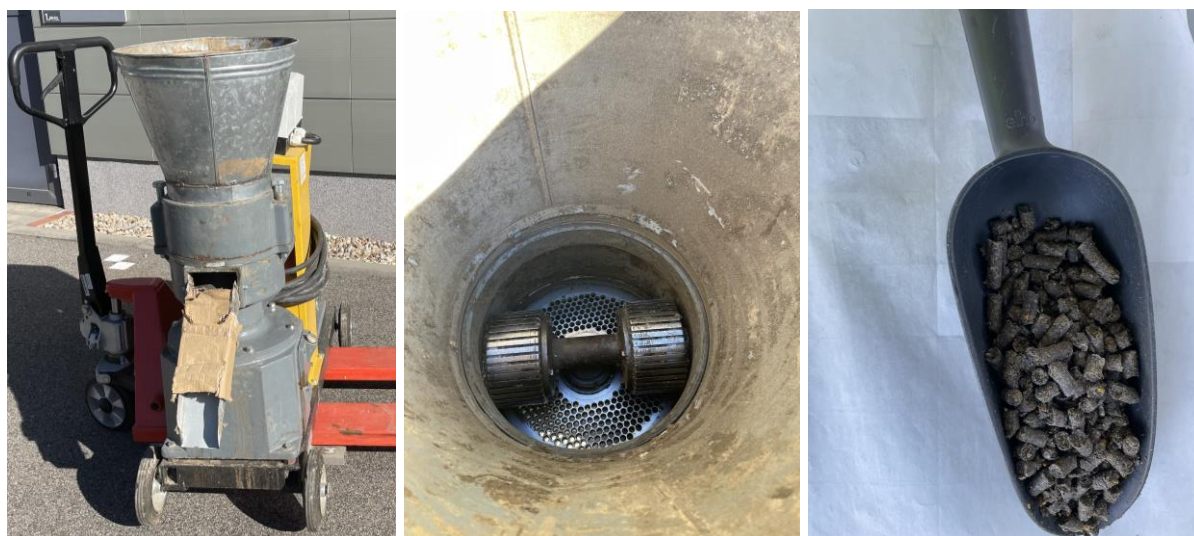
Z dvoustupňově vytěženého PCK byl odebrán vzorek-6 a v laboratoři byl podroben rozborům zaměřeným na následující parametry: vlhkost, TK a spalné teplo.

V rámci přípravy vzorku-6 pro kalorimetrické testy byly nachystány malé náhodné dávky jemného prachu ve velikosti od 0,4 do 0,8 g, zpracované rozemletím prostřednictvím třecích mís. Při kalorimetrické zkoušce byly vzorky podrobeny standardním podmínkám a konstantnímu objemu, za přístupu kyslíku, a to přímo v kalorimetrické bombě (*Katalog klíčového přístrojového vybavení*, 2023). Po zapálení vzorku pomocí zapalovacího obvodu byla kalorická hodnota stanovena měřením změny teploty v kalorimetrické nádobě během spalovacích testů. Analýzy byly provedeny třikrát s maximální povolenou odchylkou 1 %.

## 4.6 PRŮBĚH PELETIZACE CELULÓZY

### Etapa III experimentu – peletizace a pyrolýza PCK

Etapa III výzkumu byla prováděna ve výzkumném centru AdMaS. V první části etapy III ze usušeného PCK byly v AdMaS vyrobeny CP průměru 6 mm pomocí briketovacího lisu na výrobu pelet (typové označení stroje JGE 230), který je primárně určen pro lisování rozdrčeného organického materiálu nebo krmných směsí. Takto vyrobené CP byly použity jako náplň pro aplikaci technologie STP na laboratorní jednotce provozované v AdMaS. Na Obr. 39 je znázorněn peletizovací lis, který se používal pro výrobu CP.



**Obr. 39** Peletizovací lis (vlevo a uprostřed) a vyrobené CP (vpravo)

Stroje typu peletizátoru JGE 230 protlačují zpracovávanou surovinu za pomoci rotujících válců (2 ks) přes děrovanou matici. V matici se materiál stlačí na požadovanou velikost. Poté vychází pelety výstupním otvorem umístěným ve spodním otvoru stroje.

## 4.7 PYROLÝZA PELETIZOVANÉHO MATERIÁLU

V rámci třetí etapy experimentální části byla na pyrolytické jednotce AdMaS provedena STP vzorku CP.

Protokol z průběhu zpracování vzorku CP technologií STP a popis vstupního a výstupního vzorku je uveden v Tab. 19.

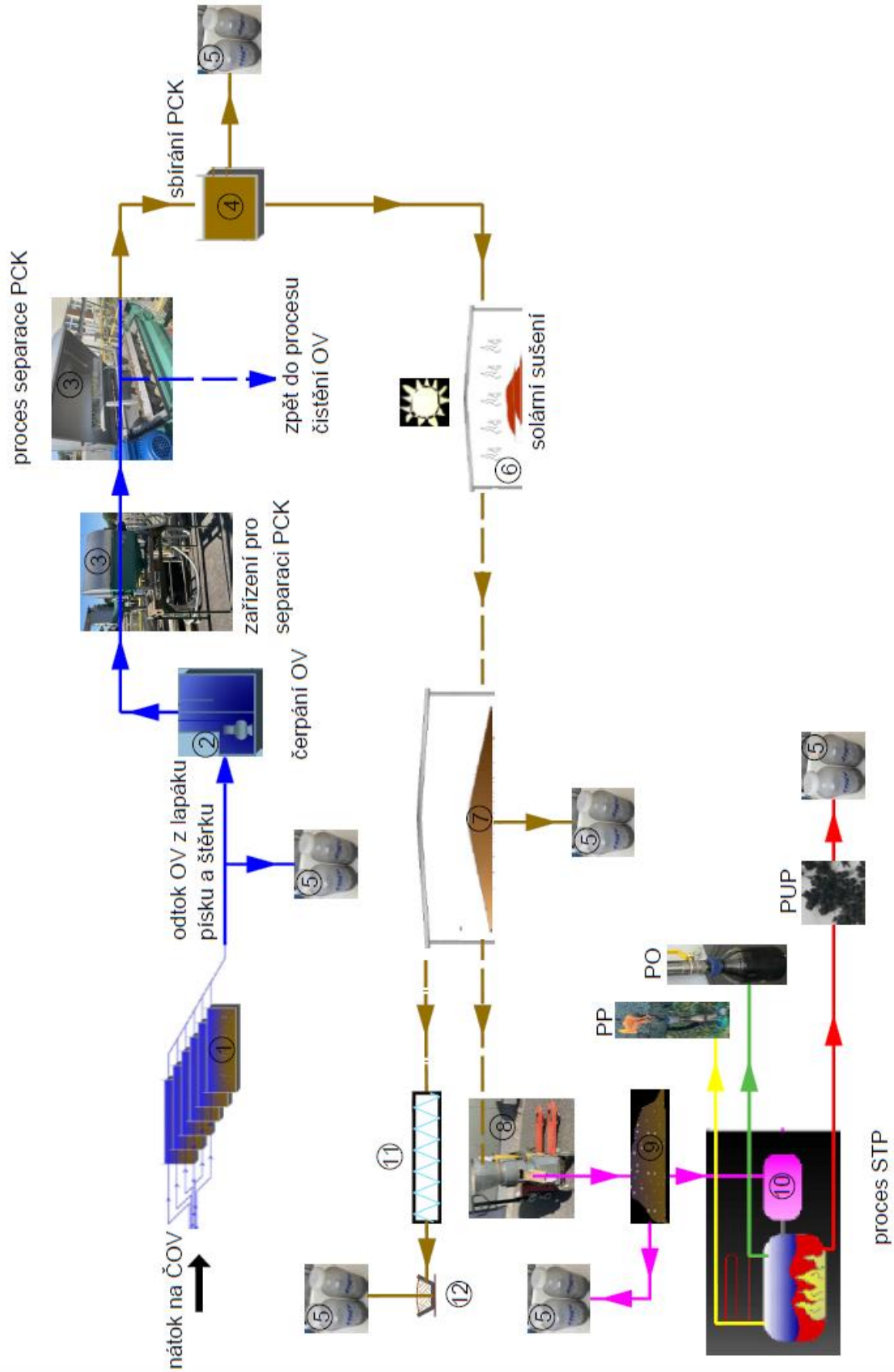
**Tab. 19** Výstupní údaje z procesu pyrolýze CP

Popis vstupního vzorku:	Sušený PCK (vlákna TP z OV za mechanickým předčištěním); ČOV Brno – Modřice; peletováno, sušina 84,65 %
Označení vstupního vzorku	PCK – sušený; CP
Označení PUP	PCK – PUP
Označení oleje	PCK – PO
Vstup/výstup PUP (g)	2 000/590
PO (g)	890
PP (g)	520
Stav plynoměru před pokusem (dm <sup>3</sup> )	100 proplach argonem

#### 4.8 POUŽITÉ ANALYTICKÉ METODY

V této kapitole jsou popsány technologické parametry zařízení, které jsou používány pro separaci a materiálovou transformaci PCK. Technologický proces se skládá z modulů zařízení stíraného válcového síta, čerpadla pro OV, laboratorního zařízení, zařízení pro výrobu pelet a jednotky STP. Na schématu na Obr. 40 je znázorněn technologický postup celého procesu materiálové transformace PCK a jeho komponentů.

Tehnologický proces byl rozdělen do následujících kroků. OV z přítoku na ČOV BRNO – MODŘICE byla předčištěna hrubými česly spolu s lapákem šterku a písku (1). Následně byla tato předčištěná OV shromažďována v nádrži, kde bylo instalováno čerpadlo pro čerpání OV s vlákny TP (2) do zařízení pro separaci PCK (3). Po průchodu OV zařízením stíraného válcového síta (3) byl separovaný a odvodněný PCK shromažďován v nádobě určené pro tento účel (4). Poté probíhalo solární sušení PCK na skládce odvodněného PCK (6). Usušený PCK skončil na skládce suchého PCK (7), který byl následně využíván pro výrobu CP (8). Skladované CP (9) byly aplikovány jako plnivo do procesu STP (10), kde byly získány výstupní produkty PP, PO a PUP. Z usušeného PCK byly odebírány vzorky pro dvoustupňové prosévání (11), což vedlo k získání dvoustupňově prosévaného PCK (12). V průběhu celého procesu byly systematicky odebírány vzorky pro laboratorní testování ve všech krocích technologického procesu (5).

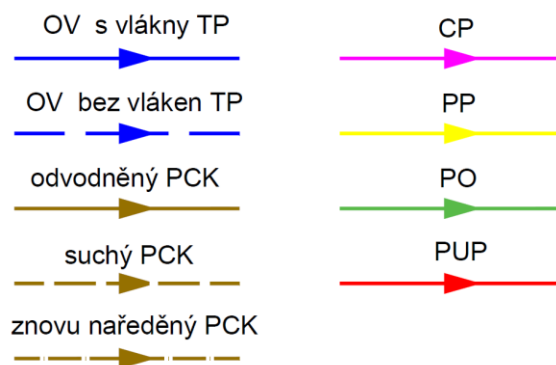


Obr. 40 Technologické schéma separace PCK na ČOV Brno – Modřice

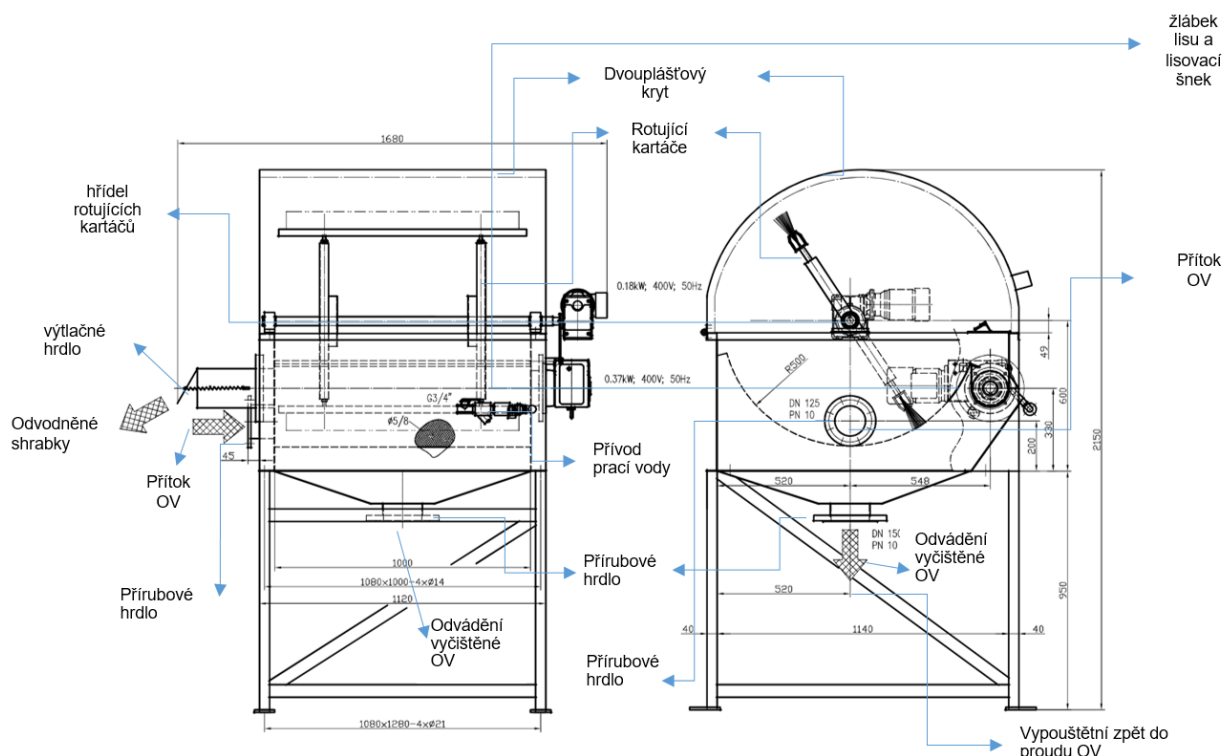


## LEGENDA:

1. Lapák štěrku a písku
2. Čerpadlo na OV
3. Stírané válcové síto
4. Nádoba pro sběr PCK
5. Laboratoř
6. Skládka odvodněného PCK
7. Skládka suchého PCK
8. Peletizátor
9. Skládka pelet
10. Jednotka STP
11. Laboratorní dvoustupňové prosévání PCK
12. Dvoustupňově prosětý PCK

Stírané válcové síto

Stírané válcové síto typu SVS LS od výrobce Fontana R, s.r.o. je určeno pro malé ČOV, kde jeho kapacita odpovídá prezentovaným výzkumným podmínkám s čerpadlem o průtoku  $2 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ . Na Obr. 41 je znázorněn technický výkres tohoto zařízení s technologickým procesem separace PCK. Toto zařízení je vyrobeno z nerezové oceli. Ložiska hřídele rotujících kartáčů jsou plastová, zatímco štětiny kartáčů jsou vyrobeny z polyamidu. Pohon rotujících kartáčů a lisovacího šneku je zhotoven pomocí samostatných elektropřevodovek. Zařízení dokáže oddělovat pevné látky za pomoci filtrační sítě a rotačních kartáčů, které vyhrnují oddělený kal do sběrné nádrže. Zařízení SVS LS je vhodné pro použití jak v exteriéru, tak v interiéru. Jeho automatický intervalový provoz je nastaven v souladu s přítokem OV. Součástí systému SVS LS je sběrač vyčištěné OV s odváděcím otvorem. V žlábků lisu se pohybuje lisovací šnek, který odstraňuje zbytky a zároveň posouvá vodu směrem k vytlačovému otvoru. Vytlačovaná voda spolu s pevnými částicemi je odváděna skrze perforované dno žlábků do prostoru vyčištěné vody. Prostor pod lisem je nutné pravidelně čistit pomocí proplachovací vody, která je intervalově přiváděna pod lis prostřednictvím solenoidového ventilu. Kryt síta je vybaven odklápěcím mechanismem, který zabraňuje rozstříku přicházející OV. Pro venkovní umístění je zařízení SVS LS vybaveno dvojitým krytem s integrovaným topným systémem. Součástí vyhřívané varianty je termostat, který umožňuje aktivaci topného systému při teplotách pod bodem mrazu. Zapínání, přívod pracovní vody a řízení provozní doby a ohřevu zajišťuje elektrické příslušenství pro měření a regulaci. Filtračním prvkem je štěrbinové síto s otvory o velikosti 0,3 mm. Poloměr stíraného síta je 0,50 m, délka 1, a průměr šnekového lisu 0,14 m ("Stírané válcové síto - SVS, SVSLS", 2023).



**Obr. 41** Pracovní postup separace PCK a technické parametry příslušného zařízení *Stíraného válcového síta-SVSLS, Fontana R, s. R.o.* ("Stírané válcové síto - SVS, SVSLS", 2023)

Stírané válcové síto SVS LS s integrovaným lisem kontinuálně odděluje NL z OV. Filtrace OV probíhá prostřednictvím šterbinového síta, na kterém jsou zachyceny pevné látky. Voda je přiváděna do žlabu přes přírubové hrdlo a následně gravitačně protéká sítím. Rotující kartáče vyhrnují zachycené pevné látky přes boční hranu síta do žlábků lisu. Vyčištěná voda je poté odváděna zpět do toku OV přes ČOV Brno – Modřice ("Stírané válcové síto - SVS, SVSLS", 2023).

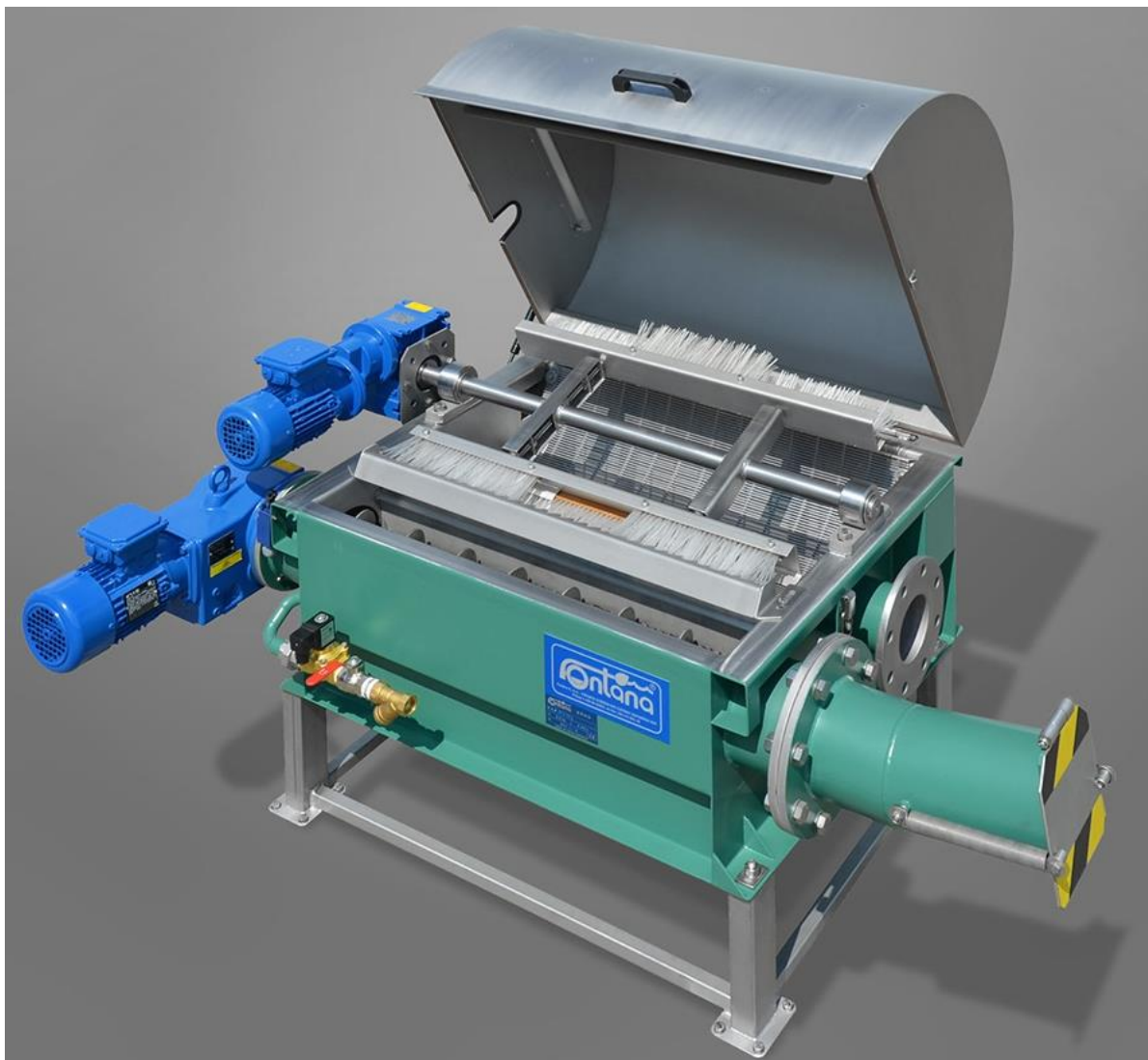
Parametry provozního zařízení stíraného válcového síta-SVS LS výrobce Fontana R, s.r.o. jsou uvedeny v Tab. 20.

**Tab. 20** Základní technické údaje zařízení stíraného válcového síta-SVS LS, ("Stírané válcové síto - SVS, SVSLS", 2023)

#### Základní technické údaje stíraného válcového síta-SVSLS

Průtočné množství: Q	0 ÷ 20 L·s <sup>-1</sup>
Velikost otvoru síta:	1, 3, 5, 8 mm nebo dle přání zákazníka
Příkon pohonu kartáče:	0,18 kW, 400 V/50 Hz
Příkon pohonu šneku lisu:	0,37 kW, 400 V/50 Hz
Pracovní prostředí:	a) vnitřní b) venkovní pro teplotu -20 ÷ 50 °C s topným systémem o příkonu 0,42 ÷ 0,7 kW; 230V/50 Hz
Redukce objemu shrabků:	~50 %

Stírané válcové síto-SVSL, válcové zařízení s mikro sítím 0,3 mm, výrobce Fontana R, s.r.o. je znázorněno na Obr. 42.



**Obr. 42** Stírané válcové síto-SVSL, zařízení s mikro sítím 0,3mm, Fontana R, s. R.o. ("Stírané válcové síto - SVS, SVSL", 2023)

#### Čerpadlo na odpadní vodu

Pro čerpání nátoku OV je používáno čerpadlo splaškové OV s částicemi o velikosti až 15 mm a s delšími vlákny. Hydraulické charakteristiky čerpadla jsou:  $Q = 2,5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $H = 7,5 \text{ m}$  (Pumpa a.s., 2023).

#### Laboratorní zařízení pro určení spalného tepla

Stanovení spalného tepla (kalorické hodnoty) bylo provedeno v souladu s EN ISO 1716

(ČSN 2018) pomocí zařízení pro zkoušení reakce látek na oheň. Spalné teplo bylo měřeno v laboratorních podmínkách pomocí poloautomatického zařízení IKA C 200 (IKA-Werke GmbH & Co., Německo). Zkušební zařízení je složeno z kalorimetrické bomby v kalorimetrické nádobě, míchadla, zařízení pro měření teploty a kelímku z kovu. Výsledkem zkoušky je spalné teplo zkoušeného vzorku

kelímkovou anebo „cigaretovou metodou“ (*Katalog klíčového přístrojového vybavení*, 2023).

#### Jednotka středně teplotní pyrolýzy

Během výzkumu byly testovány pelety PCK na malé laboratorní jednotce STP, která je provozována na AdMaS (Obr. 43).



**Obr. 43** Instalace a provoz STP jednotky s maximální kapacitou 3 kg-pokus<sup>-1</sup> v AdMaS

Tato STP jednotka, která je vybavena nerezovým válcovým reaktorem o objemu cca 10 L, pracuje s procesní teplotou v rozmezí 0–600 °C. Do reaktoru pyrolýzy je možné vložit až 3 kg vstupního organického materiálu/odpadu za jeden pokus, který je ohříván konvenčním způsobem přes drátový termočlánek napojený na zdroj elektrické energie. Pro zajištění inertního prostředí před a po průběhu pokusu byla celá pyrolýzní jednotka připojena na tlakovou nádobu s inertním plynem a celý systém byl před pokusem propláchnutý. Provozní parametry funkčního vzorku pilotní jednotky STP na AdMaS jsou uvedeny v Tab. 21.

**Tab. 21** Provozní parametry jednotky STP v centru AdMaS

Provozní parametr	Jednotka
Objem reaktoru	10 dm <sup>3</sup>
Typ ohřevu	Elektrický- odporový
Maximální příkon ohřevu	5 kW
Maximální pracovní teplota reaktoru	650 °C
Maximální pracovní tlak	1 kPa
Elektrická soustava	TNS
Napětí	3 x 400 V
Pracovní teplota okolí	5 ÷ 40 °C

## 5 VÝSLEDKY VÝZKUMU

V rámci této kapitoly jsou prezentovány výsledky výzkumu, které byly získány v průběhu experimentální fáze disertační práce.

V rámci výzkumu byla provedena charakterizace PCK se záměrem ověřit potenciál energetického využití. První část výsledků představují laboratorní analýzy PCK zaměřené na následující parametry: pH, sušina, ztráta žiháním, TK, obsah N, P a TOC. Druhá část výsledků vyhodnotila kvantitativní parametry zpracování PCK metodou STP: množství výtěžku PUP, PO a PP z vyrobených CP.

### 5.1 JEDNOSTUPŇOVÁ EXTRAKCE CELULÓZY Z ODPADNÍ VODY NA ČOV BRNO – MODŘICE

V Tab. 22 jsou uvedeny výsledky laboratorních analýz provedených na čtyřech odebraných vzorcích PCK, které prošly jednostupňovou separací a byly odebrány z čerstvě vytěženého PCK.

**Tab. 22** Laboratorní rozbor separovaného PCK

Ukazatel	Metoda	Jednotka	Výsledek	Nejistota
Vzorek-1: PCK			Provedení odběru: 20. 07. 2022	
VL <sub>1</sub>	SOP/M-07A	%	12,6	10 %
pH	SOP/M-01	.	7,18	3 %
Vzorek-2: PCK			Provedení odběru: 21. 07. 2022	
VL <sub>2</sub>	SOP/M-07A	%	9,0	10 %
VLZZ	SOP/M-07A	.	94,5	10 %
pH	SOP/M-01	%	7,42	3 %
Vzorek-3: PCK			Provedení odběru: 27. 07. 2022	
Arsen	SOP 5.14.1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	6,3	20 %
Celkový P	SOP 5.14.1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	3 670	20 %
Kadmium	SOP 5.14.1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	<0,50	-
Chrom	SOP 5.14.1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	26,1	20 %
Olovo	SOP 5.14.1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	16,1	20 %
Nikl	SOP 5.14.1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	10,5	20 %
Rtuť	SOP 5.9.2	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	0,616	20 %
Zinek	SOP 5.14.1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	350	20 %
TOC	SOP 21.10.1 (2)	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	487 300	15 %
N v bezvodném vzorku	SOP 21.6.1 (2)	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	24 100	10 %
VL <sub>3</sub>	SOP 4.5.3	%	19,1	10 %
Vzorek-4: PCK			Provedení odběru: 27. 07. 2022	

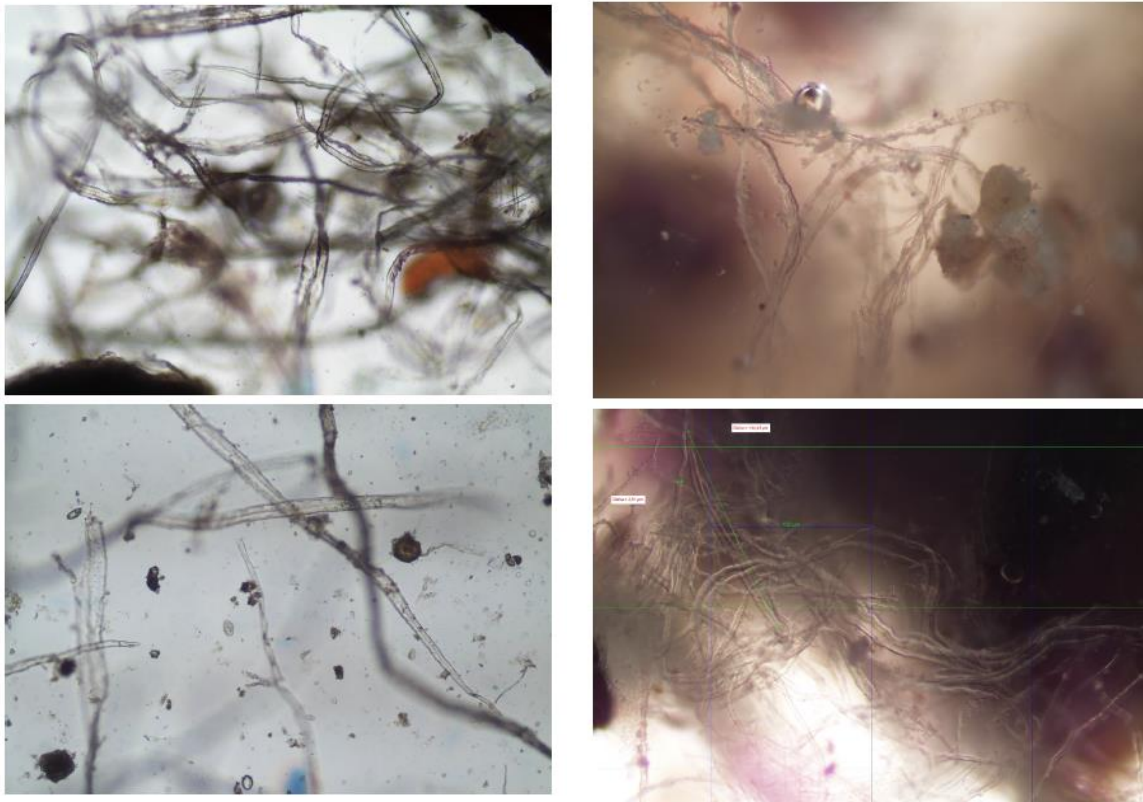
VL <sub>4</sub>	SOP/M-07A	%	14,6	10 %
VLZZ	SOP/M-07A	.	89,9	10 %

Poznámky: VL – sušina při 105 °C, VLZZ – ztráta žíháním při 550 °C

Střední hodnota sušiny během experimentu je určena Rov. 6:

$$\overline{VL} = \frac{VL_1 + VL_2 + VL_3 + VL_4}{4} = \frac{12,6 + 9,0 + 19,1 + 14,6}{4} = 13,8 \quad \text{Rov. 6}$$

Černobílé a barevné fotografie vláken TP, které pocházejí z usušeného PCK vzorku-3 (Obr. 44), jsou pořízené mikroskopem se zvětšením 200x (Obr. 45).



**Obr. 44** Černobílé a barevné fotky vláken TP z mikroskopu



**Obr. 45** Černobílé a barevné fotografie vláken při zvětšení x200 se změřenou délkou vláken 0,243 mm a tloušťkou 0,0045 mm

Lze konstatovat, že byla změřena délka vlákna 0,243 mm a tloušťka vlákna 0,0045 mm.

## 5.2 DVOUSTUPŇOVÁ SEPARACE A PELETIZACE CELULÓZOVÝCH VLÁKEN

V Tab. 23 jsou uvedeny výsledky laboratorních analýz vysušeného PCK z jednostupňové separace přes stírané válcové síto na ČOV Brno – Modřice a pro vzorek čerstvě vytěženého PCK, který je získán dvoustupňovou manuální separací na výzkumném centru AdMaS, tedy z 1 kg naředěného usušeného PCK z jednostupňové separace.

**Tab. 23** Laboratorní rozbory dvoustupňově prosévaného PCK

Parametr	Metoda	Jednotka	Výsledek	Nejistota
Vzorek-5: sušený PCK			Provedení odběru: 26. 07. 2022	
VL	SOP/M-07A	%	92,5	10 %
VLZZ	SOP/M-07A	%	94,2	10 %
Vzorek-6: PCK			Provedení odběru: 16. 09. 2022	
Kadmium	S-METAXHB1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	<0,40	-
Arsen	S-METAXHB1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	0,68	20 %
Měď	S-METAXHB1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	102	20 %
Rtuť	S-METAXHB1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	0,50	20 %
Nikl	S-METAXHB1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	15,2	20 %
Olovo	S-METAXHB1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	15,6	20 %
Vanad	S-METAXHB1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	6,51	20 %
Zinek	S-METAXHB1	mg·kg <sup>-1</sup> suš.	503	20 %
VL	S-DRY-GRCI	%	21,7	6,1 %
zbytek po žihání při 550 °C	S-LI550GR	% suš.	16,8	5 %
VLZZ	S-LI550GR	% suš.	83,2	5 %

Poznámky: VL – sušina při 105 °C, VLZZ – ztráta žiháním při 550 °C

Výsledky vyhodnocení spalného tepla pro vzorek-6 jsou uvedeny v Tab. 24

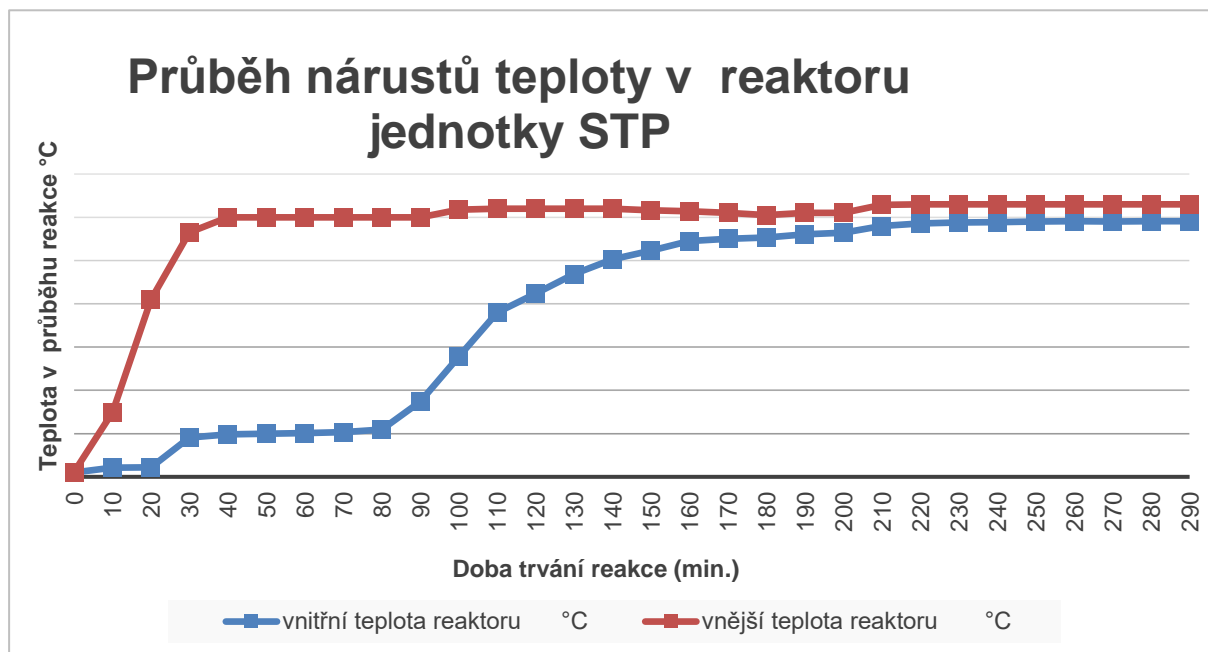
**Tab. 24** Hodnoty spalného tepla

Číslo pokusu	Metoda	Jednotka	Výsledek	Odchylka od střední hodnoty
Vzorek-6:			Provedení odběru: 16. 09. 2022	
1	Dle ČSN 2018	J·g <sup>-1</sup>	20 934	0,51 %
2	Dle ČSN 2018	J·g <sup>-1</sup>	21 138	0,45 %
3	Dle ČSN 2018	J·g <sup>-1</sup>	21 058	10,00 %

Za směrodatnou se považuje střední hodnota, tedy 21 043 MJ·kg<sup>-1</sup>.

### 5.3 MATERIÁLOVÁ TRANSFORMACE CELULÓZY POMOCÍ PYROLÝZY

Graf. 5. znázorňuje průběh reakce STP vzorku CP a průběh vnitřních a vnějších teplot v reaktoru jednotky STP. Postupné zvyšování teploty reaktoru STP způsobilo začátek pyrolytické reakce, která probíhala do okamžiku, kdy se vnitřní teplota reaktoru srovnala s vnější teplotou reaktoru.



**Graf. 5** Průběh reakce STP vzorku CP

Průběh procesu STP vzorku CP je uveden v Tab. 25.

**Tab. 25** Průběh procesu STP vzorku CP

Čas	Doba trvání (min.)	Vnitřní teplota (°C)	Vnější teplota (°C)	Na výstupu (°C)	Poznámka
12:20:00	0	10	11		
12:30:00	10	21	149	6,9	spuštění vývěvy
12:40:00	20	22	410	8,6	spuštění čerpadla
12:50:00	30	91	565	11,1	zapálení fléry
13:00:00	40	98	600	12,3	
13:10:00	50	100	600	13,5	
13:20:00	60	101	600	15,1	
13:30:00	70	103	600	16,1	
13:40:00	80	109	600	17,2	
13:50:00	90	174	600	19,7	
14:00:00	100	277	618	19,5	nastavený limit max. Teploty na 620 °C
14:10:00	110	380	620	20,3	



14:20:00	120	424	620	20,9	
14:30:00	130	469	620	21,9	
14:40:00	140	503	620	22,5	nastavený limit max. Teploty na 620 °C
14:50:00	150	523	616	24,0	
15:00:00	160	545	614	25,5	nastavený limit max. Teploty na 610 °C
15:10:00	170	550	610	26,4	nastavený limit max. Teploty na 605 °C
15:20:00	180	553	605	27,1	nastavený limit max. Teploty na 610 °C
15:30:00	190	561	610	27,8	
15:40:00	200	564	610	28,4	
15:50:00	210	580	629	29,4	nastavený limit max. Teploty na 630 °C
16:00:00	220	586	630	28,5	
16:10:00	230	588	630	28,7	zhasnutí, zapálení
16:20:00	240	589	630	29,1	zhasnutí, zapálení
16:30:00	250	590	630	29,3	
16:40:00	260	591	630	30,2	jen blafne
16:50:00	270	590	630	30,1	jen blafne
17:00:00	280	591	630	30,2	
17:10:00	290	591	630	30,5	nelze už vůbec zapálit, ODSTAVENÍ topení

Na Obr. 46 jsou znázorněné CP před pyrolýzou a jejich materiálová transformace procesem STP na PUP.



**Obr. 46** CP před STP (vlevo) a pevný PUP po pyrolýze (vpravo)

Vstupní vzorek do procesu pyrolýzy byl vysušený PCK z vláken TP z OV, který byl získán separací za mechanickým předčištěním na ČOV Brno – Modřice. V Tab. 26 jsou uvedeny charakteristiky vstupního vzorku CP a výstupního vzorku PUP.

**Tab. 26** Charakteristiky pevného vzorku PCK před a po pyrolýze

Popis vstupního vzorku	Jednotka	TC	TOC	IC	Sušina	
CK – pelety	%	42,80		42,61	0,19	84,65
CK – PUP	%	57,52		56,91	0,61	96,11

Poznámky: TC – celkový obsah C, IC – obsah anorganického C

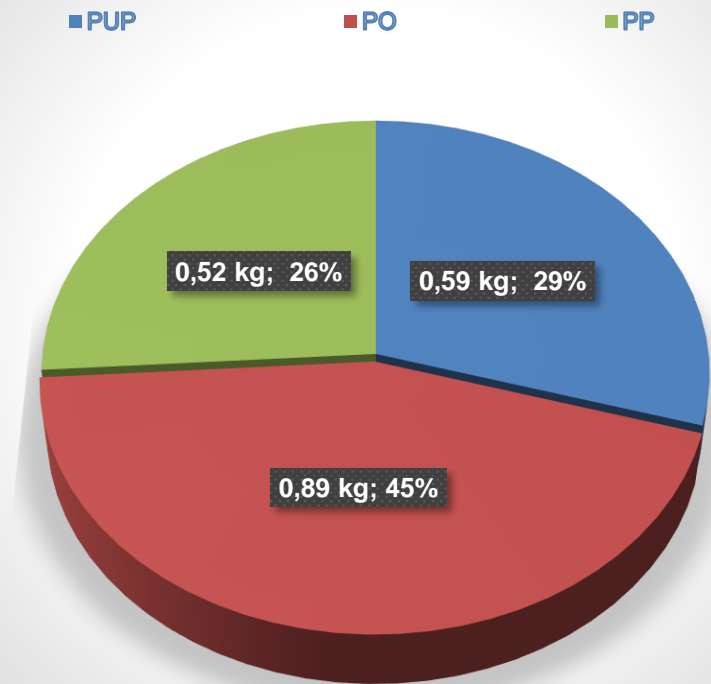
Během procesu STP výstupní výpary z reaktoru odcházejí výstupním potrubím do chladiče, kde kondenzují a jsou zachyceny ve formě PO, který byl sbírán do nádoby pod jednotkou (Obr. 47 – vlevo). Výpary, které nebyly zkondenzovány, byly vedeny do laboratorního spalovacího zařízení (fléry), kde se spaloval PP (Obr. 47 – vpravo).



**Obr. 47** Materiálová transformace CP procesem pyrolýzy na PO (vlevo) a PP (vpravo)

Pro výrobu pelet byla použita matrice o průměru 6 mm a hmotnost vstupního vzorku usušeného PCK po peletizaci byla 2 kg. Z tohoto vstupního množství byly po procesu STP získány tři produkty: PUP (0,59 kg), PO (0,89 kg) a PP (0,52 kg). Hmotnostní a procentuální podíl těchto produktů je graficky znázorněn v Graf. 6, který zobrazuje výstupy materiálové transformace.

**Podíl výstupních produktů STP a jejich hmotnostní a procentuální zastoupení při 2 kg vstupního materiálu:**



**Graf. 6** Znárodnění materiálového podílů výstupních produktů STP: PUP, PO a PP

## 6 DISKUZE A VYHODNOCENÍ

V této kapitole jsou diskutovány a vyhodnoceny výsledky měření a testování provedených v rámci experimentální části disertační práce.

V rámci výzkumu separace a materiálové transformace PCK ve své disertační práci jsem se zaměřila na vyhodnocení čtyř aspektů: i) opětovné využití celulózových vláken, ii) energetické využití celulózových vláken, iii) definování potenciálu dopadu separace celulózy na biologický stupeň čištění odpadních vod a iv) definování potenciálu dopadu separace celulózy na velikost kalového hospodářství ČOV.

### 6.1 OPĚTOVNÉ VYUŽITÍ CELULÓZOVÝCH VLÁKEN

Hmotnost vstupního vzorku pro peletizaci byla 2 kg. Z této vstupní hmotnosti byly v rámci procesu STP získány tři produkty: PUP o hmotnosti 0,59 kg, PO o hmotnosti 0,89 kg a PP (teoreticky dopočítaný) o hmotnosti 0,52 kg. Procentuální zastoupení těchto produktů je následující: PUP 29 %, PO 45 % a PP 26 % (teoreticky dopočítané). Z uvedených údajů je patrné, že nejvíce zastoupeným produktem v materiálové transformaci je PO, následuje PUP a na posledním místě je PP.

Obsah sušiny 84,65 % ve vstupním vzorku CP se ukázal jako optimální pro proces peletizace. Z výsledků vyplývá, že 99,56 % C v PCK je organického původu a v obsahu PUP činí organický C 98,94 %. K nepatrnému relativnímu zvýšení podílu anorganického C v PUP dochází pravděpodobně z důvodu tepelného štěpení uhlovodíků. V CP bylo zjištěno, že obsah TOC dosahuje hodnoty 42,61 %, zatímco v PUP je to 56,91 %.

Vzhledem ke skutečnosti, že procesní teplota pyrolýzy nemá významný vliv na obsah TK v PUP (Racek et al., 2020), může se obsah TK v PUP jako výstupního produktu z technologie pyrolýzy PCK orientačně stanovit i na základě obsahu TK v PCK. Ten je opět ovlivněn přítomností TK v OV (Racek et al., 2020) a je to veličina, která se mění v čase a závisí na mnoha faktorech. Jak je vidět z laboratorních rozborů, kromě veličiny arsenu, obsah TK se pro vzorek-3 a vzorek-6 významně neliší.

Obsah TK v PUP z pyrolýzy PCK je důležitý z hlediska jeho znovupoužití v zemědělství a lze ho určit na základě obsahu TK v PCK, který je ovlivněn přítomností TK v nátoků OV na ČOV. Cílem experimentů pyrolýzního zpracování vzorků by měla být certifikace PUP podle předpisů IBI (International Biochar Initiative) nebo EBC (The European Biochar Certificate) (Racek et al., 2020). Tyto předpisy pro certifikaci biocharu stanoví limity vybraných parametrů určujících certifikaci PUP (biocharu) a jedním z nich jsou, mimo řadu jiných, také parametry TK (Racek et al., 2020).

V Tab. 27 jsou ukázány potenciální hodnoty objemu výroby produktů materiálové transformace celulózy v závislosti na počtu obyvatel. Výpočet

je odvozen z údajů s uvažovanou produkcí  $2,5 \text{ kg} \cdot \text{obyv}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  CP a procentuálním podílem produktů materiálové transformace celulózy: PUP (29 %), PO (45 %) a PP (26 %).

**Tab. 27** Roční objem produkce materiálové transformace celulózy v závislosti na počtu obyvatel

Počet obyvatel	Produkce (t·rok <sup>-1</sup> )			
	CP	PUP	PO	PP
10 000	25	7,25	11,25	6,50
50 000	125	36,25	56,25	32,50
100 000	250	72,50	112,50	65,00
379 376 *	948	274,92	426,60	246,48

\* ČOV Brno – Modřice: počet obyvatel registrovaných k trvalému pobytu města Brna v roce 2022 (Český statistický úřad, 2022).

Vzhledem k tomu, že získaný PUP prostřednictvím STP činí cca 53 % z celkového usušeného ČK na ČOV, jak uvádí (Hlavínek et al., 2021) (Hlavínek et al., 2022), výroba PUP z PCK by tvořila cca 10,0 % celkové produkce PUP z ČK, při zohlednění celkové roční produkce usušeného ČK na ČOV Brno – Modřice, která činí  $5\,238\,000 \text{ kg} \cdot \text{rok}^{-1}$  (sušina 93,7 %) ("VÝROČNÍ ZPRÁVA", 2020).

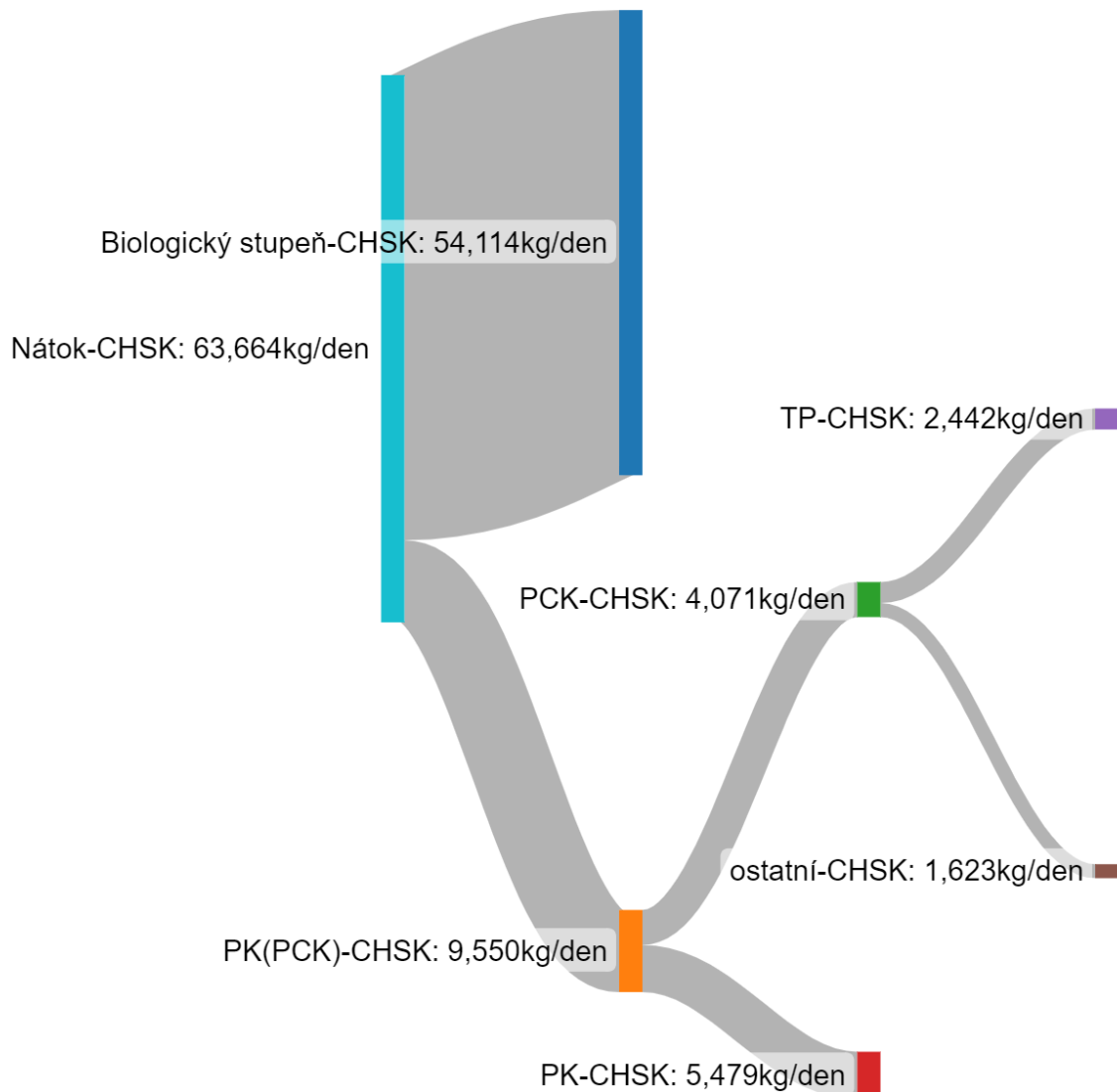
## 6.2 ENERGETICKÉ VYUŽITÍ CELULÓZOVÝCH VLÁKEN

Při zohlednění teoretického zisku separace PCK ve výši  $0,026 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  pro instalované poloprovozní zařízení a podmínky nátoku na ČOV z Tab. 18 byla stanovena koncentrace CHSK z PCK v PK po dobu trvání experimentu přibližně 42,6 %. Tento výpočet předpokládal, že CHSK v PK představuje přibližně 15 % celkového zatížení CHSK z nátoku na ČOV, a že teoretická hodnota CHSK 1 g TP je 1,15 g CHSK (Chen et al., 2017). Výsledkem je, že CHSK z TP tvoří přibližně 3,8 % z celkového množství CHSK na ČOV, protože 60 % CHSK z PCK pochází pouze z TP (Ghasimi, 2016). Podíl CHSK z PCK v celkovém nátoku CHSK na ČOV Brno – Modřice je cca 6,4 %. Tato hodnota je nižší ve srovnání s rozsahem 25-30 % uváděným v literatuře (Ruiken et al., 2013), což naznačuje, že jemné prosévání bylo prováděno za testovacích podmínek spíše než za skutečných reálných podmínek. Rozložení hmotnostního toku CHSK na ČOV Brno – Modřice během experimentu je graficky znázorněno v Graf. 7.

Průměrná výhřevnost získaná prostřednictvím trojitých analýz spalného tepla dvoustupňově prosévaného PCK činí  $21,04 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Je možné pozorovat rozdíl 27,5 % oproti teoretické hodnotě výhřevnosti  $16,50 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  u čisté celulózy bez příměsí (Daegi et al., 2017). Tuto odchylku lze vysvětlit skutečností, že PCK obsahuje 60–80 % celulózy, 5–10 % hemicelulózy, 5–10 % ligninu, 5–10 % oleje a zbytek tvoří anorganické soli (5–10 %) (Ghasimi, 2016). Složky hemicelulózy, ligninu a oleje v PCK mají vliv na vyšší výhřevnost PCK ve srovnání s výhřevností čisté celulózy.

Roční produkce bioplynu z AD ve výši  $4\,876\,234 \text{ m}^3$  představuje  $6\,738 \text{ MWh} \cdot \text{rok}^{-1}$  elektrické energie a  $57\,333 \text{ GJ} \cdot \text{rok}^{-1}$  tepelné energie na ČOV Brno – Modřice. ("VÝROČNÍ ZPRÁVA", 2020). Při roční produkci suchého PCK ve výši

963 235 kg·rok<sup>-1</sup> a průměrném denním nátoku OV 101 501 m<sup>3</sup>·den<sup>-1</sup> na ČOV Brno – Modřice ("VÝROČNÍ ZPRÁVA", 2020) se očekává, že roční energetická hodnota z PCK dosáhne 20 266 485 MJ·rok<sup>-1</sup>. Z tohoto množství pochází 12 159 891 MJ·rok<sup>-1</sup> výhradně z celulózy z PCK. Výchřevnost celulózy z PCK tedy představuje potenciál cca 21,2 % roční produkce tepla z bioplynu.



**Graf. 7** Rozdělení hmotnostního toku CHSK na ČOV Brno – Modřice, vypracováno na základě naměřených dat v rámci vlastního výzkumu

Na Graf. 7 je vidět rozdělení hmotnostního toku CHSK na ČOV Brno – Modřice zpracované na základě naměřených dat v rámci výzkumu, které tvoří podklad pro výpočty spojené s průtokem CHSK.

Z vytěženého PCK je možné vygenerovat maximálně 0,34 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>·kg<sup>-1</sup> CHSK, jak uvádí odborná literatura (Crutchik et al., 2018). Jestli roční produkce CHSK z celulózy z PCK dosahuje hodnoty 592 395 kg·rok<sup>-1</sup>, pak by roční produkce CH<sub>4</sub> z celulózy z PCK byla cca 201 414 m<sup>3</sup>·rok<sup>-1</sup> CH<sub>4</sub>. Roční produkce CH<sub>4</sub> na ČOV Brno – Modřice činí 3 900 987 m<sup>3</sup>·rok<sup>-1</sup>, což představuje 80 % celkové roční produkce

bioplynu. Závěrem je, že hypotetická produkce CH<sub>4</sub> z PCK může dosáhnout cca 5 % celkové produkce CH<sub>4</sub> na ČOV Brno – Modřice. Tento výsledek naznačuje, že získávání PCK by nemělo významný dopad na řízení výroby bioplynu na ČOV Brno – Modřice.

### 6.3 DEFINOVÁNÍ POTENCIÁLU DOPADU SEPARACE CELULÓZY NA BIOLOGICKÝ STUPEŇ ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD

V rámci této disertační práce jsem analyzovala vliv odstraňování celulózy z PCK v primárním stupni čištění OV na chování dalších základních parametrů v OV během biodegradace v sekundárním stupni čištění.

V rámci vlastního výzkumu jsem změřila délku vláken TP 0,243 mm a tloušťku vláken 0,0045 mm ve vytěženém PCK. Avšak tato vlákna TP sítím 0,3 mm neprošla. Tento fakt lze vysvětlit i tím, že se kratší vlákna papíru mohou splést dohromady a zůstat tak na sítu, nebo mohou být poškozena následujícími kroky separace, a proto bývají v PCK kratší než ve vstupní OV. Délka celulóзовých vláken v TP se pohybuje v rozmezí 1-1,2 mm a zůstává stejná i během přepravy v kanalizační síti, o čem svědčí i skutečnost, že délka vláken v kalu z OV je podobná délce vláken v různých typech TP zakoupených přímo v obchodě (Ruiken et al., 2013). Při nízké hydraulické zátěži bývá převážná část vláken TP zadržena na sítu o velikosti průlin 0,30 mm, zatímco většina zbývajících částic v přítoku sítím prochází (Ruiken et al., 2013). Rozdíl mezi naměřenou a teoretickou délkou vláken TP naznačuje, že v OV existují i kratší vlákna papíru, která možná nejsou pouze z TP, ale i z jiných druhů papíru. Vysoké hodnoty ztrát při žihání pro vzorek jednostupňově mechanicky separovaného PCK v rozmezí od 89,9 % do 94,5 % v PCK ukazují významný podíl OL ve PCK. Dle literatury činí frakce celulózy z PCK 79 % celkové hmotnosti a 84 % OL v PK. (Crutchik et al., 2018). Je evidentní, že přítomnost OL v podobě celulózy neovlivňuje hodnotu pH PCK, jak bylo na začátku testování předpokládáno. Naměřené hodnoty pH PCK jsou blízké hodnotám, které byly zjištěny v nátoku OV do ČOV Brno – Modřice. Odstranění celkového P pomocí jemného prosévání PCK v primárním stupni čištění se odhaduje na 1,5 %, zatímco odstranění celkového N činí 1,2 %. Tyto hodnoty jsou v souladu s odbornou literaturou, konkrétně s uváděnou hodnotou 1 % pro odstranění N a P pomocí jemného prosévání (Ruiken et al., 2013). Odstranění OL pomocí získávání PCK činí 8,3 %. Toto měření odpovídá 50 % hodnotě dolní meze, jak naznačují údaje z předchozích experimentů, které uváděly rozsah odstranění OL v rozmezí 15–40 % (*Salsnes Filter*, 2017). Tato redukce OL během prosévání PCK má vliv na biologický proces čištění, spotřebu energie, aeraci a spotřebu chemikálií. Určení rozsahu této redukce bude součástí dalších výzkumů, které budou zkoumat vliv separace PCK na biologické procesy.

V porovnání s hodnotami ztráty žiháním vzorků jednostupňově mechanicky odděleného PCK, byla zaznamenána nižší hodnota tohoto parametru ve dvoustupňově manuálně prosetém vzorku, konkrétně 83,2 %. Tato skutečnost může být ovlivněna tím, že z jednostupňově prosetého PCK byly odstraněny zbytky potravin,

kteřé tvořily určitý podíl OL v PCK, tedy přibližně 10 %. Z toho lze usoudit, že cca 10 % OL v peletizovaném a pyrolyzovaném vzorku PCK pochází z potravinových zbytků, listů apod.

Celulóza je nerozpustná frakce, která tvoří půlku NL a třetinu inertního CHSK v OV (Ruiken et al., 2013). Průměrná hodnota NL na přítoku do ČOV Brno – Modřice během pokusu byla  $29\,048\text{ kg}\cdot\text{den}^{-1}$  (Tab. 18). V experimentálních podmínkách byla zaznamenána účinnost odstranění NL pomocí jemného prosévání PCK ve výši 9 %. Údaje z literatury naznačují vyšší průměrnou účinnost odstraňování NL přes jemné síto, která se pohybuje přibližně kolem 40 % (Ruiken et al., 2013). Tuto skutečnost lze vysvětlit tím, že zařízení použité v rámci testovacích podmínek nedosahovalo svého maximálního výkonu.

Jestliže vezmeme v úvahu uvedené parametry procentuálního odstranění NL, lze konstatovat, že reální hodnota odstranění NL při separaci PCK by činila  $2\,614\text{ kg}\cdot\text{den}^{-1}$ . Hypotetická hodnota, kterou je možné dosáhnout během implementace automatického technologického procesu prosévání PCK, by mohla dosáhnout hodnoty  $11\,619\text{ kg}\cdot\text{den}^{-1}$ . Redukce NL, která by končila v biologickém stupni na  $17\,429\text{ kg}\cdot\text{den}^{-1}$ , by měla vliv na dimenzování usazovacích, aktivačních a dosazovacích nádrží. Objem této redukce je potřeba ověřit budoucími výzkumy při budování nového technologického procesu pro aplikaci jemných sítí na separaci PCK.

Degradace OL bohaté na celulózu v OV nemají vliv na biologické procesy, které probíhají za podmínek biodegradace. Na základě parametrů získaných z takto vytěženého PCK můžeme navrhnout účinný proces biologického čištění a optimalizovat provoz v sekundárním stupni čištění, jelikož tyto hodnoty přispívají ke snížení zatížení vstupujícího do následujících stupňů čištění OV.

V případě anoxické fáze čištění OV nemá separace PCK vliv na účinnost odstraňování znečišťujících látek během procesu biologické denitrifikace, kde je zaznamenáno stejné a úplné odstranění OL, N-NO<sub>3</sub> a N-NO<sub>2</sub>. Bylo zaznamenáno, že odstraňováním celulózy z OV se ztrácí vysoká negativní korelace mezi celkovým amoniakem (N-NH<sub>3</sub>) a hodnotami zákalu, NL a barvou. Při separaci PCK z OV se teplota, pH a elektrická vodivost v OV nemění. Odstraňování PCK z OV má nepříznivý vliv na čiření OV a snížení zákalu v OV na základě monitoringu vyšších hodnot zákalu, NL a barvy v OV s redukováným obsahem celulózy. Zásadní rozlišení v procesu anoxického čištění OV, která vznikla po separaci PCK jsou vyloučena (Djordjevićová et al., 2023).

#### **6.4 DEFINOVÁNÍ POTENCIÁLU DOPADU SEPARACE CELULÓZY NA VELIKOST KALOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ ČOV**

Celková doba separace PCK trvala 16 hodin. V tomto časovém období pracovalo čerpadlo s odhadovaným průtokem přibližně  $2\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  a přečerpalo zhruba  $115,2\text{ m}^3$  OV přes stírané válcové síto. Za tuto dobu bylo získáno celkem cca 3 kg usušeného PCK (se sušinou 92,5 %), což znamená, že hmotnostní výtěžek suchého PCK byl zhruba  $0,026\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  OV. Výtěžek pouze odvodněného PCK po dobu experimentu činí



přibližně 20,1 kg s průměrným obsahem sušiny 3,8 %. Odpovídající hmotnostní výtěžek odvodněného PCK byl kolem 0,174 kg·m<sup>-3</sup>.

Při průměrném denním nátoku OV odpovídajícímu 101 501 m<sup>3</sup>·den<sup>-1</sup> na ČOV Brno – Modřice („VÝROČNÍ ZPRÁVA“, 2020) by produkce suchého PCK dosahovala 2 639 kg·den<sup>-1</sup> a odvodněného PCK 17 661 kg·den<sup>-1</sup>, což je na roční úrovni 963 235 kg·rok<sup>-1</sup> suchého PCK a 6 446 265 kg·rok<sup>-1</sup> odvodněného PCK. Město Brno mělo v roce 2022 celkem 379 376 obyvatel registrovaných k trvalému pobytu (Český statistický úřad, 2022). Produkci množství suchého PCK na jednoho obyvatele je tedy možné počítat cca 2,5 kg·obyv.<sup>-1</sup>·rok<sup>-1</sup> a odvodněného PCK cca 17,0 kg·obyv.<sup>-1</sup>·rok<sup>-1</sup>. Při srovnání s dostupnými údaji z literatury, v západoevropských zemích se spotřebuje až 15 kg TP na osobu za jeden rok (Crutchik et al., 2018). Vzhledem k celkové roční produkci usušeného ČK na ČOV Brno – Modřice 5 238 000 kg·rok<sup>-1</sup> (sušina 93,7 %) ("Výroční zpráva", 2020), by produkce PCK představovala cca 20 % hmotnosti celého ČK. Obsah OL v PCK je přibližně 94,2 %, což vede ke snížení celkového množství OL v přebytečném kalu o 17 %.

Vyhodnocení ukázalo, že obsah hmotnostní vlhkosti v mechanicky vytěžených vzorcích čerstvého PCK se pohyboval v rozmezí od 9,0 % do 19,1 % sušiny. Tento parametr je klíčový pro stanovení optimálního postupu a technologie pro odvodňování PCK (RAČEK et al., 2018). Aby bylo možné snížit náklady a zkrátit dobu sušení kalů, je nutné dosáhnout co nejvyššího obsahu sušiny ve vzorku.

Z PCK se P nemusí zpětně získávat, protože jeho obsah nepřesahuje 1 % (Racek et al., 2020). Ve vztahu k mírně alkalickému rozsahu pH PCK jsou TK přítomny převážně v nerozpustné formě. Koncentrace TK v PCK kolísá a závisí na kvalitě ČOV vstupující do ČOV (Racek et al., 2020).

Na Obr. 48 a Obr. 49 je prezentováno technologické schéma ČOV Brno – Modřice a související hmotnostní bilance, přičemž Obr. 48 zachycuje současný stav bez separace PCK, zatímco Obr. 49 ilustruje předpokládaný stav s implementovanou separací a recyklací PCK. Získané informace pro současný stav byly čerpány z existujícího technologického schématu ČOV Brno - Modřice („Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.“, 2019), a hmotnostní bilance ("Výroční zpráva", 2020). Pro předpokládaný stav byly tyto informace přepočítány na základě údajů získaných v experimentální části disertační práce.



## LEGEDNA:

LŠ-lapák štěrku

LP- lapák písku

ČS-čerpací stanice

UN-usazovací nádrže

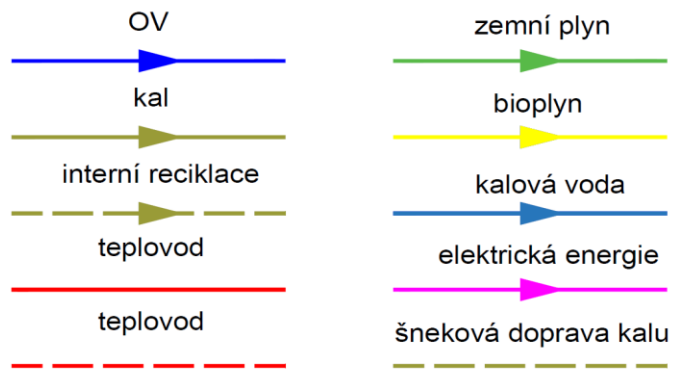
AN-aktivační nádrže

DN-dosazovací nádrže

VN-vyhnívací nádrže

UsN-uskladňovací nádrže

KGJ-kogenerační jednotka



Na Obr. 49 je do technologického schématu ČOV Brno – Modřice implementováno teoretické technologické schéma separace PCK spolu s jeho hmotnostní bilancí. Jako výsledek zabudování technologického procesu separace PCK v primárním stupni čištění na ČOV Brno – Modřice byl by redukován objem kalového hospodářství. Celková produkce kalu a vlastní výroba tepelné energie z kogenerace by se snížily zhruba o třetinu. Výroba kalového plynu  $\text{CH}_4$  by klesla o 5 %. Hodnota usušeného kalu by klesla o 18 % a hodnota odvodněného kalu by klesla o 42 %, přičemž můžeme sledovat linku končící v sušárně ČK nebo pouze odvodněný ČK.

## LEGEDNA:

LŠ-lapák štěrku

LP- lapák písku

ČS-čerpací stanice

UN-usazovací nádrže

AN-aktivační nádrže

DN-dosazovací nádrže

VN-vyhnívací nádrže

UsN-uskladňovací nádrže

KGJ-kogenerační jednotka

1. Čerpáné OV pro separaci PCK

2. Stírané válcové síto

3. Sběr PCK

4. Skládka odvodněného PCK

5. Skládka suchého PCK

6. Peletizátor

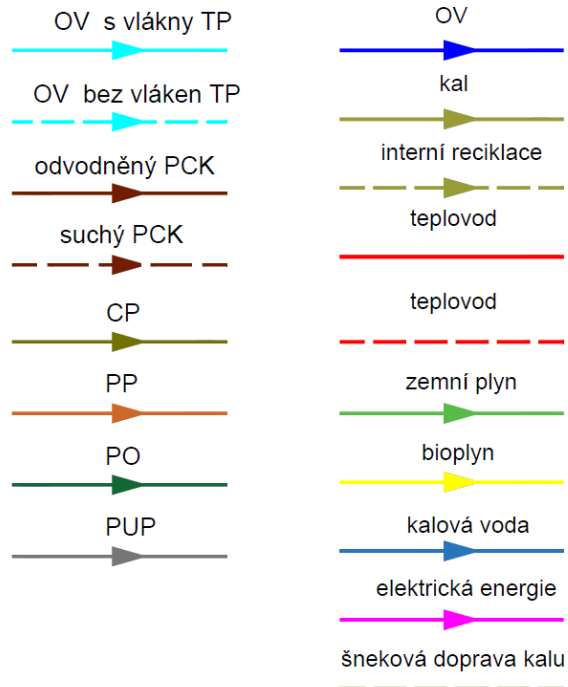
7. Skládka pelet

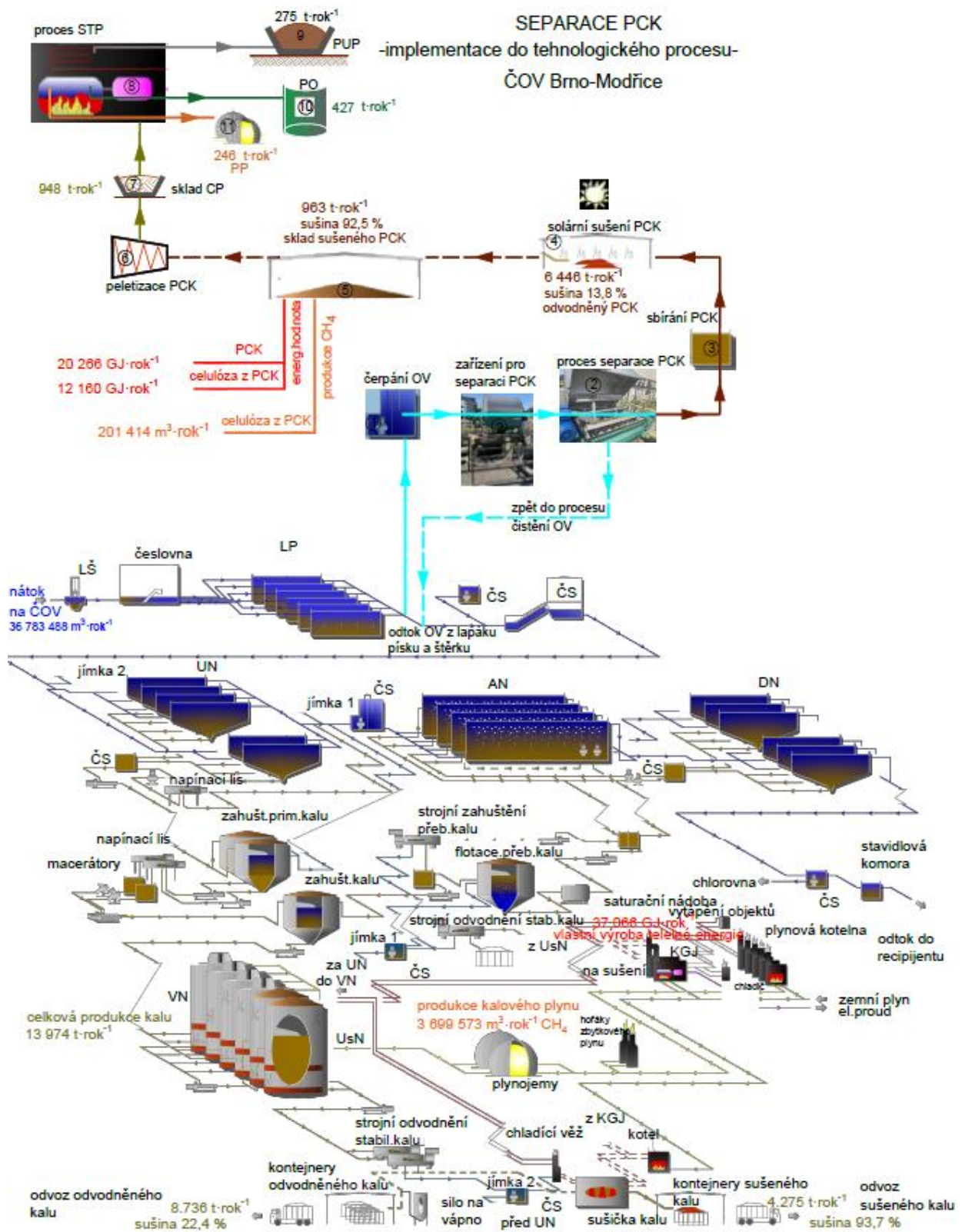
8. Jednotka STP

9. Sklad PUP

10. Sklad PO

11. Sklad





**Obr. 49** Technologické schéma ČOV Brno – Modřice a hmotnostní bilance se separací PCK – předvídaný stav, zdroj: („Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.“, 2019), (“Výroční zpráva”, 2020)

## 7 ZÁVĚR A PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE

Závěrečná kapitola disertační práce představuje shrnutí poznatků získaných prostřednictvím vlastního výzkumu a současně demonstruje přínosy disertační práce pro vědní obor a praxi.

V rámci mého výzkumu byla provedena analýza možností využití energie z primárního celulózového kalu ve formě pyrolýzního oleje a pyrolýzního plynu a současně byl definován potenciál materiálového využití primárního celulózového kalu, který má za cíl implementovat získaný pevný uhlíkatý produkt do zemědělství nebo do modrozelené infrastruktury měst. Tato disertační práce přináší nové poznatky a nabízí možnosti rozsáhlejší aplikace pyrolýzních produktů v oblasti energetiky a samotné výroby uhlíkatých materiálů.

Výzkum materiálové transformace primárního celulózového kalu k přípravě dále využitelného produktu respektoval dva směry. První směr byl zaměřen na proces získávání celulózových vláken a jeho následný dopad na další fáze čištění a hospodaření s kalovými produkty. Druhý směr výzkumu se věnoval technologii pyrolýzy pro termické zpracování a využití primárního celulózového kalu. Výzkum materiálové transformace celulózy z odpadní vody byl orientován na vývoj efektivních technologií, které umožní atraktivní využití primárního celulózového kalu a tím přispějí k udržitelnému rozvoji v oblasti nakládání s biologicky rozložitelnými odpady v souladu s principy cirkulární ekonomiky.

Státní politika životního prostředí v České republice, navázaná na evropskou legislativu, bude mít dopad na majitele a na provozovatele čistíren odpadních vod, kteří se budou připravovat na zvýšení účinnosti čištění odpadních vod, ale zejména pak na využití odpadů jako zdrojů druhotných surovin. V rámci materiálové transformace odpadu do podoby produktu bude potřeba upravit a rekonstruovat nejen primární stupeň čištění na čistírnách odpadních vod, ale také modifikovat navazující sekundární biologický stupeň čištění odpadních vod, a v neposlední řadě pak i kalové hospodářství.

Tyto nové směrnice představují příspěvek k dalším výzkumům, a poskytují náhled a podklady pro provádění těchto technologických úprav na městských čistírnách odpadních vod.

### 7.1 PŘÍNOSY PRO VĚDNÍ OBOR

Pro výzkumné účely zahrnoval proces získávání a využití celulózové frakce z městských odpadních vod následující fáze: i) separace prostřednictvím jemných sít primárního celulózového kalu pro jeho následné ii) odvodňování, iii) sušení, iv) peletizaci a v) pyrolýzu celulózových pelet. Instalace této technologie se navrhuje pro městské čistírny odpadních vod s jednotnou nebo oddílnou splaškovou stokovou soustavou, se kterou se ve větších obcích / městech v České republice setkáváme jen zřídka.

Teoretické posouzení získávání celulózy v primárním stupni čištění na městských čistírnách odpadních vod je odvozeno na základě výsledků praktické části disertační práce a to včetně vlivu na samotný provoz čistíren odpadních vod a jeho kalové hospodářství.

Laboratorní rozbor ukazuje, že v primárním celulóзовém kalu 99,6 % uhlíku je organického původu a v obsahu pevného uhlíkatého produktu činí organický uhlík 98,9 %. K nepatrnému relativnímu zvýšení podílu anorganického uhlíku v pevném uhlíkatém produktu dochází pravděpodobně z důvodu tepelného štěpení uhlovodíků procesem středně teplotní pyrolýzy. V celulóзовých peletách hodnota celkového organického uhlíku dosahuje 42,6 %, zatímco v pevném uhlíkatém produktu je to 56,9 %. Tyto údaje svědčí o tom, že celulóзовé pelety a následně i pevný uhlíkatý produkt jsou cenné produkty bohaté právě na uhlík. Obsah těžkých kovů v pevném uhlíkatém produktu vyrobeného z primárního celulóзовého kalu lze určit na základě obsahu těžkých kovů v primárním celulóзовém kalu, který je ovlivněn přítomností těžkých kovů v odpadních vodách (Racek et al., 2020) a je to veličina, která závisí na parametrech kvality nátohu na čistírnu odpadních vod. Obsah těžkých kovů je jedním z klíčových parametrů pro certifikaci pevného uhlíkatého produktu / biocharu a jeho potenciální komerční znovupoužití.

Výzkum v rámci této disertační práce ukázal, že separace primárního celulóзовého kalu má určitý vliv na aerobní procesy čištění v sekundárním stupni čištění odpadních vod. V experimentálních podmínkách je zaznamenána účinnost odstranění organických látek z odpadních vod pomocí získávání primárního celulóзовého kalu 8,3 %, celkového fosforu 1,5 %, celkového dusíku 1,2 % a nerozpuštěných látek 9 %. Chemická spotřeba kyslíku pocházející pouze z toaletního papíru tvořila během experimentu cca 3,8 % z celkové chemické spotřeby kyslíku na čistírně odpadních vod. Podíl chemické spotřeby kyslíku z primárního celulóзовého kalu v celkovém nátohu chemické spotřeby kyslíku na čistírně odpadních vod Brno – Modřice je cca 6,4 %. Zjištěné hodnoty parametrů vykazují nižší úroveň, než to uvádí odborná literatura ve zmíněných pilotních projektech z Evropské unie. Z tohoto důvodu doporučuji tyto parametry ověřit v rámci budoucích výzkumů, a to na poloprovozních či provozních zařízeních na vybrané čistírně odpadních vod v České republice.

Prosévání primárního celulóзовého kalu má vliv na biologický proces čištění, spotřebu energie, velikost dosazovacích nádrží, aeraci a spotřebu chemikálií. Objem této redukce bude předmětem dalších výzkumů vlivu separace primárního celulóзовého kalu na biologické procesy. Zásadní rozdíly v procesu anoxického čištění odpadních vod, které vznikly po separaci primárního celulóзовého kalu, jsou vyloučeny.

Získaný primární celulóзовý kal je vysokohodnotný energetický produkt, jelikož je hodnota spalného tepla dvoustupňově prosévaného primárního celulóзовého kalu (bez ostatních organických látek)  $21,04 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , což představuje nárůst o 27,5 % oproti teoretické hodnotě výhřevnosti primárního celulóзовého kalu (Daegi et al., 2017). Tuto skutečnost lze vysvětlit tím, že primární celulóзовý kal obsahuje 60–80 % celulózy bez ostatních příměsí (Ghasimi, 2016).

Zabudováním technologického procesu separace primárního celulóзовého kalu v primárním stupni čištění se redukuje objem kalového hospodářství přibližně o třetinu. Hodnota usušeného kalu klesá o cca 18 %, zatímco hodnota odvodněného kalu klesá o cca 42 %. Tento údaj ovlivňuje jak velikost kalových nádrží, tak i spotřebu chemikálií, energie, přepravy a manipulace, a tím pádem má vliv i na zmenšení uhlíkové stopy.

Závěrem lze konstatovat, že teoretické poznatky o energetické a materiálové hodnotě transformace primárního celulóзовého kalu v podmínkách na čistírně odpadních vod v České republice, za využití technologie středně teplotní pyrolýzy dostupné na českém trhu, mají svou perspektivu v budoucnosti. Tato skutečnost zdůvodňuje další výzkumy v tomto odvětví na lokální úrovni, respektující globální trendy nakládání s odpadními vodami a udržitelnými zdroji.

## 7.2 PŘÍNOSY V PRAXI

Koncentrace toaletního papíru je hodnota, která závisí na spotřebě toaletního papíru a produkci odpadní vody. Separace celulóзовých vláken v rámci primárního stupně čištění v České republice je v návaznosti na výsledky disertační práce vhodná pro městské čistírny odpadních vod obcí, které mají více než 50 000 ekvivalentních obyvatel. V roce 2029 bude legislativně zakázáno přímá aplikace čistírenského kalu v zemědělství a krajině nad 100 000 ekvivalentních obyvatel, a v roce 2032 nad 50 000 ekvivalentních obyvatel (Racek et al., 2020). V této souvislosti bych uvedla, že existuje odůvodnění pro ověření technologie materiálové transformace primárního celulóзовého kalu procesem středně teplotní pyrolýzy na čistírnách odpadních vod v České republice o velikosti nad 50 000 ekvivalentních obyvatel.

Instalaci pro jemné dynamické prosévání navrhuji pomocí mikrosít o velikosti okolo 0,3 mm a s odvodňovacím lisem. Pro účel sušení vytěženého primárního celulóзовého kalu doporučuji aplikovat solární sušárnu. Tato instalace by měla být umístěna za lapákem písku a tuků a za česlovnou.

Získaný pevný uhlíkatý produkt má mnoho možností aplikace, např. v zemědělství jako přísada pro zlepšení vlastností půdy, hnojení půdy a zadržování vody v krajině, a to s ohledem ke svým hygrokopickým vlastnostem (Racek et al., 2020). Použití tohoto materiálu zahrnuje také vázání uhlíku, imobilizaci kontaminantů a snižování emisí skleníkových plynů (Racek et al., 2020). Celulóza z primárního celulóзовého kalu na čistírně odpadních vod se může použít jako bioenergetický zdroj pro výrobu zelené energie, včetně pelet, bioetanolu a bioplynu (Cirtec, 2023).

Výroba pevného uhlíkatého produktu z primárního celulóзовého kalu by tvořila cca 10,0 % z celkové produkce pevného uhlíkatého produktu z čistírenského kalu. Výhřevnost celulózy z primárního celulóзовého kalu představuje 21,2 % roční produkce tepla z bioplynu a hypotetická produkce metanu z primárního celulóзовého kalu může dosáhnout cca 5 % celkové produkce metanu na čistírně odpadních vod Brno – Modřice. Získávání primárního celulóзовého kalu by nemělo významný dopad na řízení výroby bioplynu na čistírně odpadních vod Brno – Modřice. Produkce

tepelné energie z kogenerace na čistírně odpadních vod by se redukovala přibližně o třetinu separací primárního celulózového kalu.

Cílem budoucích experimentů s pyrolytickým zpracováním je i potenciální certifikace pevného uhlíkatého produktu / biocharu podle směrnic poskytovaných International Biochar Initiative nebo European Biochar Certificate (Racek et al., 2020). Tyto směrnice stanoví limity pro vybrané parametry, které určují certifikaci pevného uhlíkatého produktu / biocharu, včetně těžkých kovů (Racek et al., 2020).

Očekává se, že globální trh s pevným uhlíkatým produktem bude za období od roku 2023 do roku 2032 zaznamenávat významný růst s ročním průměrným růstem ve výši cca 11,1 %. V roce 2022 dominovala asijsko-pacifická oblast se značným podílem na celkových tržbách, a to ve výši 70,7 %. V rámci trhu přispívá segment pyrolýzy k 56 % podílu na celkových tržbách. Přípravky pro zlepšení půdy mají významný podíl na tržbách ve výši 39 % z hlediska aplikace. Za 10 let se očekává, že celosvětový trh s produkcí pevného uhlíkatého produktu vzroste téměř třikrát (*Biochar Market Growth*, 2023).

Statistika podporuje myšlenku o rozšíření recyklace toaletního papíru z odpadních vod i na území České republiky, zejména vzhledem k tomu, že průměrná výroba toaletního papíru na osobu v České republice je o 20 % vyšší než v zemích Evropské unie. Tento fakt podporují také údaje, že nejvyšší hodnotu hypotetické koncentrace toaletního papíru v odpadní vodě jsou přepočítány na 0,10 kg·m<sup>-3</sup> pro Severní, Západní a Střední Evropu a 0,06 kg·m<sup>-3</sup> pro Východní Evropu.

Jak uvádí (Campion et al., 2023), ziskovost a využití pevného uhlíkatého produktu závisí na faktorech, jako jsou geografická poloha, dostupnost vstupního materiálu, provozní rozsah, parametry pyrolýzy, cenová politika pevného uhlíkatého produktu, druh plodin a schopnost zahrnout externí náklady. K vytvoření směrnic pro přijetí trhu pevného uhlíkatého produktu je nezbytné zahrnout externí náklady, jako jsou emise uhlíku z provozu, zvýšené emise uhlíku ze zemědělství, emise uhlíku z alternativního zpracování biomasy a také zvážit zdravotní účinky. Zároveň je potřeba vyhodnotit související přínosy, jako jsou sekvestrace uhlíku, snížení emisí uhlíku ze zemědělství, nahrazení fosilní energie, snížení emisí z alternativního zpracování biomasy a vyčerpání živin. Tento komplexní přístup, jak zdůrazňují (Campion et al., 2023), je nezbytný pro provádění ekonomických hodnocení. Složitost tohoto problému představuje překážky pro investice do produkce pevného uhlíkatého produktu.

Také je nutné poznamenat, aby praktické využití v komerčním sektoru byly doprovázeny certifikací produktů a byly pevně zakotveny v legislativě.

Závěrečným shrnutím lze konstatovat, že výsledky výzkumu této disertační práce poskytují směr pro koncepční návrhy instalací, technologií a souvisejících objektů pro materiálovou transformaci celulózy z odpadní vody procesem středně teplotní pyrolýzy, které budou s vysokou pravděpodobností předmětem budoucích výzkumů, stejně jako definování procesu výroby produktů pyrolýzy s praktickým využitím.



## 8 POUŽITÁ LITERATURA

Aktualizace Komplexní studie dopadů, zranitelnosti a zdrojů rizik souvisejících se změnou klimatu v ČR z roku 2015: ZADAVATEL: MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. (2019).

Akyol, Ç., Foglia, A., Ozbayram, E., Frison, N., Katsou, E., Eusebi, A., & Fatone, F. (2020). Validated innovative approaches for energy-efficient resource recovery and re-use from municipal wastewater: From anaerobic treatment systems to a biorefinery concept. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(9), 869-902. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1634456>

*Biochar Market Growth*. (2023). GlobeNewsWIRE. Retrieved 2023-06-09, from <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2023/02/17/2610356/0/en/Biochar-Market-Growth-is-Expanding-at-a-CAGR-of-11-14-by-2032.html>

Campion, L., Bekchanova, M., Malina, R., & Kuppens, T. (2023). The costs and benefits of biochar production and use: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 408. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137138>

Cantinho, P., Matos, M., Trancoso, M., & dos Santos, M. (2016). Behaviour and fate of metals in urban wastewater treatment plants: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(1), 359-386. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0887-x>

Ceconet, D., Raček, J., Callegari, A., & Hlavínek, P. (2020). Energy Recovery from Wastewater: A Study on Heating and Cooling of a Multipurpose Building with Sewage-Reclaimed Heat Energy. *Sustainability*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/su12010116>

*Cellulose Products Manufacturing Risk and Technology Review*. <https://www.epa.gov/>. Retrieved 2023-05-14, from <https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution/final-amendments-cellulose-products-manufacturing-risk-and>

*Cellvation*. (2018). Retrieved 2023-03-12, from <https://www.cell-vation.com/>

Chen, H. (2014). *Biotechnology of Lignocellulose*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6898-7>

Chen, R., Nie, Y., Kato, H., Wu, J., Utashiro, T., Lu, J., Yue, S., Jiang, H., Zhang, L., & Li, Y. (2017). Methanogenic degradation of toilet-paper cellulose upon sewage treatment in an anaerobic membrane bioreactor at room temperature. *Bioresource Technology*, 228, 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.089>

Chen, R., Nie, Y., Tanaka, N., Niu, Q., Li, Q., & Li, Y. (2017). Enhanced methanogenic degradation of cellulose-containing sewage via fungi-methanogens syntrophic association in an anaerobic membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, 245, 810-818. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.046>

*Cirtec*. (2023). Retrieved 2023-03-15, from <https://www.cirtec.nl/en/>

*Clean energy from sewage*. (2018). Celsius. Retrieved 2023-05-17, from <https://celsiuscity.eu/clean-energy-from-sewage/>

Crutchik, D., Frison, N., Eusebi, A., & Fatone, F. (2018). Biorefinery of cellulosic primary sludge towards targeted Short Chain Fatty Acids, phosphorus and methane recovery. *Water Research*, 136, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.047>

ČOV Brno – Modřice: REFERENČNÍ LIST. Retrieved 2023-08-06, from [https://www.aquatis.cz/files/reference/%C4%8COV%20Brno\\_abstrakt\\_CZ.pdf](https://www.aquatis.cz/files/reference/%C4%8COV%20Brno_abstrakt_CZ.pdf)

Daegi, K., Park, K., & Yoshikawa, K. (2017). Conversion of Municipal Solid Wastes into Biochar through Hydrothermal Carbonization. *INTECH*, (3), 31-46. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68221>.

*Demonstration of an innovative process to produce biobased plastic out of cellulose recovered from domestic waste water*. (2021). Retrieved 2023-03-15, from [https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n\\_proj\\_id=5179](https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=5179)

Djordjevićová, D., Carnevale Miino, M., Raček, J., Hlavínek, P., Chorazy, T., Rajaković-Ognjanović, V., & Cvijetić, N. (2023). Influence of Cellulose on the Anoxic Treatment of Domestic Wastewater in Septic Tanks: Statistical Analysis of the Chemical and Physico-Chemical Parameters. *Sustainability*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/su15107990>

EPA, Guidelines for Water Reuse (2004). EPA. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2004-guidelines-water-reuse.pdf>

Espíndola, S., Pronk, M., Zlopasa, J., Picken, S., & van Loosdrecht, M. (2021). Nanocellulose recovery from domestic wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124507>

Fernández-Arévalo, T., Lizarralde, I., Fdz-Polanco, F., Pérez-Elvira, S., Garrido, J., Puig, S., Poch, M., Grau, P., & Ayesa, E. (2017). Quantitative assessment of energy and resource recovery in wastewater treatment plants based on plant-wide simulations. *Water Research*, 118, 272-288. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.001>

Franchi, A., & Santoro, D. (2015). Current status of the rotating belt filtration (RBF) technology for municipal wastewater treatment. *Water Practice and Technology*, 10(2), 319-327. <https://doi.org/10.2166/wpt.2015.038>

Gandiglio, M., Lanzini, A., Soto, A., Leone, P., & Santarelli, M. (2017). Enhancing the Energy Efficiency of Wastewater Treatment Plants through Co-digestion and Fuel Cell Systems. *Frontiers in Environmental Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00070>

- Ghasimi, D. (2016). *Bio-methanation Of Fine Sieved Fraction Sequestered From Raw Municipal Sewage: ISBN: 978-90-6562-3928* [doctoral thesis]. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Ghasimi, D., de Kreuk, M., Maeng, S., Zandvoort, M., & van Lier, J. (2016). High-rate thermophilic bio-methanation of the fine sieved fraction from Dutch municipal raw sewage: Cost-effective potentials for on-site energy recovery. *Applied Energy*, 165, 569-582. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.065>
- Hao, X., Li, J., van Loosdrecht, M., Jiang, H., & Liu, R. (2019). Energy recovery from wastewater: Heat over organics. *Water Research*, 161, 74-77. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.106>
- HARTIG, K., MORAVEC, M., & JONÁŠOVÁ, S. (2018). Cirkulární ekonomika ve vodním hospodářství. *Vodní hospodářství*, 2018(4).
- Hempel, F., Bozarth, A., Lindenkamp, N., Klingl, A., Zauner, S., Linne, U., Steinbüchel, A., & Maier, U. (2011). Microalgae as bioreactors for bioplastic production. *Microbial Cell Factories*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/1475-2859-10-81>
- HLAVÍNEK, P. (2015). Mikrovlnná pyrolýza čistírenského kalu. *Vodovod. info*, 1804-7157, 2015(11), s. 1-6.
- Hlavínek, P., Chorazy, T., & Novotný, M. (2021). Výzkumná zpráva č. SR122157035: Koncepční řešení pro modrozelenou infrastrukturu měst a obcí. Centrum AdMaS, VUT v Brně.
- Hlavínek, P., Raček, J., & Chorazy, T. (2022). Výzkumná zpráva č. č. SR122257088: Definování potenciálu biocharu jako produktu pyrolýzního zpracování čistírenského kalu. Centrum AdMaS, VUT v Brně.
- Houdková, L., Kundrátek, J., Chládková, H., & Wanner, J. (2016). Odpadní voda jako zdroj fosforu pro další využití. *Odpadové fórum*, 2016.
- Installation of SRS (Sewage Recycling System) at Aarle-Rixtel WWTP.* (2014). Retrieved 2023-03-14, from <https://edepot.wur.nl/326365>
- Jones, E., van Vliet, M., Qadir, M., & Bierkens, M. (2021). Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. *Earth System Science Data*, 13(2), 237-254. <https://doi.org/10.5194/essd-13-237-2021>
- Jorge, C., Almeida, M., & Covas, D. (2021). Energy Balance in Wastewater Systems with Energy Recovery: A Portuguese Case Study. *Infrastructures*, 6(10). <https://doi.org/10.3390/infrastructures6100141>
- Katalog klíčového přístrojového vybavení.* (2023). [www.admas.eu](http://www.admas.eu). Retrieved 2023-03-15, from [https://admas.eu/wp-content/uploads/sites/14/2018/11/KATALOG-P%C5%98%C3%8DSTROJ%C5%AE\\_WEB.pdf](https://admas.eu/wp-content/uploads/sites/14/2018/11/KATALOG-P%C5%98%C3%8DSTROJ%C5%AE_WEB.pdf)
- Kratina, J., Rozkošný, M., Hudcová, H., Šereš, M., & Holubík, O. (2021). Studie přínosu extenzivní stabilizace čistírenských kalů z malých komunálních zdrojů pro jejich využití

jako hnojiva. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 63(6).  
<https://doi.org/10.46555/VTEI.2021.09.004>

Leverenz, H., Tchobanoglous, G., & Asano, T. (2011). Direct potable reuse: a future imperative. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 1(1), 2-10.  
<https://doi.org/10.2166/wrd.2011.000>

Malý, J., & Malá, J. (2009). *Čištění odpadních vod*. Tribun EU.

Mapy.cz: <https://mapy.cz/?source=base&id=2233001>. (2023). Retrieved 2023-08-06, from

<https://mapy.cz/zakladni?source=base&id=2233001&x=16.6313086&y=49.1295487&z=16&base=ophoto>

Marcelis, P., & Wessels, C. Recovery and valorisation of cellulose from waste water. In <https://smart-plant.eu>. [https://smart-plant.eu/~smartplant/images/publications/circular-economy/30\\_2019-04-19\\_Recovery%20and%20valorisation%20of%20cellulose.pdf](https://smart-plant.eu/~smartplant/images/publications/circular-economy/30_2019-04-19_Recovery%20and%20valorisation%20of%20cellulose.pdf)

Meteocentrum. (2022). [www.meteocentrum.cz](http://www.meteocentrum.cz). Retrieved 2023-03-14, from <https://www.meteocentrum.cz/archiv-pocasi/detail-mesta/117230-99999>

Morgan-Sagastume, F., Valentino, F., Hjort, M., Cirne, D., Karabegovic, L., Gerardin, F., Johansson, P., Karlsson, A., Magnusson, P., Alexandersson, T., Bengtsson, S., Majone, M., & Werker, A. (2014). Polyhydroxyalkanoate (PHA) production from sludge and municipal wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 69(1), 177-184.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2013.643>

Mo, W., & Zhang, Q. (2013). Energy–nutrients–water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 127, 255-267. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.007>

Mo, W., & Zhang, Q. (2013). Energy–nutrients–water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 127, 255-267. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.007>

Nair, R., Lennartsson, P., & Taherzadeh, M. (2017). Bioethanol Production From Agricultural and Municipal Wastes. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 157-190). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63664-5.00008-3>

Nereda® Aerobic Granular Biomass. (2020). <https://www.aquatecmaxcon.com.au/>. Retrieved 2023-05-21, from <https://www.aquatecmaxcon.com.au/technologies/wastewater-treatment/nereda-aerobic-granular-biomass>

Nizami, A., Rehan, M., Waqas, M., Naqvi, M., Ouda, O., Shahzad, K., Miandad, R., Khan, M., Syamsiro, M., Ismail, I., & Pant, D. (2017). Waste biorefineries: Enabling circular economies in developing countries. *Bioresource Technology*, 241, 1101-1117.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.097>

- NOVOTNÝ, M., MARKOVIĆ, M., RAČEK, J., CHORAZY, T., & HLAVÍNEK, P. (2022). The use of Biochar made from Biomass and Biosolid as a Substrate for Green Infrastructure. *National Technical University of Athens, School of Chemical Engineering, Unit of Environmental Science & Technology, 2022*(2022).
- NOVOTNÝ, M., TOBIÁŠ, J., CHORAZY, T., KALHOTKA, L., KOUŘIL, P., & HLAVÍNEK, P. (2023). Testování hygienizace čistírenských kalů pro malé zdroje znečištění. *Vodovod.info, ISSN: 1804-7157, 2023*(2).
- Novotný, M., Marković, M., Raček, J., Šipka, M., Chorazy, T., Tošić, I., & Hlavínek, P. (2023). The use of biochar made from biomass and biosolids as a substrate for green infrastructure: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy, 32*. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.100999>
- Nový akční plán EU pro oběhové hospodářství - Čistší a konkurenceschopnější Evropa (2020) (2020). EVROPSKÁ KOMISE. <https://www.databaze-strategie.cz/cz/eu/strategie/novy-akcni-plan-eu-pro-obehove-hospodarstvi-cistsi-a-konkurenceschopnejsi-evropa-2020>
- Paulsrud, B., Rusten, B., & Aas, B. (2014). Increasing the sludge energy potential of wastewater treatment plants by introducing fine mesh sieves for primary treatment. *Water Science and Technology, 69*(3), 560-565. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.737>
- Paz-Ferreiro, J., Nieto, A., Méndez, A., Askeland, M., & Gascó, G. (2018). Biochar from Biosolids Pyrolysis: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 15*(5). <https://doi.org/10.3390/ijerph15050956>
- Pikaar, I., Guest, J., Ganigué, R., Jensen, P., Rabaey, K., Seviour, T., Trimmer, J., van der Kolk, O., Vaneekhaute, C., & Verstraete, W. (eds.). (2022). *Resource Recovery from Water*. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780409566>
- Pitter, P. (2015). *Hydrochemie* (5. aktualizované a doplněné vydání). Vysoká škola chemicko-technologická v Praze.
- Pohořelý, M., Moško, J., Zach, B., Šyc, M., Václavková, Š., Jeremiáš, M., Svoboda, K., Skoblia, S., Beňo, Z., Brynda, J., Trakal, L., Straka, P., Bičáková, O., & Innemanová, P. (2017). *Material and energy utilization of dry stabilized sewage sludge - production of biochar by medium-Temperature slow pyrolysis* (Waste Forum, 2017(2), 83-89).
- Pumpa a.s. (2023). Retrieved 2023-05-07, from <https://www.pumpa.eu/cs/>
- PYREG. (2023). Retrieved 2023-08-24, from <https://pyreg.com/our-technology/>
- Racek, J., Sevcik, J., Chorazy, T., Kucerik, J., & Hlavinek, P. (2020). Biochar – Recovery Material from Pyrolysis of Sewage Sludge: A Review. *Waste and Biomass Valorization, 11*(7), 3677-3709. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00679-w>
- Recyllose - Products From Sewage. Retrieved 2023-03-15, from <https://www.scribd.com/document/557813954/Recyllose-brochure#>

- Ruiken, C., Breuer, G., Klaversma, E., Santiago, T., & van Loosdrecht, M. (2013). Sieving wastewater – Cellulose recovery, economic and energy evaluation. *Water Research*, 47(1), 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.08.023>
- Rusten, B., & Ødegaard, H. (2006). Evaluation and testing of fine mesh sieve technologies for primary treatment of municipal wastewater. *Water Science and Technology*, 54(10), 31-38. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.710>
- Salnes Filter-Municipal Installations*. Retrieved 2023-05-21, from
- Salsnes Filter: Product Overview*. (2017). Retrieved 2023-03-12, from <https://www.salsnes-filter.com/wp-content/uploads/sites/3/2017/10/Salsnes-ProductBrochure-A4-LR.pdf>
- Scale-Up Of Low-Carbon Footprint Material Recovery Techniques In Existing Wastewater Treatment Plants*. (2023). Water Reuse Europe. Retrieved 2023-08-26, from <https://www.water-reuse-europe.org/smart-plant/#page-content>
- SMART-Plant: Cellvation*. (2018). <https://www.cell-vation.com/>. Retrieved 2023-03-12, from [http://www.smart-plant.eu/images/marketing-flyers/SMARTech1\\_web.pdf](http://www.smart-plant.eu/images/marketing-flyers/SMARTech1_web.pdf)
- SMART-Plant: SMART Materials*. (2023). SMART-Plant. Retrieved 2023-03-12, from [https://www.smart-plant.eu/images/marketing-flyers/SMARTechMaterials\\_web.pdf](https://www.smart-plant.eu/images/marketing-flyers/SMARTechMaterials_web.pdf)
- Statista*. (2023). Retrieved 2023-05-21, from <https://www.statista.com/outlook/cmo/tissue-hygiene-paper/toilet-paper/south-america>
- Státní politika životního prostředí České republiky 2030 s výhledem do 2050 (2020). Ministerstvo životního prostředí. <https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/a02fcb9439f4537fc1256fbc00491592/3b6673e016fb1765c12587a4003c722f?OpenDocument>
- Stírané válcové síto - SVS, SVSLS. (2023). In [www.fontanar.cz](http://www.fontanar.cz). Fontana R s.r.o. study.com. (2023). The AP World History Regions Map. In *Major Geographical Regions of the World | Overview, List & Map*. <https://study.com/academy/lesson/the-five-major-geographical-regions-in-ap-world-history.html>
- Termické zpracování sušených čistírenských kalů: Pyrolýza. (2021).
- VELIKOVSKÁ, K., PLOTĚNÝ, K., RAČEK, J., & HLAVÍNEK, P. (2019). Možnosti využití tepelné energie z odpadních vod. *Vodovod.info*, ISSN: 1804-7157, 2019(4), s. 1-12.
- Vyhláška o podrobnostech nakládání s odpady, 273/2021 Sb., (2021). MZP České republiky.
- Výroční zpráva. (2020). In *Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. (In Czech)*. [https://www.bvk.cz/fileadmin/user\\_upload/dokumenty/akcionari/2021/Vyrocní\\_zpráva\\_2020\\_-\\_textová\\_cast.pdf](https://www.bvk.cz/fileadmin/user_upload/dokumenty/akcionari/2021/Vyrocní_zpráva_2020_-_textová_cast.pdf)

- VÝROČNÍ ZPRÁVA. (2020).  
[https://www.bvk.cz/fileadmin/user\\_upload/dokumenty/vyrocnizpravy/Vyrocnizprava\\_2020.pdf](https://www.bvk.cz/fileadmin/user_upload/dokumenty/vyrocnizpravy/Vyrocnizprava_2020.pdf)
- Wang, Z., Liu, S., Liu, K., Ji, S., Wang, M., Shu, X., Weerasinghe, R., & Fang, C. (2021). Effect of temperature on pyrolysis of sewage sludge: biochar properties and environmental risks from heavy metals. *E3S Web of Conferences*, 237. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123701040>
- Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. (2014) (5th Edition). McGraw Hill.
- Wouters, H., Euverink, G., Neef, R., Opijnen, E., & Poiesz, W. (2017). Cellulose assisted dewatering of sludge, research objectives and business case. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10936.75528>
- Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon): č. 254/2001 Sb. § 38 odst. 1, .

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obr. 1</b> Výroba a využití PUP v zelené infrastruktuře – schéma (NOVOTNÝ et al., 2022). .....	23
<b>Obr. 2</b> Separace celulózy před a po biologickém čištění (Espíndola et al., 2021) .....	27
<b>Obr. 3</b> Rotující pásová síta (Salsnes Filter SF6000) se síty o velikosti 0,35 mm (Rusten & Ødegaard, 2006).....	28
<b>Obr. 4</b> Náčrt screeningového testovacího zařízení a fotografií čisté prosévané látky a prosévané látky s filtrační podložkou (Rusten & Ødegaard, 2006).....	29
<b>Obr. 5</b> Osm SFK600 Salsnes filtrů na předúpravě 1,650 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> OV na ČOV, Tomasjord v Norsku (Salsnes Filter-Municipal Installations, n.d.).....	29
<b>Obr. 6</b> Salsnes Filter - (Salsnes Filter, 2017), (Pikaar et al., 2022) .....	30
<b>Obr. 7</b> Salsnes Filter pro instalaci v betonovém kanálu na ČOV Salmar, Follafoss, Norsko 2 850 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> (Salsnes Filter, 2017) .....	31
<b>Obr. 8</b> Celulózová vlákna a CP (SMART-Plant, 2023) .....	37
<b>Obr. 9</b> Biorafinerie primárního PCK .....	38
<b>Obr. 10</b> Obecný blokový vývojový diagram výroby bioetanolu z odpadní biomasy (Nair et al., 2017). .....	39
<b>Obr. 11</b> Schéma valorizace PCK na současných ČOV (Crutchik et al., 2018);.....	42
<b>Obr. 12</b> Schéma valorizace na ČOV s konceptem biorafinerie PCK (Crutchik et al., 2018) .....	42
<b>Obr. 13</b> Výsledky dávkových zkoušek pro výrobu CH <sub>4</sub> z různých zdrojů C: a) Specifické metanogenní aktivity TP, glukózy, H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> a acetátu; (b) Specifické rychlosti konverze související s hydrolyzou, hydrogenogeneze/acetogeneze a metanogeneze; c) výroba CH <sub>4</sub> z individuálního TP jako zdroje C; a d) výroba CH <sub>4</sub> ze směsného TP a rozpustné frakce CHSK jako zdroje C (Chen et al., 2017) .....	48
<b>Obr. 14</b> Hmotnostní průtok materií proseté jemnými síty, objem digestoře, celková energie (teplo a elektřina) a čistá využitelná energie na tunu prosévané materií na ČOV Blaricum .....	51
<b>Obr. 15</b> Autotermní proces přeměny odpadu na PUP (PYREG, 2023).....	54
<b>Obr. 16</b> Schéma procesního toku pro výrobu PUP (Pohořelý et al., 2017) .....	55
<b>Obr. 17</b> Charakteristiky globálního trhu s TP v hlavních světových regionech (Statista, 2023), (study.com, 2023).....	59
<b>Obr. 18</b> Produkce, shromažďování a čištění OV v regionech světa (Jones et al., 2021).....	65
<b>Obr. 19</b> Hustota produkce, shromažďování a čištění OV ve světovém měřítku (Jones et al., 2021):..	66
<b>Obr. 20</b> Získávání celulózy dynamickým proséváním v primárním čištění, ČOV Geestmerambacht, Nizozemsko (Pikaar et al., 2022) .....	70
<b>Obr. 21</b> Technologické schéma procesu výroby CP a vláken v rámci projektu SMART-Plant, Cellvation® na ČOV Geestmerambacht, Nizozemsko (Pikaar et al., 2022) .....	72
<b>Obr. 22</b> Systém pro recyklaci celulózy (Sewage Recycled System) v plném měřítku. Data jsou založena na extrapolovaných hodnotách a hmotnosti jsou založeny na sušině (Installation of SRS (Sewage Recycling System) at Aarle-Rixtel WWTP, 2014) .....	73
<b>Obr. 23</b> Situace širších vztahů lokality ČOV Brno – Modřice (Mapy.cz, 2023).....	76
<b>Obr. 24</b> Arelál ČOV Brno – Modřice se zobrazením místa instalace zařízení pro provedení experimentu (Mapy.cz, 2023).....	77
<b>Obr. 25</b> Lokalita experimentu v areálu ČOV Brno – Modřice, detailnější zobrazení (Mapy.cz, 2023) ..	77



<b>Obr. 26</b> Dispozice zařízení pro separaci PCK na technologickém schématu ČOV BrnoModřice, zdroj: ("Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.", 2019).....	78
<b>Obr. 27</b> Zařízení stíraného válcového síta-SVSLs s mikro sítím 0,3 mm, výrobce Fontana R, s. r. o. na ČOV Brno – Modřice .....	80
<b>Obr. 28</b> Instalace stíraného válcového síta-SVSLs s mikro sítím 0,3 mm, výrobce Fontana R, s. r. o .....	80
<b>Obr. 29</b> Provoz zařízení a separace PCK.....	80
<b>Obr. 30</b> Statická filtrace OV přes síto 2 mm.....	81
<b>Obr. 31</b> Laboratorní síta z nerezové oceli: s velikostí ok 2 mm (vlevo) a s velikostí ok 0,4 mm (vpravo) .....	81
<b>Obr. 32</b> Solární sušení separovaného PCK.....	83
<b>Obr. 33</b> Charakteristiky separovaného PCK během bezdeštného období .....	84
<b>Obr. 34</b> Charakteristiky separovaného PCK během deštného období .....	84
<b>Obr. 35</b> Srovnání charakteristiky separovaného PCK v bezdeštném (vlevo) a deštném (vpravo) období.....	85
<b>Obr. 36</b> Vzorek-4 separovaného PCK z ČOV Brno – Modřice odebrán k určení TK (vlevo) a vzorek-5 (uprostřed a vpravo) určen k pozorování mikroskopem.....	85
<b>Obr. 37</b> Pozorování vláken TP pod mikroskopem .....	86
<b>Obr. 38</b> Postup manuálního dvoustupňového prosévání PCK .....	86
<b>Obr. 39</b> Peletizovací lis (vlevo a uprostřed) a vyrobené CP (vpravo).....	87
<b>Obr. 40</b> Technologické schéma separace PCK na ČOV Brno – Modřice .....	89
<b>Obr. 41</b> Pracovní postup separace PCK a technické parametry příslušného zařízení Stíraného válcového síta-SVSLs, Fontana R, s. R.o. ("Stírané válcové síto - SVS, SVSLs", 2023) .....	91
<b>Obr. 42</b> Stírané válcové síto-SVSLs, zařízení s mikro sítím 0,3mm, Fontana R, s. R.o. ("Stírané válcové síto - SVS, SVSLs", 2023).....	92
<b>Obr. 43</b> Instalace a provoz STP jednotky s maximální kapacitou 3 kg·pokus <sup>-1</sup> v AdMaS .....	93
<b>Obr. 44</b> Černobíle a barevné fotky vláken TP z mikroskopu .....	95
<b>Obr. 45</b> Černobíle a barevné fotografie vláken při zvětšení x200 se změřenou délkou vláken 0,243 mm a tloušťkou 0,0045 mm .....	95
<b>Obr. 46</b> CP před STP (vlevo) a pevný PUP po pyrolýze (vpravo) .....	98
<b>Obr. 47</b> Materiálová transformace CP procesem pyrolýzy na PO (vlevo) a PP (vpravo).....	99
<b>Obr. 48</b> Technologické schéma ČOV Brno – Modřice a hmotnostní bilance bez separace PCK ve stávajícím stavu, zdroj: („Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.“, 2019), ("Výroční zpráva", 2020).....	107
<b>Obr. 49</b> Technologické schéma ČOV Brno – Modřice a hmotnostní bilance se separací PCK – předvídaný stav, zdroj: („Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.“, 2019), ("Výroční zpráva", 2020) .....	109

## SEZNAM TABULEK

<b>Tab. 1</b> Postup odvodnění kalu pomocí Salsnes Filtrů (Salsnes Filter, 2017) .....	30
<b>Tab. 2</b> Technické specifikace pro Salsnes Filter SFK600 (Salsnes Filter, 2017) .....	32
<b>Tab. 3</b> Moduly Salsnes Filterů pro různé kapacity ČOV (Salsnes Filter, 2017).....	32
<b>Tab. 4</b> Průměrná spotřeba TP na obyvatele za rok (Statista, 2023).....	34
<b>Tab. 5</b> Procesy přeměny odpadů do energie a výrobků s přidanou hodnotou (Nizami et al., 2017)....	40
<b>Tab. 6</b> Obnova zdrojů pro různá schémata anaerobních procesů na ČOV (Akyol et al., 2020).....	41
<b>Tab. 7</b> Průměrné využití energie a odhad výroby elektřiny z mezofilní (horní, 35 °C) a termofilní (spodní, 55 °C) digesce jemně proseté frakce (Ghasimi et al., 2016) .....	44
<b>Tab. 8</b> Provozní podmínky a výroba bioplynu z mezofilní a termofilní digesce jemně proseté frakce (Ghasimi et al., 2016) .....	45
<b>Tab. 9</b> Složení organických prvků použitého TP (Chen et al., 2017).....	46
<b>Tab. 10</b> Přednosti těžby celulózy pro technologii ČOV .....	50
<b>Tab. 11</b> Pyrolýzní technologie dle doby zdržení ("Termické zpracování sušených čistírenských kalů: Pyrolýza", 2021). .....	53
<b>Tab. 12</b> Chemické složení PUP získaného pyrolýzou z ČK při maximální procesní teplotě 600°C (NOVOTNÝ et al., 2022).....	55
<b>Tab. 13</b> Vlastnosti PUP vyrobeného ze ČK (Pohořelý et al., 2017).....	56
<b>Tab. 14</b> Předpověď trhu s TP do roku 2027 (Statista, 2023) .....	60
<b>Tab. 15</b> Produkce, shromažďování a čištění OV podle světového regionů (Jones et al., 2021) .....	64
<b>Tab. 16</b> Hypotetická koncentrace TP v OV ve světovém měřítku .....	67
<b>Tab. 17</b> Základní meteorologické údaje (Meteocentrum, 2022) .....	78
<b>Tab. 18</b> Základní parametry nátoku na ČOV Brno – Modřice, zdroj: ("Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.", 2022) .....	82
<b>Tab. 19</b> Výstupní údaje z procesu pyrolýze CP .....	88
<b>Tab. 20</b> Základní technické údaje zařízení stíraného válcového síta-SVS LS, ("Stírané válcové síto - SVS, SVSLS", 2023) .....	91
<b>Tab. 21</b> Provozní parametry jednotky STP v centru AdMaS .....	93
<b>Tab. 22</b> Laboratorní rozbor separovaného PCK .....	94
<b>Tab. 23</b> Laboratorní rozbor dvoustupňově prosévaného PCK.....	96
<b>Tab. 24</b> Hodnoty spalného tepla .....	96
<b>Tab. 25</b> Průběh procesu STP vzorku CP .....	97
<b>Tab. 26</b> Charakteristiky pevného vzorku PCK před a po pyrolýze.....	99
<b>Tab. 27</b> Roční objem produkce materiálové transformace celulózy v závislosti na počtu obyvatel ...	102

## SEZNAM GRAFŮ

<b>Graf. 1</b> Předpovídaný nárůstu objemu výroby TP do roku 2027 v hlavních světových regionech (Statista, 2023) .....	61
<b>Graf. 2</b> Předpovídaný objem výroby TP do roku 2027 v hlavních světových regionech (Statista, 2023) .....	62
<b>Graf. 3</b> Předpovídaný průměrný objem výroby TP na osobu v roce 2023 (Statista, 2023) .....	63
<b>Graf. 4</b> Hypotetická koncentrace TP v OV na ČOV ve světovém měřítku .....	68
<b>Graf. 5</b> Průběh reakce STP vzorku CP .....	97
<b>Graf. 6</b> Znázornění materiálového podílů výstupních produktů STP: PUP, PO a PP .....	100
<b>Graf. 7</b> Rozdělení hmotnostního toku CHSK na ČOV Brno – Modřice, vypracováno na základě naměřených dat v rámci vlastního výzkumu .....	103

**SEZNAM ZKRATEK**

AOX	Adsorbovatelné organicky vázané halogeny (Halogenated organic compounds)
AD	Anaerobní digesce
AdMaS	Výzkumné centrum AdMaS VUT v Brně
AnMBR	Anaerobní membránový bioreaktor
BSK <sub>5</sub>	Biologická spotřeba kyslíku
C	Uhlík
Ca	Vápník
CADoS	Projekt Cellulose Assisted Dewatering of Sludge
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CH <sub>4</sub>	Metan
CO	Oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
CP	Celulózové pelety
CHSK	Chemická spotřeba kyslíku
ČK	Čistírenský kal
ČOV	Čistírna odpadních vod
ČR	Česká republika
EO	Ekvivalentní obyvatel
EU	Evropská unie
EBC	The European Biochar Certificate
EPA	Environmental Protection Agency
FSF	Fine sieved Fraction
H	Vodík
H <sub>2</sub>	Molekula vodíku
IBI	International Biochar Initiative
IC	Celkový anorganický C (Total inorganic carbon)
K	Draslík
MBR	Membránový bioreaktor

---

N	Dusík
NO <sub>2</sub>	Dusitan
N- NO <sub>2</sub>	Celkový dusitan
NO <sub>3</sub>	Dusičnan
N- NO <sub>3</sub>	Celkový dusičnan
N-NH <sub>3</sub>	Celkový amoniak
N-NH <sub>4</sub>	Amoniakální dusík
N-NH <sub>4</sub>	Celkový amoniakální dusík
NL	Nerozpuštěné látky
O	Kyslík
OL	Organickou látku
OV	Odpadní voda
P	Fosfor
PCK	Primární celulózový kal
PLA	Polymléčná kyselina (Poly Lactic Acid)
PHA	Polyhydroxyalkanoáty
PHB	Poly-(H) - 3 hydroxybutyrát
PO	Pyrolýzní olej
PP	Pyrolýzní plyn
PUP	Pevný uhlíkatý produkt (biochar)
PVC	Polyvinylchlorid
RBF	Rotating belt filtration
SCFA	Mastné kyseliny s krátkým řetězcem
SRS	Systém recyklace odpadních vod (Sewage Recycling System)
STP	Středně teplotní pyrolýza
TC	Celkový uhlík (Total carbon)
TK	Těžké kovy
TOC	Celkový organický uhlík (Total organic carbon)
TP	Toaletní papír