



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

INTEGROVANÁ TECHNOLOGIE PRO ZPRACOVÁNÍ NEVYUŽITELNÉHO PLASTOVÉHO ODPADU A KALŮ Z ČOV

INTEGRATED TECHNOLOGY FOR ENVIRONMENTALLY SAFE RESIDUAL PLASTIC WASTE AND SEWAGE
SLUDGE DISPOSAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petra Kadlecová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Brummer, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	Bc. Petra Kadlecová
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Vladimír Brummer, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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

Integrovaná technologie pro zpracování nevyužitelného plastového odpadu a kalů z ČOV

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce bude řešit technologické možnosti integrace procesů energetického využití zbytkového plastového odpadu a současně energetického a materiálového využití kalů z ČOV. Náplní práce je posoudit a navrhnout možné synergie při společném propojení technologií na základě zmapování vzorové lokality.

Cíle diplomové práce:

- Legislativní omezení
- Volba vhodných technologií
- Definice vzájemných synergií obou procesů a návrh optimálního řešení
- Materiálová a energetická bilance integrovaných a oddělených procesů
- Odhad investičních nákladů integrovaných a oddělených procesů
- Porovnání ekonomických ukazatelů s řešením bez integrace

Seznam doporučené literatury:

ADAM, Ch., KLEY, G., SIMON, F., Thermal Treatment of Municipal Sewage Sludge Aiming at Marketable P-Fertilisers. MATERIALS TRANSACTIONS. 2007, 48(12), 3056-3061. DOI: 10.2320/matertrans.MK200707. ISSN 1345-9678.

Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, Official Journal of the European Communities, L332/91-L332/111, 28. 12. 2000

FYTILI, D., ZABANIOTOU, A., Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008, 12(1), 116-140. DOI: 10.1016/j.rser.2006.05.014. ISSN 13640321.

EGLE, L., RECHBERGER, H., KRAMPE J., ZESSNER, M., Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. Science of The Total Environment. 2016, 571, 522-542. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.019. ISSN 00489697.

KABBE, Ch., REMY, Ch., Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery in Europe. P-REX - Phosphorus recycling. Germany, 2015

LOMBARDI, L., CARNEVALE, E., CORTI, A., A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. Waste Management. 2015. 37, 26-44. ISSN 0956053x.

PAVLAS, M., BEBAR, L., KROPÁČ, J., STEHLÍK, P., Waste to energy - an evaluation of the environmental impact, Chemical Engineering Transactions, 2009. Vol. 18, p. 671-676,

STEHLÍK P. Up-to-Date Waste-to-Energy Approach - From Idea to Industrial Application, Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, 2016. ISBN 978-3-319-15466-4

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Dosavadní způsoby nakládání s čistírenskými kaly i materiálově nevyužitelným plastovým odpadem se ukazují z dlouhodobého hlediska jako nevyhovující. Ukládání výhřevných odpadů na skládky bude brzy omezeno a hrozící riziko kontaminace půd látkami obsaženými v čistírenských kalech způsobilo zpřísnění legislativních požadavků kladených na kaly při jejich využívání v zemědělství. Předkládaná diplomová práce se zabývá hledáním společného řešení v oblasti nakládání s kaly a zbytkovými plasty se zaměřením na možnost získávání fosforu ze vznikajícího popela. Na základě seznámení se s dostupnými řešeními a souvisejícími legislativními předpisy byly navrženy tři varianty možné integrace. Následně byla provedena základní energetická a materiálová bilance těchto variant v programu W2E.

ABSTRACT

The existing methods of sewage sludge and non-recyclable plastic waste management turn out to be unsatisfactory in long terms. Landfilling of the high-calorific-value wastes will be limited in near future and the potential soil contamination by some of the sewage sludge contents led to several legislation changes in the field of using the sewage sludge in agriculture. The presented thesis aims to find an integrated solution for sewage sludge and plastic waste with a focus on the possibility of phosphorus recovery from the resulting ash. Based on the study of the available separate solutions and relevant legislative regulations, three variants of possible integration were proposed. Subsequently, the basic energy and material balance of these variants were performed using W2E software.

KLÍČOVÁ SLOVA

Čistírenský kal, plastový odpad, energetické využití odpadů, zpětné získávání fosforu

KEY WORDS

Sewage sludge, plastic waste, waste-to-energy systems, phosphorus recovery

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KADLECOVÁ, Petra. *Integrovaná technologie pro zpracování nevyužitelného plastového odpadu a kalů z ČOV* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125202>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Vladimír Brummer.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Vladimíra Brummera, Ph.D., na základě konzultací ve společnosti EVECO Brno a s využitím zdrojů informací uvedených v seznamu na konci práce.

Datum

Bc. Petra Kadlecová

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala Ing. Vladimíru Brummerovi, Ph.D., za vedení práce, věnovaný čas a za jeho cenné rady a připomínky. Společnosti EVECO Brno děkuji za poskytnutí tématu práce a jejím zaměstnancům za ochotu a předané zkušenosti v rámci konzultací.

OBSAH

1	ÚVOD	14
2	CHARAKTERISTIKA ZPRACOVÁVANÝCH ODPADŮ	15
2.1	KALY Z ČOV	15
2.2	PLASTOVÝ ODPAD	19
3	RELEVANTNÍ PRÁVNÍ DOKUMENTY PRO NAKLÁDÁNÍ S KALY A PLASTY	22
3.1	PŘEHLED LEGISLATIVY ČR	23
3.1.1	Zákon o odpadech	23
3.1.2	Nakládání s kaly z ČOV, požadavky na hnojiva	23
3.1.3	Ochrana ovzduší, emise ze spalování	25
3.1.4	Skládkování	27
3.2	PLÁN ODPADOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ	28
3.3	IPPC, BREF, BAT	29
4	MOŽNOSTI NAKLÁDÁNÍ S KALEM Z ČOV	31
4.1	ÚPRAVA KALU	31
4.2	FINÁLNÍ METODY ZPRACOVÁNÍ KALU	32
4.2.1	Využití v zemědělství	34
4.2.2	Využití na povrchu terénu	35
4.2.3	Termické zpracování	35
4.2.4	Zpětné získávání fosforu z popela	40
5	MOŽNOSTI NAKLÁDÁNÍ S PLASTOVÝM ODPADEM	43
5.1	SBĚR A TRÍDĚNÍ	44
5.2	RECYKLACE	46
5.3	ENERGETICKÉ VYUŽITÍ	46
6	TECHNOLOGIE ODDĚLENÉHO ZPRACOVÁNÍ	49
6.1	JEDNOTKA PRO TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ KALŮ Z ČOV S MOŽNOSTÍ ZPĚTNÉHO ZÍSKÁVÁNÍ FOSFORU Z POPELA	49
6.1.1	Popis zamýšlené technologie	49
6.2	JEDNOTKA PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ MATERIÁLOVĚ NEVYUŽITELNÉHO PLASTOVÉHO ODPADU	51
6.2.1	Popis fungující technologie	52
7	VARIANTY INTEGRACE	54
7.1	VARIANTA 1 – SPALOVÁNÍ PLASTOVÉHO ODPADU, SUŠENÍ KALU	55
7.2	VARIANTA 2 – ODDĚLENÉ SPALOVÁNÍ PLASTOVÉHO ODPADU A VYSUŠENÉHO KALU	56
7.3	VARIANTA 3 – SPOLUSPALOVÁNÍ PLASTOVÉHO ODPADU S KALEM	57
8	MATERIÁLOVÁ A ENERGETICKÁ BILANCE VYBRANÝCH PROCESŮ	59
8.1	JEDNOTKA PRO TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ KALŮ Z ČOV S MOŽNOSTÍ ZPĚTNÉHO ZÍSKÁVÁNÍ FOSFORU Z POPELA	62
8.2	JEDNOTKA PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ MATERIÁLOVĚ NEVYUŽITELNÉHO PLASTOVÉHO ODPADU	64
8.3	VARIANTA INTEGRACE 1	66
8.4	VARIANTA INTEGRACE 2	71
8.5	VARIANTA INTEGRACE 3	75
9	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	79
10	DISKUZE	81
11	ZÁVĚR	84
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	86
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	90

1 ÚVOD

Udržitelné nakládání s odpady patří mezi hlavní cíle Evropskou unií prosazovaného oběhového hospodářství. Nárůst produkovaného odpadu spojený s růstem populace a konzumním stylem života má neblahý dopad na životní prostředí, ale současně představuje zdroj motivace při vývoji nových technologií. Žádoucí je zpracovávat odpady přímo v místě jejich vzniku, bez nutnosti přepravy na velké vzdálenosti, u které mnohdy chybí možnost kontroly nad výsledným způsobem zpracování.

Podpora využívání alternativních zdrojů energie a omezování skládkování staví do velmi výhodné pozice energetické využívání odpadů. Mezi hlavní výhody patří redukce objemu odpadu a úspora primárních paliv. Likvidace odpadů přímo jejich producentem řeší otázku dodatečných nákladů spojených s jejich předáváním externímu zpracovateli. Přidanou hodnotou je navíc možnost využívání energie z vlastního odpadu.

Příkladem významného toku odpadu vhodného k energetickému využití může být jinak nevyužitelný plastový odpad (výmět z třídící linky), jehož vysoký energetický obsah je při uložení na skládku znehodnocen. Plasty jsou zastoupeny téměř ve všech oblastech každodenního života a mnohdy jsou obtížně nahraditelné. Za takové situace je jen těžko představitelná jejich eliminace. Recyklační systém se není zdaleka schopen vypořádat s veškerým produkovaným odpadem a rozvinutí efektivního systému, který by fungoval paralelně s recyklací, aniž by ji narušoval, představuje velkou výzvu.

Dalším příkladem nevyhnutelného odpadu jsou kaly z čistíren odpadních vod. Přes to, že některé evropské státy již čistírenské kaly běžně spalují, v ČR mezi nejčastější způsoby nakládání s nimi patří jejich přímá aplikace v zemědělství nebo kompostování. Možné riziko kontaminace půd toxickými látkami obsaženými v kalech a jejich vysoké mikrobiální zatížení byly hlavními příčinami legislativních změn v oblasti nakládání s kaly. Zejména zpřísnění mikrobiologických kritérií pro kaly používané v zemědělství a zavedení povinnosti ověření účinnosti technologie na jejich úpravu [1] mělo (a bude mít) dopad na provozovatele ČOV. Modernizace stávajících nebo výstavba nových zařízení za účelem dosažení požadované hygienizace jsou poměrně ekonomicky náročné kroky. Zpracovatelům se tedy vyplatí hledat perspektivní a dlouhodobě vyhovující řešení.

Pod tlakem legislativních změn lze očekávat postupný odklon od využívání kalů v zemědělství k termickému zpracování kalů. Řešením problémů s hygienizací je i samotné sušení, z důvodu vysoké energetické náročnosti tohoto procesu je však výhodnější kal následně i spalovat a získávat tak potřebnou energii přímo z něj.

Kaly z ČOV obsahují významné množství fosforu a popel vzniklý spalováním kalu tak může do budoucna představovat jeho perspektivní zdroj. Světové zásoby primárních zdrojů fosforu se s rostoucí poptávkou po hnojivech rapidně snižují, a proto byl fosfor Evropskou unií zařazen na seznam kritických surovin [2]. V některých státech [3] již platí povinnost získávat fosfor z čistírenských kalů a lze předpokládat rozšíření této povinnosti i do dalších zemí.

Jak je patrné z názvu práce, předmětem zkoumání je možnost propojení technologií na zpracování plastového odpadu a kalu se zaměřením na získávání fosforu. Námět diplomové práce byl poskytnut společností EVECŮ Brno, která se s ohledem na ekologii dlouhodobě zabývá spalovacími procesy, energetickým využíváním odpadů a systémy čištění spalin zejména v nekonvenčních aplikacích a „na míru šitých“ řešeních. Zájem o alternativní energetické zdroje a jejich využívání na regionální úrovni vedl v minulosti k vývoji jednotek pro energetické využití zbytkového jinak nevyužitelného plastového odpadu a zařízení pro termické zpracování čistírenského kalu. Na tyto znalosti navazuje a dále je rozšiřuje praktická část práce.

2 CHARAKTERISTIKA ZPRACOVÁVANÝCH ODPADŮ

Řešenými odpady jsou čistírenské kaly a materiálově nevyužitelné plastové odpady. Oba druhy odpadů jsou v poslední době často zmiňovány, v případě kalů je to v souvislosti s riziky kontaminace půd, ke které by mohlo při některých způsobech nakládání s nimi docházet. Na zbytkový plastový odpad, tzv. výmět z třídících linek, dopadá blížící se zákaz skládkování odpadů s nezanedbatelnou energetickou hodnotou.

Řešení efektivní likvidace obou odpadů ve větším rozsahu a v souladu s cíli cirkulární ekonomiky zatím v ČR téměř chybí.

2.1 Kaly z ČOV

Kalem je nazýván vedlejší produkt z procesu čištění odpadních vod. Jedná se o veškeré látky, které nebyly zachyceny na mechanickém předčištění ČOV (lapák šterku, česle, lapák písku), případně které vznikly během vlastního čištění (biologický, chemický stupeň). [4]

Vody, které byly použity v obytných, průmyslových, zemědělských, zdravotnických a jiných stavbách, zařízeních nebo dopravních prostředcích, a tím došlo ke změně jejich jakosti (složení, teplota), obsahují znečištění a nežádoucí látky, které po vypuštění ovlivňují kvalitu povrchových nebo podzemních vod, a musí se tedy čistit. Odpadní vody se dělí na průmyslové a splaškové. Množství těchto vod přitékajících do ČOV je zvýšené o dešťovou a balastní (nežádoucí přítok netěsnostmi do stokové sítě) složku. [5]

Čištění odpadních vod spočívá v mechanickém odstranění většiny obsažených nerozpuštěných látek a v rozkladu rozpuštěných látek pomocí fyzikálně chemických či biologických způsobů tak, aby množství obsažených znečišťujících látek na odtoku nepředstavovalo významnou zátěž pro recipient. [4]

Během čištění se 50–80 % původního znečištění zakoncentruje v kalu, který tvoří cca 1–2 % objemu čištěných odpadních vod [3]. Voda je ve výsledném kalu vázána volně, koloidně nebo kapilárně. Obsah sušiny kalu hraje roli při dalším nakládání s kaly (manipulace, skladování, spalování, energetické využití). Kal s více než 16 % sušiny již má charakter sypké hmoty [7]. Sušina se stanovuje odpařením vody při teplotě 105 °C [8], kdy se s vodou odstraní i zanedbatelné množství obsažených těkavých látek. V sušině naopak zůstanou látky původně rozpuštěné, které by bylo možné v běžném procesu odseparovat (zůstaly by v kalové vodě). Jejich podíl v sušině je však také malý. Organická sušina se stanovuje jako ztráta žiháním při 550 °C [9] z vysušeného kalu. [6]

Složení kalu závisí na původu odpadní vody. Splašková voda (část městských vod) je zpravidla tvořena spotřebovanou pitnou vodou zásobující obyvatelstvo, produkty metabolismu a produkty spojenými s lidskou činností jako zbytky jídel, prací a čisticí prostředky a další perzistentní organické kontaminanty, které je složité z odpadních vod odstranit. Obsažené látky se dělí na organické (proteiny, sacharidy, lipidy) a anorganické (minerální), rozpuštěné a nerozpuštěné, usaditelné a neusaditelné. Průmyslové odpadní vody, mezi které patří i vody ze zemědělství, se mohou čistit odděleně nebo po určitém stupni předčištění (hlavně odstranění toxických, výbušných a jinak pro provoz kanalizace nebezpečných látek) vypouštět do veřejné kanalizace, kde dojde ke smísení s vodami splaškovými a společně jsou pak čištěny v komunální ČOV. Složení průmyslových odpadních vod se odvíjí od konkrétní průmyslové činnosti a technologických procesů, ze kterých odpadní voda pochází. [4] [6]

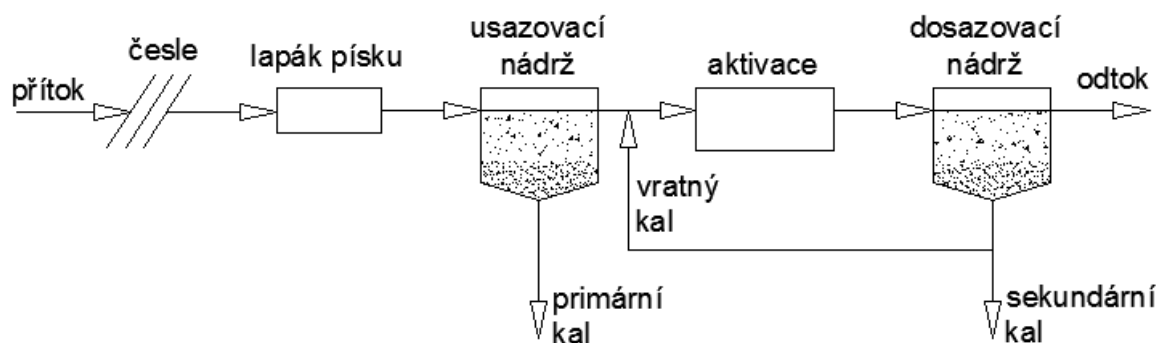
Dusík a fosfor, které mají původ v produktech metabolismu člověka (především moč, menší část fosforu nalezneme v nukleových kyselinách obsažených v buněčných jádrech), ve splachování hnojiv z polí a v případě fosforu i v pracích a čisticích prostředcích, podporují růst řas a sinic ve vodách, a je tedy žádoucí je koncentrovat při procesu čištění do kalů. [4] [6]

Kaly obsahující dostatečné množství těchto živin jsou v mnoha zemích včetně ČR využívány jako náhrada průmyslových hnojiv.

Kal se podle místa vzniku dělí na **primární**, **sekundární** a **terciární**. Jako **primární** kal je označován sediment a plovoucí nečistoty z usazovací nádrže mechanického stupně čištění. Jeho složení je závislé především na vlastnostech odpadní vody vstupující do ČOV, na efektivitě mechanického předčištění a na konkrétní technologii dané čistírny. Přibližně 75 % jeho sušiny je tvořeno organickými látkami, zbylých 25 % anorganickými, přičemž obsah sušiny primárního kalu je kolem 2,5 hm. %. Je vysoce reaktivní a tvoří základ pro produkci bioplynu na ČOV. **Sekundární** kal (označován jako biologický, přebytečný) je produktem biologického stupně čištění v dosazovací nádrži, vzniká činností mikroorganismů, které rozkládají organické látky v odpadní vodě, získávají tak živiny a rostou. Biologický kal je odebírán z dosazovací nádrže, jeho množství přímo závisí na množství odstraněných organických látek, dále je ovlivněno technologií biologického stupně čištění, stářím kalu a jeho teplotou. Část tohoto odváděného kalu je vracena před aktivaci nádrž, ve které probíhá promíchávání a provzdušňování (Obrázek 2.1). Sekundární kal již není ovlivňován kvalitou přiváděné odpadní vody v takové míře jako primární kal a je i méně reaktivní. Sušinu sekundárního kalu (0,5–1 hm. %) tvoří asi ze 60–70 % organické látky a z 30–40 % látky anorganické (**Tabulka 2.1**). [4] [6]

Tabulka 2.1 Složení primárního a sekundárního kalu [1] [3]

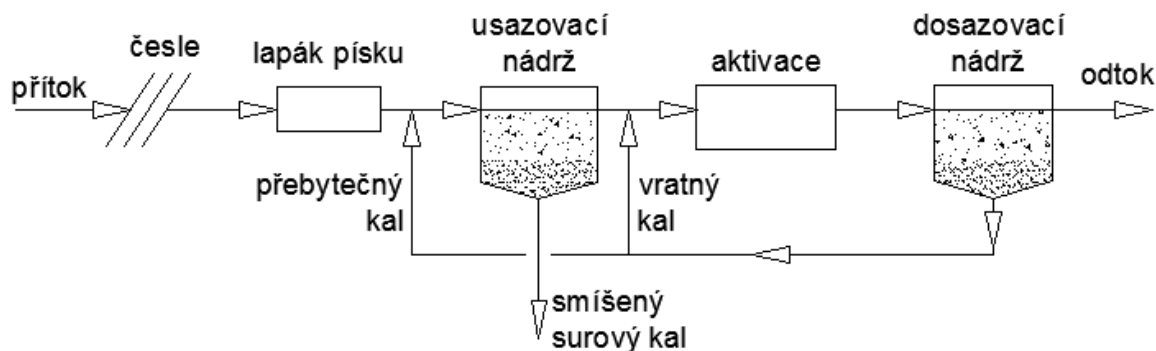
	primární kal [hm. %]	sekundární kal [hm. %]
obsah sušiny	2,5	0,5–1
organické látky v sušině	75	60–70
anorganické látky v sušině	25	30–40



Obrázek 2.1 Schéma vzniku primárního a sekundárního kalu v ČOV [6]

Oba druhy kalů mohou být zpracovávány jak odděleně, tak společně. Oddělené zpracování využívá rozdílných vlastností a složení kalů a umožňuje využití kalu pouze z jednoho stupně čištění (např. v zemědělství). Po separátním zahuštění a použití části kalu pro aktivaci jsou oba typy kalů svedeny do jedné nádrže a dále již probíhá společná stabilizace a další úpravy. Na starších čistírnách se lze setkat s pojmem **smíšený surový kal**, který vzniká přivedením přebytečného kalu z biologického stupně před usazovací nádrž, v ní znovu probíhá sedimentace a následně je spolu s primárním kalem odváděn ke společnému zpracování (obrázek 2.2). Vzhledem k tomu, že primární kal má sám o sobě velmi dobré usazovací a zahušťovací schopnosti a přivedený přebytečný kal kvůli svým odlišným vlastnostem tuto schopnost primárního kalu narušuje, se od této koncepce ustupuje. V případě odděleného chemického srážení, které se využívá z důvodu snižování obsahu fosforu ve vyčištěné, případně kalové vodě,

vzniká navíc **terciární** (chemický) kal, většinou ale tvoří součást primárního nebo sekundárního kalu, podle místa aplikace srážedla. Jeho množství i složení závisí na použité srážecí látce (hlinité nebo železité soli). [1] [3]



Obrázek 2.2 Schéma vzniku smíšeného surového kalu v ČOV [3]

Kal se následně zpracovává, dochází k redukci objemu a změně jeho vlastností tak, aby jej bylo možné dále využít (kapitola 4). Kalová koncovka tvoří důležitou součást čistícího procesu a mnohdy určuje konečný efekt čištění a plnění legislativních požadavků na ČOV.

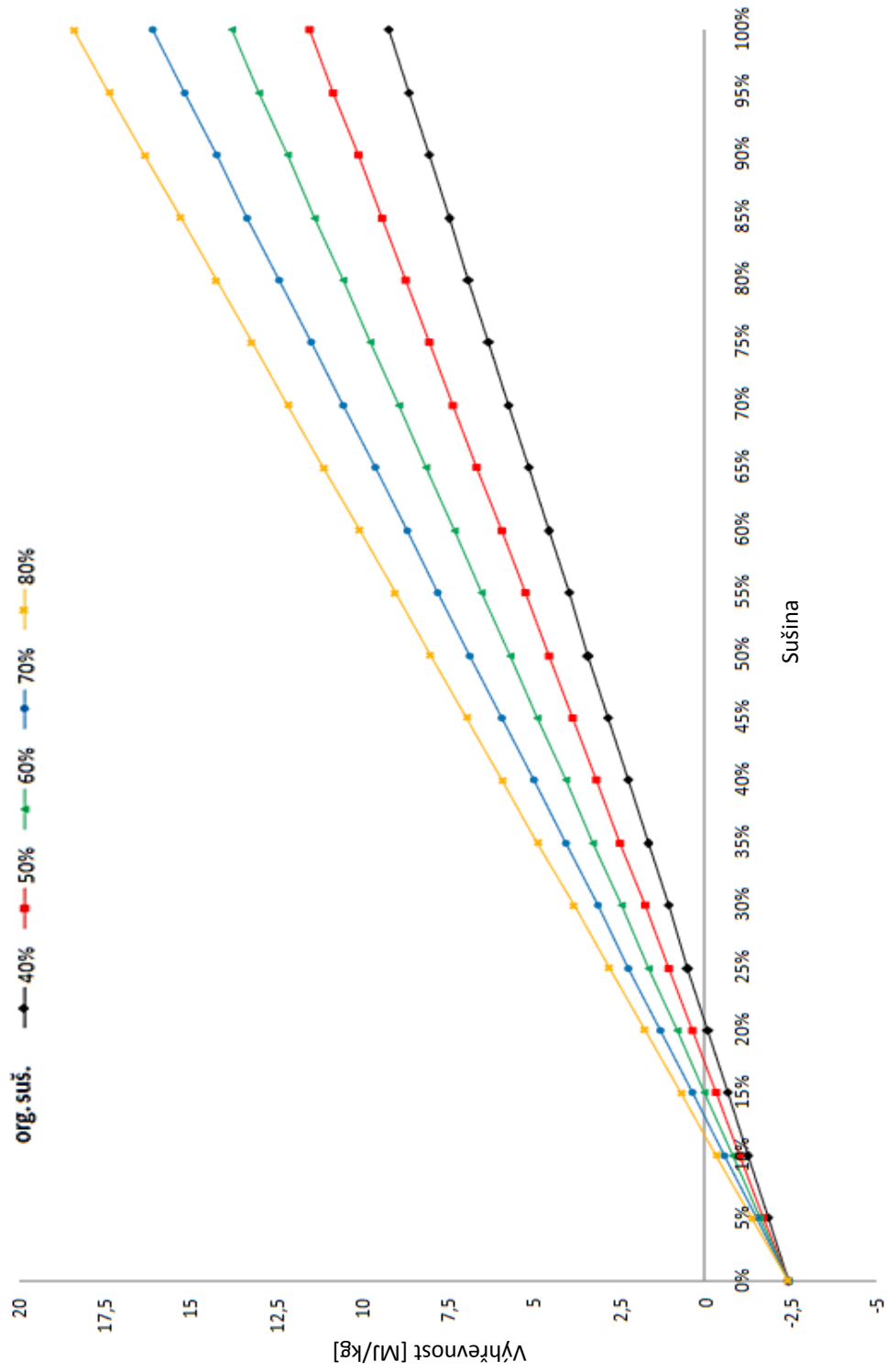
Surový, tedy neupravený, kal však může vykazovat i některé nebezpečné vlastnosti – především infekčnost (přítomnost patogenních mikroorganismů) a schopnost uvolňovat nebezpečné látky do životního prostředí. První ze zmiňovaných se eliminuje pomocí procesu stabilizace nebo hygienizace (podrobněji kapitola 4.1). Nebezpečnými látkami jsou u kalů myšleny především těžké kovy (tabulka 2.2), jejichž zdrojem jsou průmyslové vody z povrchové úpravy kovů, kožedělného průmyslu, opraven a nabíjecích stanic akumulátorů, malým podílem i ovzduší, a jiné potenciálně nebezpečné látky (polychlorované bifenyly, halogenované organické sloučeniny, polycyklické aromatické uhlovodíky, rezidua léčiv, mikroplasty apod.). Obsah patogenů, těžkých kovů a dalších nežádoucích látek musí být sledován a je limitující pro další využití kalů (využití na zemědělské půdě, kompostování, rekultivace). [1] [3] [7]

Tabulka 2.2 Obsah těžkých kovů v kalech z komunálních ČOV [8]

Těžké kovy	Cr	Cu	Pb	Ni	Sb	Zn	As	Hg	Cd	Mo
Obsah v kalu [mg/kg sušiny]	20–77	200–600	100–700	15–50	1–5	500–1500	5–20	0,5–4,6	1–5	4–20

Důležitou vlastností kalů při jejich energetickém využívání je především výhřevnost. Ta závisí (dle obrázek 2.3) na obsahu vody v kalu a na podílu organické sušiny. Obsah vody závisí na způsobu úpravy před procesem energetického využití, organické látky (běžně 70 %, v případě získávání bioplynu při procesu čištění vod 55–60 %). Pokud jsou tedy kaly určeny k energetickému využití, je usilováno o co nejvyšší stupeň odvodnění a uchování organických látek v kalu. [4] Tyto dva požadavky jsou ale v praxi protichůdné, neboť se snižujícím se obsahem organických látek v kalu se zvyšuje hranice dosažitelné sušiny při mechanickém odvodnění. [9]

Při velice nízkém obsahu sušiny kal vykazuje dle závislosti (obrázek 2.3) zápornou hodnotu výhřevnosti (hasící efekt), takovému kalu je nutné dodat energii, minimálně na odstranění takového množství vody, aby se jeho výhřevnost dostala do kladných hodnot (v praxi není autotermního hoření schopen ani kal s nízkou, i když kladnou, výhřevností a je třeba proces stabilizovat plynovým hořákem).



Obrázek 2.3 Závislost výhřevnosti kalu na obsahu sušiny a organické sušiny [7]

2.2 Plastový odpad

Plast se vyrábí především z ropy, která se v rafinérii destilací rozdělí na jednotlivé frakce (směsi uhlovodíků). Jednou z těchto frakcí je nafta, která je klíčovou složkou při výrobě plastů. K výrobě plastů se používají dva hlavní procesy – polymerace a polykondenzace, jejichž vhodnou kombinací se získávají plasty s různými vlastnostmi. Plasty se dělí do dvou hlavních skupin. První skupinu tvoří **termoplasty**, které se po ohřátí stávají tvárnými a po ochlazení opět tvrdnou (např. polykarbonát PC, polyetylén PE, polyetylentereftalát PET, polypropylen PP, polystyren PS, ...). Druhou skupinou plastů jsou **reaktoplasty** (termosety), které opětovně tvarovat ani tavit nelze (fenolytické a epoxidové pryskyřice, kaučuk, pryž, polyuretan PUR a další).

Plast je ceněný pro svou nízkou hmotnost, odolnost vůči chemikáliím a vlhkosti, koroziivzdornost, izolační schopnost atd. Některé vlastnosti lze navíc modifikovat vhodnými aditivami, což umožňuje jejich přizpůsobení se dané aplikaci a využití téměř kdekoli (obalové materiály, stavebnictví, automobilový průmysl, elektronika, zdravotnictví, volnočasové aktivity). Vzhledem k jeho plastičnosti může být přeměněn na množství výrobků a polotovarů téměř libovolného tvaru (fólie, vlákna, trubky, desky, ...) za použití mnoha technik (odlévání, vstřikování, vytlačování, vyfukování, lisování, spékání, ...), a to i opakovaně. [13] [14]

Složení plastového odpadu:

Plastový odpad může pocházet z domácností nebo podniků. Obce mají dle vyhlášky č. 321/2014 Sb. povinnost zajišťovat oddělený sběr složek komunálního odpadu – mezi tyto složky patří i plasty. Většina plastového odpadu z domácností a malých podniků tak končí ve žlutých kontejnerech. Největší zastoupení mají skupiny 150102 (Plastové obaly), 191204 (Plasty a kaučuk), 200139 (Plasty) dle katalogu odpadů [15]. V roce 2018 bylo odděleným sběrem získáno 147 tis. tun plastu z celkového komunálního odpadu 3732 tis. tun [16]. Nejčastější druhy plastů (číselné označení odpovídá recyklačnímu symbolu na výrobku) ve žlutých kontejnerech a smíšeném komunálním odpadu shrnuje **Tabulka 2.3**.

Tabulka 2.3 Druhy plastů nejčastěji zastoupené v plastovém odpadu [17] [18]

Číselné označení	Zkratka	Název materiálu	Oblast použití	Spotřeba [%]*
1	PET	polyetylentereftalát	obaly od nápojů (PET lahve) a potravin, fólie, sáčky	7,7
2	HDPE/PEHD	polyetylén s vysokou hustotou	obaly od čistících prostředků, prostředků osobní hygieny, kanystry, víčka, hračky	12,2
3	PVC	polyvinylchlorid	linoleum, plastové vodovodní trubky, izolace kabelů, nafukovací hračky	10
4	LDPE/PELD	polyetylén s nízkou hustotou	igelitové tašky, sáčky, fólie	17,5
5	PP	polypropylen	obaly od potravin, nádoby k mikrovlnnému ohřevu, trubky, automobilové součásti	19,3
6	PS	polystyren	pěnový – izolace, ochrana zboží, jednorázové obaly pokrmů; tvrdý – kelímky, plastové jednorázové nádoby, obaly od elektroniky	6,4

7	O/Jiné	ostatní plasty, kombinace	různé	26,9
---	--------	---------------------------	-------	------

* zastoupení jednotlivých druhů v plastovém odpadu se může od spotřebních dat lišit; data z plasticseurope.org

Velké objemy plastového odpadu pocházejí z průmyslu – vadné kusy, zbytky z obrábění a zpracování plastů (hobliny, piliny, nálitky, odřezky, ...), obalový materiál. Přehled dalších oblastí, ve kterých vznikají plastové odpady s příslušným množstvím za rok 2018, je uveden v **Tabulka 2.4**. Do celkového množství produkovaného plastového odpadu nejsou zahrnuty některé smíšené toky, které také mohou obsahovat plasty (např. směsné obaly, kompozitní obaly).

Tabulka 2.4 Produkce plastových podnikových odpadů za rok 2018 [16]

Kód	Název odpadu	Množství [t]	Bližší specifikace skupiny odpadu
020104	Odp. plasty (kromě obalů)	5 227	Odpady ze zemědělství, zahradnictví, rybářství, lesnictví a myslivosti
070213	Plastový odpad	83 822	Odpady z výroby, zpracování, distribuce a používání plastů, syntetického kaučuku a syntetických vláken
120105	Plastové hobliny a třísky	16 622	Odpady z tváření a z fyzikální a mechanické povrchové úpravy plastů
150102	Plastové obaly	93 531	Obaly (včetně odděleně sbíraného komunálního obalového odpadu)
160119	Plasty	7 153	Vyřazená vozidla (autovraky) z různých druhů dopravy (včetně stavebních strojů) a odpady z demontáže těchto vozidel a z jejich údržby
170203	Plasty	9 491	Stavební a demoliční odpady
191204	Plasty a kaučuk	94 540	Odpady z úpravy odpadů (např. třídění, drcení, lisování, peletizace)
200139	Plasty	8 888	Složky z odděleného sběru (kromě odpadů uvedených v podskupině 15 01)
Celkem		319 273	

Z hlediska termického zpracování jsou plasty specifické nízkým obsahem popelovin (**Tabulka 2.5**) **Tabulka 2.5** Obsah hořlaviny a popeloviny u vybraných druhů plastů vysokým obsahem prchavé hořlaviny a vysokou výhřevností (21,0–41,9 MJ/kg [19]). Problematický je obsah škodlivých látek, které se v běžných palivech nevyskytují, a s nimi spojené emise. Takovým příkladem může být chlor (je obsažen např. v PVC a tato složka odpadů se proto při třídění cíleně odstraňuje) nebo těžké kovy používané v plastech jako stabilizátory a barviva. Složení vybrané plastové frakce komunálního odpadu je uvedeno v **Tabulka 2.6**.

Tabulka 2.5 Obsah hořlaviny a popeloviny u vybraných druhů plastů [19]

Druh	Těkavé látky	Popel	Pevný uhlík
HDPE	97 %	2 %	0,3 %
polypropylen	100 %	<0,05 %	-
polystyren (tuhý)	97 %	3 %	-
PVC	92 %	<0,05 %	8 %

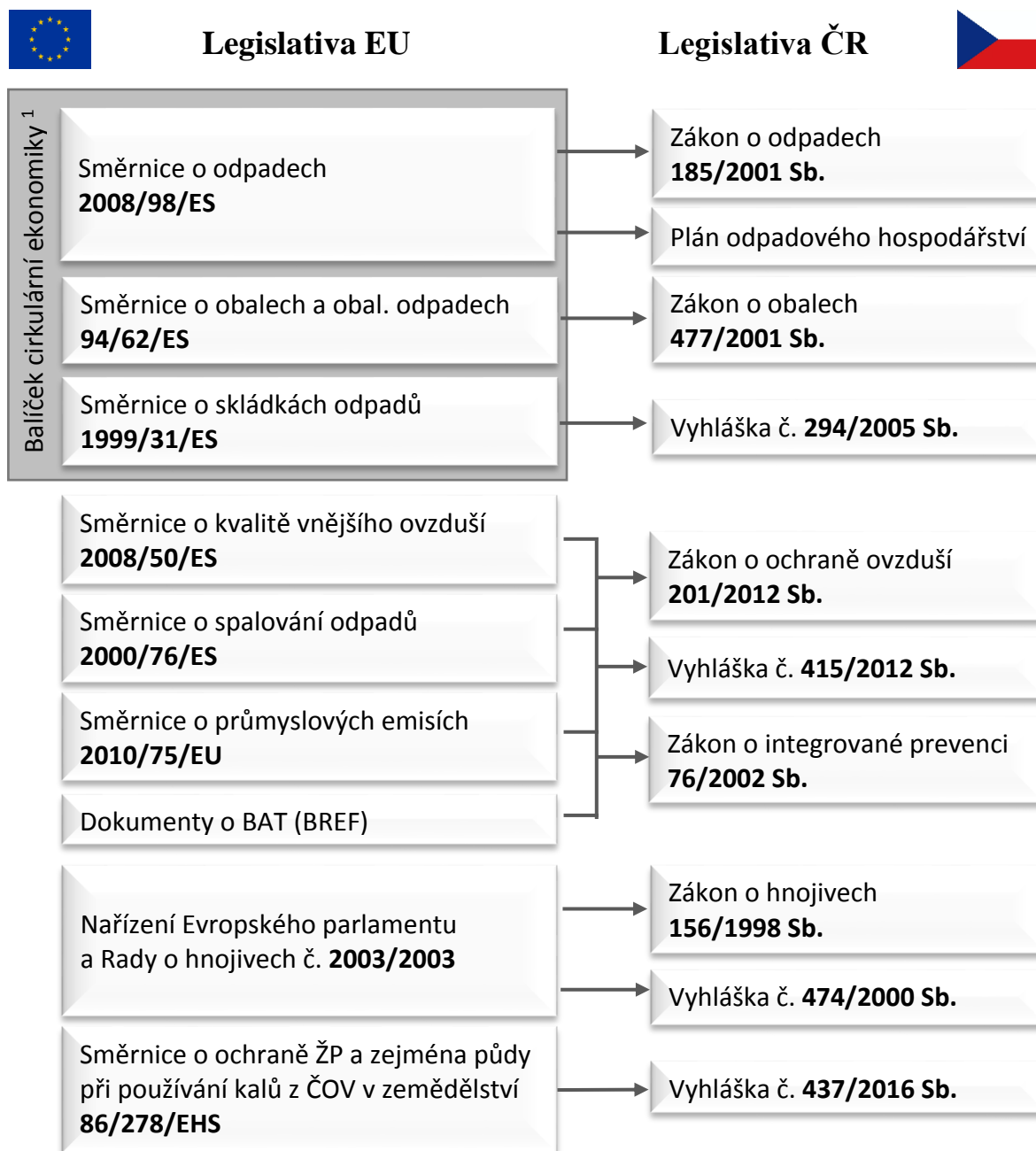
Tabulka 2.6 Palivový rozbor vybrané plastové frakce z KO [20]

Plastová frakce komunálního odpadu		
Složka	hm. %	
W	10,00	
A	3,96	
h	C	73,00
	H	12,00
	S	0,01
	N	0,10
	O	0,75
	Cl	0,18
Sušina	90,00	
Výhřevnost [MJ/kg]	35,02	

W – voda, A – popelovina, h – hořlavina

3 RELEVANTNÍ PRÁVNÍ DOKUMENTY PRO NAKLÁDÁNÍ S KALY A PLASTY

Cílem kapitoly je shrnutí předpisů souvisejících s řešenou problematikou a zejména zachycení změn přijatých v posledních letech, které jsou vedle ekologických důvodů hlavní motivací k přehodnocování dosavadních způsobů nakládání s kaly a plasty. Česká legislativa vychází ze směrnic a předpisů EU. Základní návaznost mezi dokumenty zachycuje schéma níže (Obrázek 3.1), dále jsou v podkapitolách stručně charakterizovány pro tuto práci důležité české právní předpisy a vyzdvihnuty zejména ty části, které je třeba brát v potaz při dalších úvahách.



Obrázek 3.1 Implementace klíčových evropských předpisů do legislativy ČR

¹ Spolu se směrnicemi 2000/53/ES o vozidlech s ukončenou životností, 2006/66/ES o bateriích a akumulátorech a 2012/19/EU o odpadních elektrických a elektronických zařízeních.

3.1 Přehled legislativy ČR

3.1.1 Zákon o odpadech

Zákon o odpadech 185/2001 Sb. [21] ve znění pozdějších předpisů – nejobecnější právní předpis definující základní pojmy v problematice odpadů, stanovující obecné požadavky a omezení na činnosti a osoby spojené se vznikem a příjmem odpadu, na jeho další nakládání (využití – § 19, skládkování – § 21 a podobněji vyhláška č. 294/2005 Sb., spalování – § 22, 23) i jeho přepravu (včetně přeshraniční) a stanovuje poplatky spojené s těmito činnostmi. Předepisuje náležitosti a plnění cílů Plánu odpadového hospodářství (POH) na státní, krajské i obecní úrovni.

Zákon o odpadech vyžaduje dodržování hierarchie nakládání s odpady, tedy v první řadě předcházení jeho vzniku, opětovné použití, následně materiálové nebo energetické využití a v poslední řadě likvidace. Vzniku čistírenských kalů se dá jen těžko předcházet, v úvahu připadá až aplikace kalů v zemědělství a energetické využití, konečným řešením je pak spalování bez využití energie obsažené v palivu nebo skládkování. V případě plastů lze produkci do jisté míry omezit, případně je nahradit jinými materiály. Znovupoužití plastů je možné pouze částečně, stejně tak recyklace. Nerecyklovatelné složky se nabízí využívat alespoň energeticky – vzhledem k vysoké výhřevnosti plastů. Závazky v oblasti nakládání s plasty definuje EU v balíčku oběhového hospodářství (soubor 6 směrnic týkajících se odpadů) a jednotlivé státy je implementují do svých legislativ nebo plánů odpadového hospodářství.

Plastových obalů se týká **zákon o obalech č. 477/2001 Sb.** Obal, který neumožňuje opakované použití, musí být využitelný (recyklací, spálením s využitím energie nebo zpracováním biologicky rozložitelných složek) (§ 4 bod 1 c)). Zákon stanovuje požadovaný rozsah recyklace obalů v souladu s POH (viz kapitola 3.2).

V současné době je připravována **nová česká odpadová legislativa** (předpokládaný termín vyhotovení je červenec 2020) [22], ve které by mělo dojít ke komplexním úpravám problematiky stávajícího odpadového hospodářství. Důraz bude kladen na předcházení vzniku odpadů a v souladu se strategií EU na odklon toku odpadů ze skládek směrem k ostatním způsobům nakládání s odpady, zejména těm, které respektují, že to, co je nazýváno odpadem, má mnohdy stále ekonomickou hodnotu.

3.1.2 Nakládání s kaly z ČOV, požadavky na hnojiva

Čistírenský kal je zákonem o odpadech zařazen do tzv. vybraných odpadů (§ 25) a do biologicky rozložitelného odpadu (§ 33), v § 32 a § 33 zákon definuje termín kal a stanovuje podmínky pro použití kalů na zemědělských půdách a pro zpracování kalu jako biologicky rozložitelného odpadu.

Podrobnostmi nakládání s biologicky rozložitelným odpadem se blíže zabývá **vyhláška č. 341/2008 Sb.** [23] ve znění pozdějších předpisů (novela 437/2016 Sb.). Určuje požadavky na kvalitu odpadů pro jejich další využití (např. stupeň hygienizace kalu), hodnotí jakost koncentrace rizikových látek a mikroorganismů ve výstupním produktu ze zařízení. Pokud je u kalu prokázána alespoň jedna nebezpečná vlastnost (hodnocením nebezpečných vlastností odpadů a jejich klasifikací se podrobně zabývá vyhláška č. 94/2016 Sb.), považuje se kal za nebezpečný odpad a nakládání s ním se řídí **vyhláškou č. 383/2001 Sb.** [24] ve znění pozdějších předpisů (novela 200/2019 Sb.).

Podrobnosti a podmínky použití kalů na zemědělské půdě dále upravuje **vyhláška č. 437/2016 Sb.** [1] ve znění pozdějších předpisů (novela 305/2019 Sb.) – např. stanovuje mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek jak pro kal, tak pro půdu, na kterou je kal aplikován; postupy a metody analýzy kalů a půdy atd. Vydáním této vyhlášky došlo

ke zpřísnění podmínek na úpravu kalu před jeho aplikací na zemědělskou půdu, podmínek skladování a samotné aplikace. Provozovatelé ČOV nově musí prokazovat účinnost hygienizace, pokud je zamýšleno kal skladovat, je nutné měření zopakovat.

Kaly jsou hodnoceny z hlediska obsažených koncentrací rizikových látek dle **tabulka 3.1** a z hlediska obsahu sledovaných mikroorganismů (salmonela spp., termotolerantní koliformní bakterie a enterokoky) se rozdělují do dvou kategorií (Tabulka 3.2), přičemž kal kategorie II (méně přísné limity) může být použit pouze na zemědělských půdách určených k pěstování technických plodin nebo v podzimním období na půdě určené k pěstování běžných plodin. Na půdách, kde byl použit kal kategorie II nelze následující 3 roky pěstovat polní zeleninu, brambory a intenzivně plodící ovocnou výsadbu. Od 1. ledna 2023 dělení do kategorií zanikne a pro veškeré kaly budou platit jednotná kritéria dle kategorie I.

Tabulka 3.1 Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě [1]

Riziková látka	Maximální hodnoty koncentrací v kalech [mg/kg sušiny]
As	30
Cd	5
Cr	200
Cu	500
Hg	4
Ni	100
Pb	200
Zn	2500
AOX	500
PCB	0,6
PAU	10

AOX – halogenované organické sloučeniny

PCB – polychlorované bifenyly

PAU – polycyklické aromatické uhlovodíky

Tabulka 3.2 Mikrobiologická kritéria pro upravený kal pro aplikaci na zemědělskou půdu [1]

Indikátorový mikroorganismus	Jednotky	Limitní hodnota (nálezk/KTJ*)	
		Kategorie I	Kategorie II
Salmonella spp.	nález v 1 g sušiny	negativní	-
Termotolerantní koliformní bakterie	KTJ* v 1 g sušiny	<103	10 ³ –10 ⁶
Enterokoky	KTJ* v 1 g sušiny	<103	10 ³ –10 ⁶

*KTJ – kolonie tvořící jednotku

Na upravené kaly a sedimenty se vztahují některá ustanovení **zákonu o hnojivech č. 156/1998 Sb.** [25], který se obecně týká používání hnojiv, pomocných půdních látek,

pomocných rostlinných přípravků a substrátů, jejich skladování a uvádění do oběhu, podmínek zkoušení zemědělských půd (zjišťování půdní úrodnosti v důsledku používání podpůrných látek) a zjišťování půdních vlastností. Hnojivo musí být v souladu s tímto zákonem registrováno a řádně označeno. Zákon o hnojivech spolu s dalšími souvisejícími předpisy vybízí k šetrnému používání hnojivých prostředků a dodržování zásad vedoucích k zachování kvality půd a úrodnosti (např. střídání plodin a provádění protierozních opatření).

Vyhláškou 474/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů (novela 237/2017 Sb.) [26] se stanovují požadavky na hnojiva (rizikové prvky, rizikové látky a mikrobiologické parametry a jejich limitní hodnoty pro jednotlivé skupiny hnojiv a pomocných látek), na jejich značení a balení. U hnojiv jsou klíčovými parametry obsah živin (N, P, K), jejich forma a rozpustnost. Dle vyhlášky se hnojiva dělí do kategorií: organická a minerální; dusíkatá, fosforečná, draselná a jejich kombinace (vícesložková hnojiva).

Příloha 1 dané vyhlášky udává limitní hodnoty rizikových prvků v hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech. V organických hnojivech a substrátech, při jejichž výrobě byly použity odpady z čistíren odpadních vod, které tvoří zvláštní kategorii hnojiv, se kontroluje obsah mikroorganismů dle **Tabulka 3.3**. Pro vysoký obsah fosforu lze kaly řadit i do kategorie fosforečných hnojiv (hmotnostní zlomek celkového fosforu vyjádřeného jako P_2O_5 nad 5 %). Pro ně jsou stanoveny limity na výskyt těžkých kovů dle **Tabulka 3.4**.

Tabulka 3.3 Limitní obsah mikroorganismů v hnojivech a substrátech z kalů z ČOV [26]

Přípustné množství mikroorganismů (KTJ*)		
Salmonella sp. (v 50 g vzorku)	Escherichia coli nebo enterokoky (v 1 g – 5 vzorků)	
negativní	4 vzorky	1 vzorek
	10^3	5×10^3

*KTJ – kolonie tvořící jednotku

Tabulka 3.4 Limitní obsah těžkých kovů v minerálních hnojivech s fosforečnou složkou [26]

Cd	Pb	Hg	As	Cr
mg/kg P_2O_5	mg/kg			
50	15	1,0	20	150

3.1.3 Ochrana ovzduší, emise ze spalování

Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší [27] ve znění pozdějších předpisů (novely 369/2016 Sb., 172/2018 Sb.) definuje základní pojmy v oblasti ochrany ovzduší, upravuje emisní a imisní limity, stanovuje způsoby posuzování jejich plnění, další nástroje vedoucí k omezení znečištění a znečišťování (vyhlášení nízkoemisních zón, poplatky za znečišťování, ...) a tím k omezení s nimi spojených rizik na lidské zdraví, dále stanovuje práva a povinnosti osob v souvislosti s ochranou ovzduší, jednání osob považované za přestupek, výše pokut, postup kontrolních orgánů. Provozovatel musí zařízení provozovat v souladu s tímto zákonem a v souladu s povolením provozu.

Přípustnou úroveň znečišťování určují emisní limity, emisní stropy, technické podmínky provozu a přípustná tmavost kouře. Emisní limity musí být dodrženy na každém komínovém průduchu nebo výduchu ze zařízení do ovzduší, dodržování specifických limitů (pokud jsou pro zařízení stanoveny) je nadřazeno obecným emisním limitům.

Zákon o ochraně ovzduší doplňuje **vyhláška č. 415/2012 Sb.** [28] ve znění pozdějších předpisů (novela 452/2017 Sb.), která stanovuje obecné a specifické emisní limity, způsob výpočtu emisních stropů, vyhodnocování kontinuálních i jednorázových měření emisí, technické podmínky provozu stacionárních zdrojů a způsob vyhodnocování jejich plnění, požadavky na kvalitu paliv a způsob jejího prokazování, náležitosti dokumentů spojených s provozováním stacionárního zdroje (provozní řád, odborný posudek, rozptylová studie, intervaly jednorázových měření apod.), způsob uplatnění kompenzačních opatření, atd. Zařízení tepelně zpracovávajících odpad se týká část pátá a příslušné přílohy.

U stacionárního zdroje, ve kterém je tepelně zpracován odpad, se provádí kontinuální měření emisí pro látky uvedené v tabulka 3.5 a jednorázovým měřením se stanovují emise látek podle tabulky 3.6. Naměřené emise ve spalinách se porovnávají s předepsanými emisními limity vztaženými k celkové jmenovité kapacitě a na normální stavové podmínky a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku v odpadním plynu 11 % (příloha č. 4 vyhlášky).

Tabulka 3.5 Emisní limity spaloven odpadů zjišťované primárně kontinuálním měřením [28]

Znečišťující látka	Emisní limit [mg/m ³]			
	Denní průměr	Půlhodinové průměry		10minutový průměr
		97 %	100 %	
TZL	10	10	30	-
NO_x	200	200	400	-
SO₂	50	50	200	-
TOC	10	10	20	-
HCl	10	10	60	-
HF	1	2	4	-
CO	50	-	100	150

TZL – tuhé znečišťující látky
TOC – celkový organický uhlík

Tabulka 3.6 Emisní limity spaloven odpadů zjišťované primárně jednorázovým měřením [28]

Znečišťující látky	Emisní limit
Cd+Tl a jejich sloučeniny	0,05 mg/m ³
Hg a její sloučeniny	0,05 mg/m ³
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V a jejich sloučeniny	0,5 mg/m ³
PCDD/F (polychlorované dibenzodioxiny/-fury)	0,1 ng TEQ/m ³

TEQ – toxický ekvivalent

Pro srovnání je uvedena i **Tabulka 3.7** se specifickými emisními limity pro stacionární zdroje spalující pevné palivo s výjimkou biomasy a výkonem od 0,3 do 50 MW. Jsou vztaženy k příslušnému celkovému jmenovitému tepelnému příkonu a na normální stavové podmínky a suchý plyn při referenčním obsahu kyslíku v odpadním plynu 6 % (v případě pevných paliv s výjimkou biomasy) [28].

Tabulka 3.7 Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje s výjimkou pístových spalovacích motorů a plynových turbín [28]

Celkový jmenovitý tepelný příkon	Specifické emisní limity [mg.m ⁻³]			
	SO ₂	NO _x	TZL	CO
0,3-1 MW	-	600	100	400

1-5 MW	400	500	50	500
5-50 MW	400	300	20*	300

* V případě spalovacích stacionárních zdrojů o celkovém jmenovitým tepelném příkonu do 20 MW včetně platí emisní limit $30 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$

Pokud je v zařízení jiném než spalovna odpadu nebo cementářská pec tepelně zpracováván odpad nebo palivo z odpadu (TAP) společně s běžnými palivy, jsou konkrétní specifické emisní limity stanoveny pomocí tzv. směšovacího pravidla, tedy vzorce, ve kterém jsou dány do poměru objemy spalin vzniklé spálením TAP a základního paliva a mezní hodnoty emisí pro odpad a základní palivo (bod 2.2 části I přílohy č. 4 vyhlášky č. 415/2012 Sb.)

Příloha 4 dané vyhlášky dále stanovuje technické podmínky provozu pro zařízení tepelně zpracovávající odpad. Mezi ně patří:

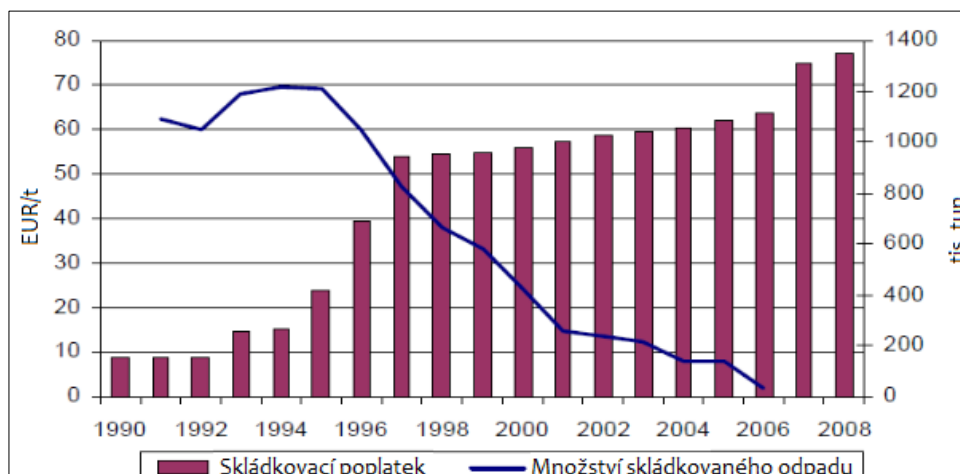
- zajistit, aby odpad setrval v prostoru, kde dochází k tepelnému zpracování dostatečnou dobu a to tak, aby struska a popel obsahovaly maximálně 3 % celkového organického uhlíku, nebo aby ztráta žíháním dosahovala max. 5 % hmotnosti suchého materiálu.
- teplota spalin za posledním přívodem spalovacího vzduchu musí dosahovat v celém profilu svého toku minimálně 850 °C alespoň po dobu 2 sekund (v případě spalování nebezpečného odpadu s obsahem organických sloučenin chloru vyjádřených jako chlor vyšším než 1 %, musí tato teplota dosáhnout minimálně 1100 °C po dobu alespoň 2 sekund).
- zařízení k termickému zpracování odpadu musí disponovat alespoň jedním pomocným hořákem v každé spalovací komoře, který slouží k zajištění potřebné teploty ve spalovací komoře při najíždění nebo odstavování po celou dobu, dokud se v SK nachází nespálený odpad a k zajištění teploty 850 °C (případně 1100 °C) za posledním přívodem spalovacího vzduchu. Pokud tato teplota poklesne, nebo pokud je některý ze specifických emisních limitů překročen, musí být automaticky zabráněno přívodu odpadu do spalovací komory.

3.1.4 Skládkování

Skládkování se věnuje **vyhláška č. 294/2005 Sb.** [29] ve znění pozdějších předpisů (novela 200/2019 Sb.) o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu. Uvádí technologické požadavky na skládky odpadů, seznam odpadů, které se na skládku ukládat nesmí, nebo mohou pouze za určitých podmínek (příloha č. 5) a s tím spojené požadavky, způsob hodnocení vlastností rozhodujících o možnosti uložení odpadu na skládku – vyluhovatelnosti (příloha 2) a mísitelnosti s ostatními druhy odpadů (příloha 3). Dále definuje způsoby úprav odpadů před jejich uložením na skládku. (příloha 6). Pro ukládání zbytkových odpadů z úpravny SKO je zaveden limit výhřevnosti 6,5 MJ/kg v sušině. Plastový odpad je možné ukládat na skládky, pouze pokud jejich využití není technicky a ekonomicky možné. Ukládání kalů na skládky je výrazně omezeno, neboť patří mezi biologicky rozložitelný odpad a pokud je možné jejich jiné využití (v zemědělství, k rekultivacím, k technickému zajištění skládek apod.), je jejich uložení na skládku zakázáno. Kaly lze využít na povrchu terénu (např. k rekultivaci) nebo jako technologický materiál k zajištění skládky, pokud splňují limity obsažených škodlivých látek a je u nich prokázána neinfekčnost.

Zmiňovaná chystaná novela odpadového zákona se významně dotkne i skládkování, jelikož prioritou EU je do budoucna minimalizovat množství odpadů putujících na skládky, přičemž takto odkloněné odpady nemají směřovat do nových ani stávajících spaloven, ale primárně na úpravu a recyklaci. EU tento záměr podpořila zastavením dotací pro ZEVO (zabránění spalování neupravených směsných odpadů) a stanovila závazné cíle pro recyklaci (viz kap. 3.2). Jako nástroj má sloužit vhodně nastavená výše skládkovacího poplatku a úlevy při vysoké

míře třídění [30]. V současnosti je skládkování pro obce nejlevnější varianta. Vliv skládkovacího poplatku na snížení skládkování zachycuje Obrázek 3.2.



Obrázek 3.2 Vliv skládkovacího poplatku na odklon od skládkování (Nizozemí, 1990–2008) [31]

Omezení skládkování, respektive zákaz skládkování recyklovatelných či energeticky využitelných odpadů je plánováno na rok 2030 se zamýšleným ohraničením výhřevností 6,5 MJ/kg v sušině. K zavedení zákazu skládkování odděleně sbíraného odpadu vyzývá členské státy EU směrnice z roku 2018 (EU 2018/850, čl. 5). Energetické využívání energeticky bohaté frakce upravených odpadů a z nich vyrobených paliv (TAP) by mělo být podporováno. [32]

3.2 Plán odpadového hospodářství

Plán odpadového hospodářství (POH) [33] představuje dokument stanovující dlouhodobou strategii v oblasti nakládání s odpady. Odráží celoevropskou odpadovou hierarchii a vede k plnění Evropou stanovených cílů. POH jsou zpracovávány ministerstvem Životního prostředí, kraji a obcemi. Hlavními cíli POH je předcházení vzniku odpadů, podpora recyklace a energetického využití odpadů, snižování vlivů nakládání s odpady na životní prostředí a lidské zdraví, podpora nahrazování primárních surovin odpady, a naopak snížení množství skládkovaných a spalovaných recyklovatelných materiálů. Dále se zaměřuje podrobněji na jednotlivé toky odpadů a stanovuje cíle, kterých musí být dosaženo, za účelem splnění požadavků příslušných evropských směrnic v souladu s cirkulární ekonomikou (Obrázek 3.3).

Směrnice o odpadech	Směrnice o obalech	Směrnice o jednorázových plastových výrobcích
<ul style="list-style-type: none"> Recyklace KO 2025 – 55 % 2030 – 60 % 2035 – 65 % Omezení skládkování KO 2035 – max. 10 % 	<ul style="list-style-type: none"> Recyklace plastových obalových odpadů 2025 – 50 % 2030 – 55 % Recyklace veškerých obalových odpadů 2025 – 65 % 2030 – 70 % 	<ul style="list-style-type: none"> Sběr nápojových PET 2025 – 77 % 2029 – 90 %

Obrázek 3.3 Cíle cirkulární ekonomiky stanovené evropskými směrnicemi [72]

Aktuální plán odpadového hospodářství ČR byl vydán pro roky 2015-2024 (platí od 1. 1. 2015). Strategické cíle uvedené v POH ČR jsou:

- a) Předcházení vzniku odpadů a snižování měrné produkce odpadů.
- b) Minimalizace nepříznivých účinků vzniku odpadů a nakládání s nimi na lidské zdraví a životní prostředí.
- c) Udržitelný rozvoj společnosti a přiblížení se k evropské „recyklační společnosti“.
- d) Maximální využívání odpadů jako náhrady primárních zdrojů a přechod na oběhové hospodářství.

Součástí odpadové strategie je podpora investic spojených s energetickým využíváním kalů z ČOV z veřejných zdrojů a podpora výzkumu zaměřeného na monitorování obsahu reziduí léčiv a přípravků osobní hygieny v odpadních vodách a jejich průniku do kalů z čistíren komunálních odpadních vod. Na základě výsledků výzkumu bude možné stanovit doporučené způsoby nakládání s kalů s ohledem na ochranu lidského zdraví a životního prostředí.

Podporováno je snižování produkce SKO rozšiřováním sítě odděleného sběru využitelných složek KO a energetické využití SKO (po vyřídění materiálově využitelných složek, nebezpečných složek a biologicky využitelného odpadu) s cílem splnit požadavky EU (**Obrázek 3.3**). Pomocí úprav skládkovacího poplatku lze znevýhodňovat ukládání využitelných druhů odpadu na sládky.

Mezi priority patří také zajištění sítě zařízení pro nakládání s odpady v regionech (zařízení pro energetické využití, kompostárny, bioplynové stanice, skládky, systémy sběru, svozu a přepravy, překládacích stanic, zařízení pro dotřídění a úpravu, technologie pro materiálové využití apod.). Závazná část POH ČR se vyhláší nařízením vlády č. 352/2014 Sb. Z ní následně vycházejí kraje a obce při tvorbě svých plánů odpadového hospodářství.

3.3 IPPC, BREF, BAT

Integrovaná prevence a omezování znečištění (IPPC, z angl. Integrated Pollution Prevention and Control) představuje systém spočívající v regulaci průmyslových a zemědělských činností tak, aby bylo dosaženo vysoké úrovně ochrany životního prostředí (předcházení a omezování znečištění, snižování emisí do vod, půdy a ovzduší, omezování vzniku odpadů a jejich využívání) a aby byly zajištěny takové provozní podmínky, které zabrání přenosu znečištění mezi jednotlivými částmi životního prostředí navzájem.

To je realizováno pomocí výběru šetrných a zároveň za standardních ekonomických a technických podmínek použitelných výrobních postupů a technologií – tzv. nejlepších dostupných technik (BAT, z angl. Best Available Techniques). Zaměřují se na technickou úroveň zařízení, používané postupy, omezení nebo alespoň snížení množství produkováných odpadů a emisí, posuzují energetickou náročnost, ekonomickou dostupnost, zefektivňují použití surovin a materiálů.

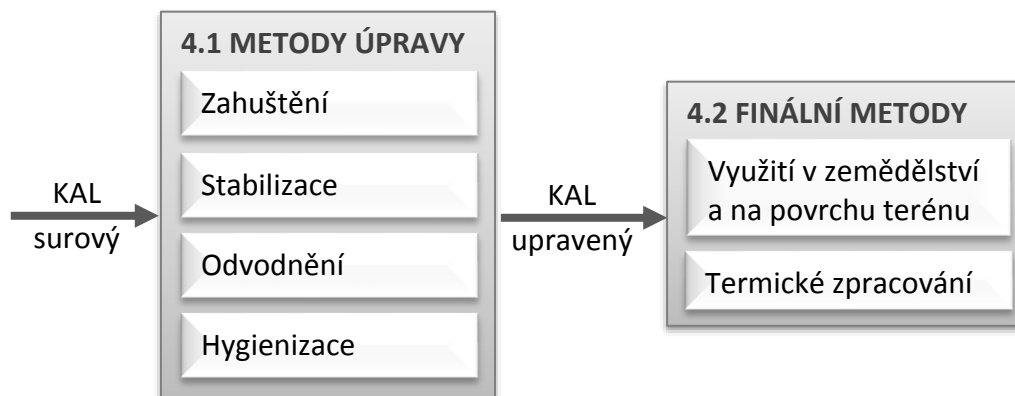
BAT představují jeden z nejdůležitějších nástrojů v ochraně životního prostředí a jsou začleněny do evropských referenčních dokumentů o nejlepších dostupných technikách – BREF (z angl. Reference Document on Best Available Techniques). BREF jsou zpracovávány a vydávány Evropskou komisí ve spolupráci s průmyslem, nevládními organizacemi a členskými státy a dále používány příslušnými povolenými orgány (krajský úřad, Ministerstvo životního prostředí) při vydávání integrovaných povolení k provozu zařízení (potenciálních zdrojů znečištění). [34] [35]

V České republice platí zákon č. 76/2002 Sb., o integrované prevenci (+ prováděcí vyhláška č. 288/2013 Sb.). V příloze č. 1 tohoto zákona jsou uvedeny kategorie průmyslových činností, do kterých spadají zařízení, pro něž je povinné aplikovat BAT (energetika, výroba a zpracování kovů, zpracování nerostů, chemický průmysl, nakládání s odpady a ostatní průmyslové činnosti). Provozovatelé těchto zařízení mají povinnost získat pro provoz zařízení integrované povolení, které stanovuje podmínky provozu, a provozovat zařízení v souladu s ním.

Relevantní BREF dokumenty:

- Referenční dokument o BAT pro průmysl zpracování odpadů (WT) [19]
- Referenční dokument o BAT spalování odpadů (WI) [11]
- Referenční dokument o BAT v systémech čištění odpadních vod a odpadních plynů a hospodaření s nimi v chemickém průmyslu (CWW) [36]
- Referenční dokument o BAT v oblasti energetická účinnost (ENE) [37]

4 MOŽNOSTI NAKLÁDÁNÍ S KALEM Z ČOV



Obrázek 4.1 Metody úpravy a likvidace čistírenských kalů

4.1 Úprava kalu

Kal se podle způsobu jeho dalšího využití upravuje tak, aby byl hygienicky nezávadný, nedocházelo v něm k rozkladným procesům a aby byl dostatečně zbaven obsažené vody z důvodu dopravy a skladování. Těchto požadavků je dosahováno nejčastěji pomocí následujících metod úprav:

Zahušťování – snaha o snížení obsahu vody v kalu, a tím i jeho množství. Realizováno je buď gravitačně (sedimentace, flotace), nebo strojně (např. odstředivka, sítové zahušťovače s přidáváním flokulantů). Primární kal má dobré sedimentační schopnosti, v mnoha případech dosahuje dostatečného zahuštění již v usazovací nádrži, sekundární kal má naopak tuto schopnost velmi špatnou. Preferováno je tudíž oddělené zahušťování primárního a sekundárního kalu. Obecně se po zahuštění za optimální považuje obsah sušiny 4,5 – 6 hm. % kvůli snadnému čerpání zahuštěného kalu. U směsného surového kalu je dosahováno nižších hodnot. [4] [6]

Stabilizace – zastavení samovolného rozkladu surového kalu snížením obsahu snadno rozložitelných organických látek. Současně klesá i obsah patogenních mikroorganismů a může tedy zároveň docházet k hygienizaci. Stabilizace probíhá aerobně nebo anaerobně (jako vedlejší produkt vzniká bioplyn), chemicky (přidáváním vápna) či sušením. [4] [6] Anaerobní stabilizace je účinnější než aerobní, při aerobním způsobu je dosahováno vyššího podílu organické sušiny. [7]

Odvodnění – odstranění vody do takové míry, aby bylo možné s kalem manipulovat ve volně loženém stavu (obsah sušiny nad 18 %). Cílem je snížení konečného množství kalu na minimum z důvodu snížení nákladů na skladování a likvidaci. Odvodnění kalů může být přirozené nebo strojní. Nejčastěji probíhá formou filtrace, odstředování, sušením nebo jejich kombinací. Odvodnitelnost kalu je důležitým ukazatelem pro následné termické zpracování kalu, závisí na podílu organických látek (čím méně, tím lepší odvodnitelnost) [9] a lze ji zvyšovat předchozí stabilizací kalu, případně přidáním flokulantů (látky způsobující shlukování), zvýšením teploty a tlaku. Odvodněný kal běžně mívá obsah sušiny 20–45 %, při termickém sušení je možné dosáhnout sušiny i více než 90 %. [4] [6]

Hygienizace – nutný proces před plánovaným dalším využitím kalů, který většinou spočívá v určité době zdržení kalu na zvýšené teplotě nebo při vyšším pH (termofilní stabilizace, sušení, pasterizace, alkalizace kalu vápnem, kompostování, spalování), dále za působení radiace či ultrazvuku. Díky těmto procesům se eliminuje přítomnost patogenních bakterií, virů, nižších hub, kvasinek, červů a roztočů. Někdy je určitého stupně hygienizace dosahováno již během stabilizace, obecně je volba metody hygienizace závislá na předchozích úpravách nebo na velikosti ČOV. [4] [6] Za nejúčinnější běžnou metodu hygienizace je považována anaerobní

stabilizace v termofilní oblasti teplot, naopak nedostačující metodou se ukázalo být vápnění. Tam, kde nelze použít anaerobní stabilizaci (z důvodu malého nátoků organického znečištění – zejména u ČOV pod 5000 EO¹) lze použít některé z alternativních metod – sušení, pasterizaci, kompostování atd. Pokud kal nesplňuje mikrobiologická kritéria a není prokázána jeho hygienizace (viz vyhláška 437/2016 nebo kapitola 3.1) nemůže být dále použit. Analýza MŽP [7] ukázala, že 50 % zkoumaných vzorků v nějakém parametru tato kritéria nesplňuje. Kromě vnosu patogenů do půdy hrozí i kontaminace ostatního hygienizovaného kalu, např. při delším skladování. [7]

Sušení – metoda odvodnění zajišťující zároveň hygienizaci kalu a redukcí objemu přibližně na 1/3 při výsledném obsahu vlhkosti běžně do 10 hm. %. Takto vysušený kal lze dlouhodobě skladovat. Sušení se nejčastěji realizuje konvekčně, kdy sušící médium proudí v blízkosti sušeného materiálu, ohřívá ho a přebírá do sebe jeho vlhkost, nebo kontaktně, kdy je teplo do materiálu přiváděno přes vyhřívané plochy a odpařená vlhkost je odváděna mimo sušárnu. Vliv na proces sušení a jeho energetickou náročnost má kvalita předchozího odvodnění kalu, teplota sušení a požadovaný podíl sušiny na výstupu. Nežádoucí je tvorba krusty na povrchu sušeného materiálu, která brání přístupu sušícího média do celého objemu sušeného materiálu. [38] [3] Prach, který vzniká při manipulaci se sušenými kaly je schopen v určitém poměru se vzduchem explodovat, je tedy třeba provést určitá opatření, např. protizášlehové zařízení, ochrana proti výbuchu, chlazení produktu na výstupu nebo hasicí zařízení. Běžně se teploty v sušárnách pohybují od 80 do 180 °C, podle použité technologie, při teplotě vyšší než 130 °C může hrozit vznícení sušeného kalu. [38]

Sušení obecně představuje spíše předstupeň následnému termickému zpracování než finální řešení, ale i aplikace na zemědělské půdy je při splnění limitů toxických látek možná. Z důvodu univerzálnosti sušeného kalu přistupují v poslední době (v návaznosti na legislativní změny) především velké ČOV k budování sušáren čistírenských kalů. [39]

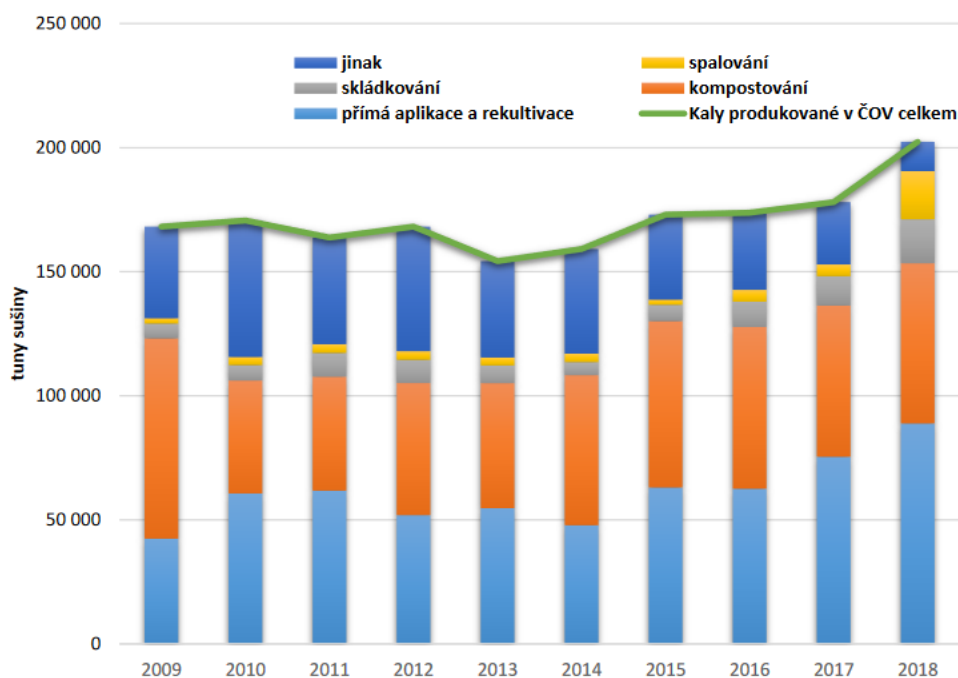
4.2 Finální metody zpracování kalu

V souladu s odpadovými strategiemi EU a zákonem o odpadech by se měla při nakládání s odpady dávat přednost jejich recyklaci, využití cenných látek z nich a energetickému využití před finální likvidací (skládka, spalování). Dle výstupů z analýzy provedené v rámci Operačního programu Životní prostředí ohledně hledání optimálního způsobu nakládání s kaly z ČOV z roku 2015 [4] je za nejvhodnější využití považována aplikace kalů na zemědělskou půdu, případně kompostování. Toto doporučení se však týká řádně hygienizovaných, nezávadných kalů, které splňují veškeré limity mikrobiálního znečištění a těžkých kovů. Vydáním vyhlášky č. 437/2016 Sb., která upravuje podmínky využívání kalů na zemědělských půdách, došlo ke zpřísnění těchto limitů a změně požadavků na ověřování účinnosti použité metody hygienizace. To může vést k větší jistotě příjemce kalu o jeho nezávadnosti a obecně i zvýšení ochoty zemědělců kal pro aplikaci využívat. Na druhou stranu není jisté, že v budoucnu nedojde k dalšímu zpřísnění (prokázání závadnosti některé další látky, odkrytí mechanismů distribuce určitých látek v půdě a rostlinách, jejich vstup do potravního řetězce, dosud neodhalené důsledky přítomnosti farmak, hormonů, pesticidů v kalech, důsledky přítomnosti mikroplastů v ekosystémech, ...), případně po vzoru některých států EU k úplnému zákazu aplikace kalů z ČOV na zemědělské půdy (např. Švýcarsko, Nizozemsko, Německo, Rakousko). [3] [40]

Při nedodržení mikrobiálních kritérií byla na základě analýzy z roku 2015 [4] prohlášena za podporovaný způsob, alternativní k přímé aplikaci nebo kompostování, pyrolýza a výroba biouhlí (biochar), v případě nepřijatelné hodnoty kontaminace těžkými kovy, polychlorovanými látkami, dioxiny a jinými stabilními kontaminanty je upřednostňováno energetické využití

¹ EO – ekvivalentních obyvatel

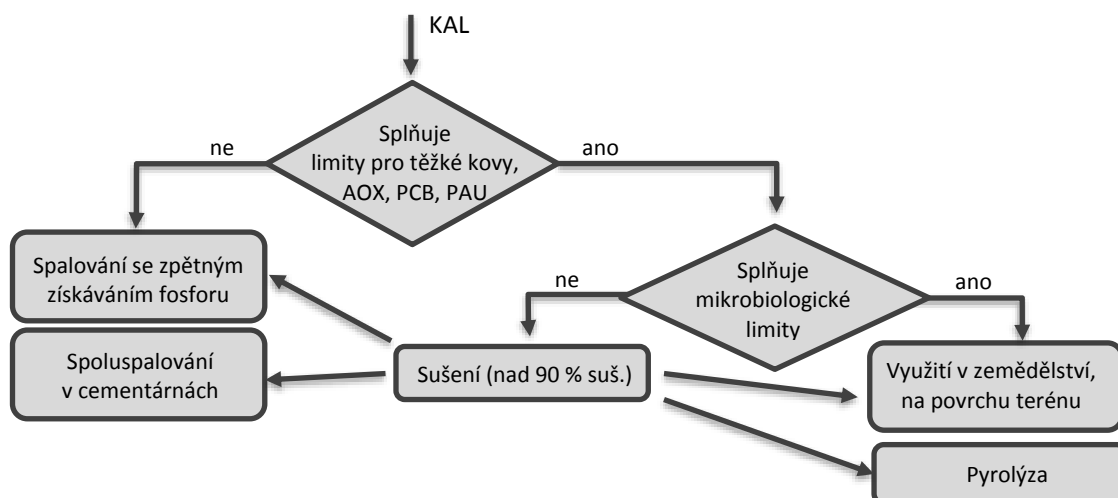
ve spalovacím zařízení. Pokud kal obsahuje závažné kontaminanty, které představují riziko pro lidské zdraví nebo ekosystémy, nejde primárně o získání energie, ale především o jejich destrukci a zabránění vniku do životního prostředí. Skládkování neupravených čistírenských kalů je zakázáno – jedná se o biologicky rozložitelné odpady a je možné jejich jiné využití. Jak je vidět z Obrázek 4.2, je skládkování i přes zákaz ve statistikách stále zastoupeno z důvodu možnosti udělení výjimky některým ČOV. Od r. 2030 bude platit zákaz skládkování využitelných odpadů s výhřevností nad 6,5 MJ/kg v sušině [32] (kaly z ČOV spadají i pod toto kritérium).



Obrázek 4.2 Produkce a nakládání s čistírenskými kaly v ČR v letech 2009-2018; kategorie „jinak“ obvykle představuje využití kalu k technickému zajištění skládky [39]

Omezené množství některých vhodně upravených kalů je možné využít do stavebních materiálů, a to včetně kalů s vysokým obsahem hydroxidů těžkých kovů (přidání do cihel). Při zpracování těchto materiálů jsou organické látky spáleny a anorganické látky zůstávají ve stavebním materiálu bez podstatného ovlivnění jeho vlastností. [6]

Vhodnost jednotlivých metod nakládání shrnuje diagram na **Obrázek 4.3**.



Obrázek 4.3 Postup při výběru vhodné finální metody nakládání s kalem

4.2.1 Využití v zemědělství

4.2.1.1 Přímá aplikace na zemědělskou půdu

Kaly většinou obsahují velké množství organických látek, uhlíku, dusíku (2–4 %), fosforu (1–2 %) a vápníku, což jsou látky podporující růst rostlin. Množství dusíku a fosforu, které způsobují eutrofizaci vod (nárůst řas a sinic), se ve vyčištěné vodě opouštějící ČOV sleduje a cílem je tedy zachytit maximum těchto látek v odváděném kalu. Kaly bohaté na živiny se nabízí využívat v zemědělství jako částečnou náhradu průmyslových hnojiv, které N a P běžně obsahují. Důležité je také doplnění organického uhlíku, který půdám chybí. Dodávání K, Mg a Ca půdám má společně s dalšími parametry pozitivní vliv na omezení eroze půdy. Kal lze využít jako hnojivo buď přímo (odvodněný nebo vysušený) nebo zpracováním v průmyslových kompostech. [4]

Pokud má být kal použit k aplikaci na zemědělské půdy, musí být odvodněný alespoň na 5 % sušiny [7], dobře stabilizovaný, maximálně hygienizovaný a musí splňovat limity pro obsah těžkých kovů. Jejich obsah lze minimalizovat pouze pečlivou kontrolou vypouštěných vod z průmyslu. Kromě těžkých kovů je také kontrolován obsah některých organických látek (adsorbovatelné organicky vázané halogeny, polychlorované bifenyly, polycyklické aromatické uhlovodíky – viz kap. 3.1 nebo [1]). Stabilní kontaminanty totiž přetrvávají v půdě a při dlouhodobé kumulaci se v určitém množství vracejí zpět do potravních řetězců [10]. Obsah rizikových látek stanovuje vyhláška 437/2016 Sb. Podle výskytu sledovaných skupin mikroorganismů v kalu se hygienizované kaly dělí do 2 kategorií a s tím souvisí možnost jejich zemědělského využití (viz kap. 3.1 nebo [21]).

Upravený a vyhovující kal je provozovatelem ČOV předáván k aplikaci, nejlépe přímo zemědělci, neboť při prodlení způsobeném přechodem přes zprostředkovatele může dojít k nárůstu množství patogenů nebo k vnesení znečištění zvenčí. V případě splnění předepsaných limitů se v současné době jedná o nejlevnější způsob využití čistírenského kalu. [7]

Dle analýzy Sdružení oborů vodovodů a kanalizací ČR (SOVAK ČR) [37] na základě údajů 1340 čistíren odpadních vod (cca 43 % všech ČOV v ČR) mezi nejzastoupenější metody úpravy patří studená stabilizace a mezofilní vyhnívání, přičemž kal na výstupu z těchto technologií nové mikrobiologické limity požadované legislativou nesplňuje.

4.2.1.2 Kompostování

Jedná se o proces přeměny odpadních kalů na organické hnojivo činností organismů za přístupu vzduchu. Výsledný kompost lze využít jako částečná náhrada průmyslových hnojiv na zemědělských či lesních půdách (požadavky stanovené v zákoně o hnojivech [25]), ale také při úpravách terénu ve městech, parcích, průmyslových zónách, při rekultivacích nebo pro uzavírání skládek. Při využití kompostu na zemědělskou půdu je stejně jako u přímé aplikace na zemědělské půdy pro využití kalu ke kompostování limitující obsah těžkých kovů a kontrolována je mikrobiologická nezávadnost (příloha 5 vyhlášky č. 341/2008 Sb. [23]). [41]

Kal ze současných čistíren odpadních vod je sám o sobě problematicky kompostovatelný kvůli stabilizací snížené reaktivitě. K odvodněnému surovému nebo stabilizovanému kalu se tedy přidává vhodné množství (asi čtyřnásobek) organického reaktivního materiálu (např. kejda, dřevní odpad, sláma) a po dobu několika týdnů je tato výsledná hmota provzdušňována v průmyslovém kompostéru. Vlivem probíhajícího rozkladu narůstá v objemu kompostu teplota a setrváním na této zvýšené teplotě dochází k hygienizaci. Pro kaly z ČOV je k hygienizaci nutná minimální teplota 65 °C po dobu 5 dnů [19]. Po dalším několikadenním zrání může být výsledný kompost aplikován.

Nevýhodou kompostování se jeví potřeba velké plochy, dostatečný zdroj vhodné reaktivní hmoty, nejlépe v blízkosti místa produkce kalu, a trvalý odbyt vznikajícího kompostu.

Kompostování je mezi provozovateli ČOV druhou nejčastější plánovanou metodou nakládání s kalem v důsledku zpřísnění mikrobiologických limitů (dle odpovědi v analýze SO-VAK ČR [39]).

4.2.2 Využití na povrchu terénu

Zahrnuje použití kalů při rekultivacích krajiny, terénních úpravách, zavážení vytěžených lomů nebo svrchním zajištění skládek, kde slouží jako vhodný základ pro vytvoření materiálu k nahrazení původní zeminy s cílem umožnit opětovné využívání dané lokality. Různé odpadní zeminy nebo popílků ze spalování a další jinak obtížně využitelné materiály zde mohou najít své uplatnění. Do směsi s kalem se dále přidávají aditiva pro podporu růstu rostlin. Zrání je velice podobné kompostování. Důležitými parametry jsou pH a vlhkost směsi a stejně jako u předchozích způsobů, ze kterých vyplývá aplikace na půdy, je třeba dodržovat legislativou stanovené limity – sledují se patogeny a toxické látky (příloha č. 10 a 11 k vyhlášce č. 294/2005 Sb. [29], příloha 5 vyhlášky č. 341/2008 Sb. [23]). [41]

4.2.3 Termické zpracování

Představuje metody zpracování vhodné zejména pro kaly, které nesplňují limity pro aplikaci na zemědělskou půdu. V případě úplného zákazu používání kalů v zemědělství po vzoru některých okolních států EU se může stát hlavním způsobem nakládání s kalem. Již dnes některé ČOV v souvislosti se zpřísněním požadavků vyhláškou č. 437/2016 Sb. přistupují k výstavbě sušáren a zařízení na energetické využití kalů (řešení je ve většině případů ve fázi zpracování studie proveditelnosti) [39]. Toto řešení je zatím atraktivní spíše pro velké ČOV, které se potýkají s velkým množstvím kalů a kterým se takto významná investice vyplatí.

Termickým zpracováním je dosahováno významné redukce výsledného odpadu (až na 1/10 původního objemu), dokonalé hygienizace a stabilizace, koncentrování nutrientů ve výsledném produktu, destrukce organických látek a využití energie uložené v kalu. Co se týče materiálového využití kalů, za hlavního zástupce mezi metodami termického zpracování je pokládána **pyrolýza**, jejíž výsledný produkt je dále využitelný, případně prodejný. Potenciál byl v nedávné době objeven i v produktu **spalování** – popelu, a to konkrétně ve získávání fosforu z něj. Fosfor byl v roce 2014 zařazen na seznam kritických surovin [40]. Jeho získáváním z popela lze maximálně využít potenciál v čistírenských kalech a uspořit přírodní zdroje fosforu. Metody na získávání fosforu z popela se stávají poměrně perspektivními a čekají víceméně jen na legislativní podporu nebo zvýšení cen za primární zdroje fosforu pro výrobu hnojiv tak, aby se tyto metody zpracovatelům kalu vyplatily. [3]

Kromě samostatného spalování kalu je možné kal přidávat do zařízení spalujících primárně jiná paliva nebo odpady. Tento způsob se označuje jako **spoluspalování** a probíhá nejčastěji v cementárnách, v teplárnách a elektrárnách nebo ve spalovnách komunálního odpadu [37]. Využití v cementárnách umožňuje maximální energetické využití a je bezodpadové. Při ostatních způsobech termického zpracování je vyžadována likvidace toxického tuhého zbytku (popílek z čištění spalin). [12] Spoluspalování znemožňuje snahu o získávání fosforu – popel z kalu s významným obsahem fosforu se mísí s popelem z primárního paliva a koncentrace fosforu je nízká.

4.2.3.1 Pyrolýza

Termochemický proces, který efektivně přeměňuje vstupní materiál na dále zhodnotitelné chemikálie a materiály. Probíhá při vysokých teplotách (550–700 °C) bez přístupu kyslíku, čímž se liší od spalování. Ohřev materiálu nad mez termické stability obsažených

organických sloučenin vede k jejich štěpení a vzniká několik dílčích produktů, které jsou dále využitelné. Pomocí různých technologií pyrolýzy a provozních parametrů (teplota, zdržná doba) se lze přizpůsobit charakteru vstupního materiálu a nastavit produkci žádanějšího produktu (plynný, kapalný, pevný). V případě čistírenských kalů se preferuje využití vznikajícího plynu okamžitě k energetickému zabezpečení procesu pyrolýzy jeho spalováním v hořácích, které jsou součástí pyrolyzéro. Přebytkové teplo se obvykle využívá k sušení vstupního materiálu.

Využitelný je i tuhý zbytek – tzv. **biochar** neboli biouhlí, který je prakticky úplně zbaven organických látek. Nejedná se o hnojivo, ale je stále podpurným půdním prostředkem, zlepšuje úrodnost a napomáhá zadržování vody v půdě. Uhlík v biouhlí zlepšuje strukturní vlastnosti půdy a současně dochází k ukládání uhlíku do půdy. Fosfor a dusík se z biocharu také uvolňují postupně, nahrazují částečně průmyslová hnojiva a při jejich aplikaci na půdu s přídavným biouhlem nedochází k vyluhování do podzemních vod. Často ale nesplňuje požadavky k aplikaci na zemědělské půdy kvůli obsaženým těžkým kovům a musí být likvidován jinak (skládky). Proto má pyrolýza potenciál pouze pro kaly s nižšími obsahy těžkých kovů. Legislativa pro aplikaci biocharu z čistírenských kalů je připravována. [10] [3]

Technologie pyrolýzy je dobře zvládnutá (především pro monodruhový odpad a menší objemy) ale velice nákladná, do procesu je nutné dodat velké množství tepelné energie (obtížné udržení stabilního procesu u velkých zařízení). Produkce kondenzátu způsobuje problémy v technologii (zalepování) a fond pracovní doby tak nemůže být srovnatelný se ZEVO.

4.2.3.2 Spalování a energetické využití

Pokud kal obsahuje vhodné množství organických látek a je dostatečně vysušen, je teoreticky schopen hořet sám bez přídavného paliva. To je dle [44] zaručeno vysušením nad 85 % a výhřevností alespoň 10 MJ/kg sušiny. Samotná schopnost hoření ale v praxi nestačí, je třeba pokrýt ztráty a dosáhnout legislativou požadovaných podmínek (dosažení teploty spalin 850 °C a jejich setrvání nad touto teplotou po dobu alespoň 2 s). Většinou výhřevnost kalu není dostatečná a je nutné podpořit proces hoření přídavným palivem. Nejčastěji se používá zemní plyn, případně bioplyn vyprodukovaný při zpracování kalu. [10] O tom, zda se při termickém zpracování komunálního odpadu (kritérium přímo pro kaly neexistuje) jedná o energetické využití (R1) nebo likvidaci spalováním (D10), rozhoduje veličina energetická účinnost R1 [-] [21]. Proces lze prohlásit za energetické využití, pokud vypočítaná hodnota energetické účinnosti pro daný proces a odpad podle vztahu uvedeného v příloze 12 zákona o odpadech [21] dosáhne alespoň 0,65.

Spalovat je teoreticky možné i surový, pouze odvodněný kal – v praxi je ale jeho výhřevnost velice nízká a problém nastává při výpadku či odstávce zařízení termicky zpracovávajícího takový kal, neboť není ani hygienizován, ani stabilizován. Je udáváno [12], že samospalitelnost surového kalu při obsahu 70 % organické sušiny nastává při odvodnění na více než 30 % sušiny. Jedná se však o čistě teoretické hodnoty, neboť takového odvodnění je v praxi dosahováno zřídka.

Ze zkušenosti se spalováním mokré biomasy vyplývá, že minimální výhřevnost nutná pro samostatnou spalitelnost paliva se pohybuje nad úroveň 7 MJ/kg. Právě nízká výhřevnost při vysoké vlhkosti je hlavní příčinou, proč se kal většinou nespaluje samostatně, ale přidává se k jinému kvalitnějšímu palivu nebo tímto palivem je spalování kalu stabilizováno. [12] Čím dokonaleji je kal odvodněn, tím je nižší spotřeba energie na odpaření zbytkové vody. Nejvýhodnější je spalování vysušených kalů, sušení je ale energeticky náročnější než mechanické odvodnění.

Podíl vody, hořlaviny a popeloviny u vybraných vzorků kalu ukazuje tabulka 4.1.

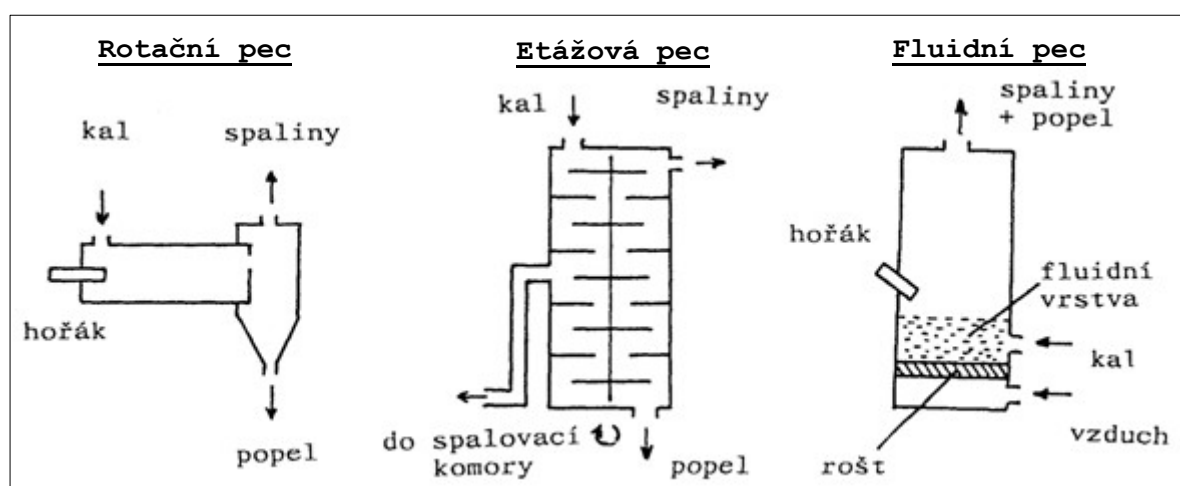
Tabulka 4.1 Palivový rozbor anaerobně stabilizovaného kalu (ASK) z ČOV [45]

Složka [hm. %]	ASK mecha- nicky odvodněný	Sušený kal
W	81,60	10,00
A	6,70	32,77
h	C	6,20
	H	0,96
	S	0,13
	N	0,99
	O	3,40
	Cl	0,02
Sušina [hm. %]	18,40	90,00
Výhřevnost [MJ/kg]	0,62	12,58

W – voda, A – popelovina, h – hořlavina

Jedním z limitujících parametrů při návrhu spalovacího zařízení jsou charakteristické teploty popelovin. Mají vliv na zanášení teplosměnných ploch a může docházet k roztékání popela a mechanickému nedopalu. U kalů jsou tyto teploty vyšší než například u pelet ze sena či slámy, ale nižší než u dřevní štěpky či hnědého uhlí. Nejvíce náchylné na nalepování a zanášení jsou materiály s nízkými charakteristickými teplotami popelovin a menším rozsahem mezi měknutím a tečením. [46] Teplota měknutí popela, který je produktem spalování kalu z Tabulka 4.1, je 1120 °C a teplota tečení je 1300 °C [45].

Samotný proces spalování kalů probíhá nejčastěji ve fluidních, rotačních a etážových pecích (Obrázek 4.4).



Obrázek 4.4 Zařízení pro spalování čistírenských kalů [41]

Rotační pec má podobu válce z ocelového plechu, ve kterém je vsazena vnitřní žáruvzdorná vyzdívka. Tento válec se pomalu otáčí kolem vlastní osy, která je buď pod mírným úhlem nebo vodorovně. Sklonem a rotací je zajištěn průchod a rovnoměrné promíchávání kalu. Doba zdržení materiálu v peci je určena sklonem a otáčkami pece. V čele pece je zasazen hořák,

do jehož blízkosti je dávkován kal. Spalovací teploty dosahují až 1200°C. Rotační pece lze využít ke spalování téměř jakéhokoliv odpadu bez ohledu na druh a složení. [41] [47]

Etážová pec je tvořena válcovou komorou orientovanou na výšku s vodorovnými patry (etážemi). V ose válce je uložena hřídel s rameny zasahujícími do jednotlivých etáží. Ramena s lopatkami napomáhají v průchodu kalu pecí – dochází k postupnému shrnování a přemísťování kalu od vrchních pater směrem dolů. Kal se průchodem etážovou pecí nejprve suší a následně spaluje. Spalovací vzduch a spaliny (vstup, výstup) mohou proudit po směru i proti směru toku kalu. Pro iniciaci a stabilizaci hoření je do horní části pece zasazen plynový hořák. [41]

Moderní velkokapacitní spalovny kalu jsou nejčastěji založeny na principu **fluidního** pískového **lože**, do kterého je přiváděn kal a ten je spolu s pískem udržován ve vznosu horkým spalovacím vzduchem. Ke spalování dochází v celém objemu fluidní vrstvy. Teplota lože se pohybuje mezi 750-950 °C. Pomocným palivem je zemní plyn nebo bioplyn, podle technologických možností čistírnou odpadních vod. Zplodiny spalování odcházejí do druhého stupně, kde dochází za dalšího přírůdku plynu k dohoření při min. 850 °C. Lépe než ostatní metody redukuje síru a oxidy ve spalinách. [41]

Obsah sušiny není v případě fluidní pece příliš zásadní parametr, platí však, jako u ostatních zařízení, že vysoký podíl organických látek a nízký obsah vlhkosti snižují dodatečné energetické nároky systému. Optimálních podmínek je dosahováno při 25 hm.% sušiny odvodněného kalu a při obsahu organických látek v sušině asi 50 hm. %. [43]

Vzhledem k přítomnosti velkého spektra polutantů je třeba dbát u palování kalů na efektivní **čištění spalin**. Emisní limity pro spalovny odpadů jsou přísnější než pro zařízení spalující standardní fosilní paliva. (viz 3.1 nebo [28]).

Některé nebezpečné látky (PCB, dioxiny, ...) lze zneškodnit spalováním za dostatečně vysoké teploty již v peci. Často je na výstupu ze spalovací komory zařazen druhý stupeň spalování, tzv. dohořivací komora, kde dochází k dodatečnému tepelnému zpracování toxických sloučenin, těkavých látek, dohoření uhlíku a dokončení potřebných reakcí. Legislativa vyžaduje, aby spaliny setrvaly v oblasti s teplotou minimálně 850 °C po dobu minimálně 2 sekund, a to za posledním přívodem spalovacího vzduchu [28]. To vede společně se zajištěním dostatečného množství spalovacího vzduchu a s důkladným promísením k úplnému spálení organických látek v palivu (tzv. pravidlo 3T – temperature, time, turbulence). S nedodržením této zásady se pojí zhoršená kvalita spalin (vysoká produkce CO, TOC) a nedopal. [48] [49]

Legislativně je ošetřeno uvolňování následujících látek:

- **CO** (oxid uhelnatý) – vzniká nedokonalou oxidací uhlíku v palivu, místo finálního produktu CO₂ vzniká při nedostatečném přívodu kyslíku meziprodukt CO. Příčinami vzniku jsou nedokonalý přístup O₂ k palivu a nedodržení potřebných teplot pro úplný průběh reakcí. Nedochází tedy k úplnému využití chemicky vázaného tepla v palivu, ale především je se vznikem CO spojen vznik uhlovodíků, které mohou být karcinogenní a jejichž přítomnost ve spalinách se obtížně kontroluje.
- **SO₂** (oxid siřičitý) – síra v palivu během procesu spalování oxiduje na SO₂ (s výjimkou síranové síře, která je ve stabilní oxidované formě a reakci se neúčastní) a následně dochází k nárůstu teploty rosného bodu spalin oproti spalinám neobsahujícím složku SO₂. Kondenzace H₂SO₄ na chladných výhřevných plochách způsobuje korozi. Kromě technologických potíží, které síra může způsobovat, vede spalování sirnatých paliv i ke vzniku kyselých dešťů a zvyšování kyselosti půdy a povrchových vod.

- **NO_x** (oxidy dusíku – NO, NO₂) – existují 3 mechanismy vzniku oxidů dusíku – v nejvyšších teplotách (v první fázi hoření) vznikají tzv. promptní (okamžité), v oblasti teplot nad 1100 °C termické, které vznikají z dusíku obsaženého ve spalovacím vzduchu, a v oblasti nejnižších teplot palivové, které mají původ v hořlavé složce paliva. NO se podílí na úbytku ozonové vrstvy a oxiduje na NO₂. NO₂ způsobuje dýchací potíže, podílí se na vzniku fotochemického smogu a kyselých dešťů
- **TZL** (tuhé znečišťující látky) – emise z paliv obsahujících popeloviny, které se do proudu spalin dostávají úletem, nebo rychle zchlazené hořící částice uhlíku (saze).
- **TOC** (organické látky vyjádřené jako celkový organický uhlík) – zejména uhlovodíky nejrůznějších forem, při výskytu chloru v palivu také polychlorované organické látky (PCDD/F, PAU). Již byla zmíněna provázanost tvorby uhlovodíků a CO, proto u běžně používaných fosilních paliv stačí ve spalinách kontrolovat výskyt CO. Většina PCDD/F je vázaná na tuhé částice, vyčištění spalin od těchto polutantů tudíž roste s mírou odloučení prachových částic.
- **Těžké kovy** – zejména arsen, kadmium, chrom, olovo, mangan, rtuť, nikl, kobalt, vanad a další. Při spalování se koncentrují v tuhém zbytku, který se následně likviduje jako nebezpečný odpad. S prachovými částicemi, které se dostanou do ovzduší, jsou schopny transportu na velké vzdálenosti a problémem je jejich kumulace v životním prostředí (půdách, rostlinách).
- **Halogenvodíky** (HCl, HF) – toxické a rakovinotvorné, do spalin se dostávají zejména spalováním odpadu s obsahem chloru. [47] [48] [49]

Metody zabraňující úniku těchto škodlivin do ovzduší v míře větší, než je legislativou povoleno shrnuje Tabulka 4.2.

Tabulka 4.2 Emise ve spalinách a metody snižování jejich vzniku [48] [49]

Emise	Metoda snižování emise ve spalinách
CO	režim spalování (3T), řízené množství spalovacího vzduchu
SO ₂	absorpce, adsorpce, mokrá (CaSO ₄ , NaOH), polosuchá (Ca(OH) ₂), suchá (NaHCO ₃ , vápno, vápenec, aktivní uhlí) metoda
NO _x	selektivní katalytická redukce (SCR), selektivní nekatalytická redukce (SNCR)
TZL	elektrostatický odlučovač, filtr, cyklon
TOC	3T, SCR, záchyt na TZL, aktivním uhlí
PCDD/F, PAU	3T, SCR, záchyt na TZL, aktivním uhlí
Těžké kovy	záchyt na TZL, aktivním uhlí, absorpce (kyselá činidla)
HCl, HF	absorpce, adsorpce, mokrá (CaSO ₄ , NaOH), polosuchá (Ca(OH) ₂), suchá (NaHCO ₃ , vápno, vápenec, aktivní uhlí) metoda

Zbytkové odpady vznikající ve spalovacích zařízeních: popel, zbytky z čištění spalin (zreagované a nezreagované sorbenty, prach). Existuje pro ně několik variant likvidace, nejjednodušším se zdá být skládkování, v některých případech se ale jedná o nebezpečný odpad (popílek a použité sorbenty zachycené na filtru) a je tedy nutné ho ukládat na skládky k tomu určené. Jsou známy i technologie zakomponování popela do stavebních materiálů, přičemž k vyuhování těžkých kovů nedochází. K tomuto konečnému řešení vede i spoluspalování kalů v cementárnách, kdy díky vysokým teplotám dojde k zneškodnění nežádoucích látek a popel z kalu se stane součástí cementu (viz kap. 4.2.3.3). Další možností, zatím ne příliš rozšířenou, je

materiálové využití vzniklého popela, obsahujícího poměrně velké množství v zemědělství využitelných živin. Zejména metody zpětného získávání fosforu zaznamenávají velkou podporu ze strany EU (viz kap. 4.2.4). Materiálově využívat lze i některé sloučeniny vznikající během čištění spalin (např. sádrovec z odsíření).

4.2.3.3 Spoluspalování

Kal se přidává k primárním palivům či odpadům v takovém množství, aby nebyl negativně ovlivněn proces hoření (kolem 5–10 hm. % primárního paliva). Vysoké teploty při spalování zaručují důkladné vyhoření kalu. K již fungujícím technologiím (elektrárna, teplárna, ZEVO, cementárna) je třeba přistavět systém skladování kalu, dopravníků a dávkování. Vzhledem k rozdílným složkám spalin oproti fosilním palivům, je nutné prověřit dostatečnost systému čištění spalin. [12]

Spoluspalování v cementárnách představuje vedle úspory primárních paliv velkou výhodu v tom, že tuhý zbytek po spalování včetně těžkých kovů zůstane navázán do cementářského slinku a jedná se tedy o bezodpadovou metodu (likvidace malých množství důkladně vysušeného kalu pro zachování dobrých vlastností cementu). [12] [43] Setrváním materiálu v pásmu dostatečně vysokých teplot (nad 1200 °C) dochází v cementářské peci k bezpečnému rozpadu PCB a PCDD/F [50]. Kapacity cementářských pecí jsou však z velké míry naplněny (částečně i tuhými alternativními palivy – viz kapitola 5.3).

4.2.4 Zpětné získávání fosforu z popela

Světové zásoby fosforu, respektive apatitu ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), ze kterého se fosfor pro průmyslová hnojiva běžně získává, se s růstem populace a zvyšujícími se požadavky na produkci potravin zmenšují a dá se předpokládat, že v budoucích letech bude cena fosforečných hnojiv rapidně stoupat. Nedostatek fosforu znamená významný pokles výnosů ze zemědělství. [2]. Veškeré zásoby těžitelného fosforu jsou mimo Evropu. Evropská komise v roce 2014 zařadila fosfor na seznam kritických surovin a vyzvala k větší snaze o využívání sekundárních zdrojů fosforu – jedním z nich jsou čistírenské kaly (vedle živočišných odpadů z masného průmyslu, odpadů z potravinářského průmyslu, odpadních vod). [42]

Celkový fosfor vyskytující se ve vodách představuje rozpuštěný a nerozpuštěný fosfor, který se dále dělí na organicky a anorganicky vázaný fosfor. Do odpadních vod se dostává z pracích prostředků (soli fosforečných kyselin), z živočišných odpadů (organicky vázaný fosfor), splachem a erozí zemědělských půd (fosfor v hnojivech). V čistíreně odpadních vod se fosfor spotřebovává pro růst organismů v biomase při biologickém čištění (dochází k odstranění max. 20-30 %). Ve většině případů (pro splnění legislativních limitů na odtoku z ČOV) je vyžadováno záměrné odstraňování fosforu, které lze provést chemickými (srážení solemi hliníku a železa nebo vápnem – odstranění i více než 90 % obsaženého fosforu v závislosti na místě srážení), nebo biologickými (zvýšená akumulace fosforu bakteriemi při střídání anaerobních a aerobních podmínek) metodami. [4] [6]

Fosfor je možné získávat z odvodněného kalu, kalové vody nebo z popela po termickém zpracování kalu. Metod pro získávání fosforu z anaerobně stabilizovaného kalu je mnoho i v průmyslovém provedení (např. FIX-Phos metoda). Nejvyšší míry regenerace fosforu však lze dosáhnout při získávání z popela [51]. S ohledem na charakter práce jsou níže rozvedeny pouze tyto metody.

Během termického zpracování přechází většina fosforu z kalu do popela. Popel kromě fosforu navíc obsahuje i těžké kovy, které při překročení limitů znemožňují použití popela jako hnojivo. V současné době jsou vyvíjeny metody, kterými by bylo možné snížit obsah těžkých kovů v popelu při současném zvýšení biodostupnosti fosforu, která je v neupraveném popelu

velmi nízká (fosfor je obsažen ve velké míře ve sloučeninách s železem a hliníkem, které se vytvořily během srážení v terciárním stupni čištění odpadní vody). Dělí se na hydrometalurgické a pyrometalurgické.

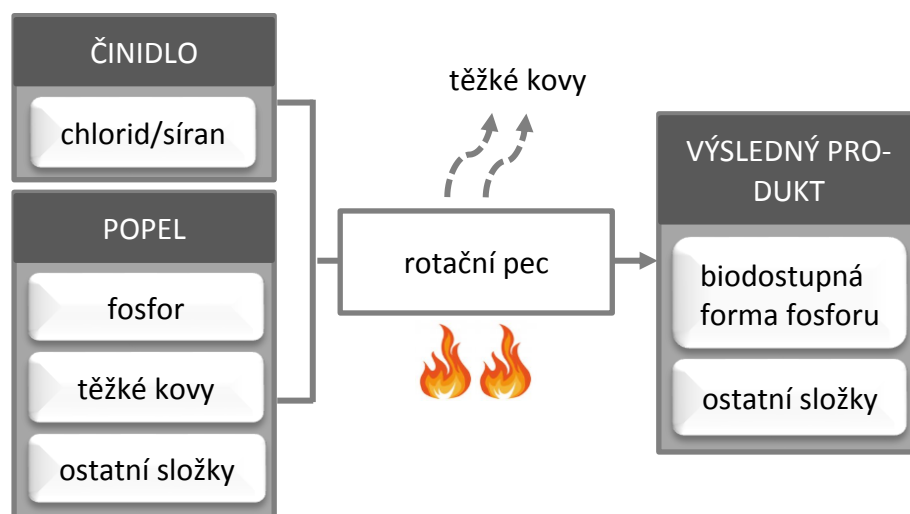
Hydrometalurgické získávají fosfor z popela pomocí loužení silnou zásadou nebo účinněji kyselinou, kdy dochází k rozpouštění fosforu a těžkých kovů do roztoku. Těžké kovy je následně nutné z roztoku odstranit. Rozpustnost závisí na typu činidla použitého ke srážení fosforu při procesu čištění odpadních vod, na složení popela a použité kyselině. Je možno získat až 99 % celkového fosforu z popela. (např. technologie LEACHPHOS, ECOPHOS, TetraPhos). Některé z těchto metod jsou již plně komerčně využívány. [52] [51]

Pyrometalurgické metody jsou založeny na ohřevu popela na vysokou teplotu (okolo 1000 °C), kdy dojde k odpaření těkavých těžkých kovů (např. Cd, Hg, Pb, Zn). U méně těkavých kovů (např. Fe, Cu, Cr, Ni) záleží na tom, přesáhne-li pracovní teplota jejich bod tavení. V kladném případě se teplota pohybuje mezi 1300–2000 °C a popel se rozdělí na kovovou taveninu a pevný minerální zbytek s obsahem P (MEPHREC, RecoPhos, Kubota). V opačném případě je teplota nižší a tyto kovy zůstanou spolu s P v popelu.

Zástupcem druhé skupiny metod je AshDec/Outotec (schéma metody na **Obrázek 4.5**), při němž se popel mísí v rotační peci s činidlem na bázi chloru (CaCl_2 , MgCl_2) při teplotách 1000–1100 °C. Těžké kovy reagují s chlorem za vzniku chloridů těžkých kovů, přičemž některé z nich vykazují nízké teploty varu a během procesu odtěkají, a současně dojde ke zvýšení biodostupnosti fosforu v konečném produktu (např. přeměnou fosforečnanů na dostupnější formu – chlorapatit). Metoda není dostatečná pro odstranění Ni a Cr. Obsah fosforu ve výsledném produktu vyjádřeného jako P_2O_5 přesahuje 10 hm. %. [51] Fosfor se běžně získává z apatitu, ve kterém se vyskytuje 25–37 % P_2O_5 [53].

Alternativním činidlem přidávaným do rotační pece je Na_2SO_4 . Fosforečnany v popelu reagují s činidlem za vzniku biodostupného zdroje fosforu NaCaPO_4 . Teploty v peci dosahují 900–950 °C. Obsah fosforu v konečném produktu je vyšší (15–20 hm. % P_2O_5) a touto metodou je dosahováno lepší biodostupnosti fosforu. Odstranění těžkých kovů je méně účinné než při použití chloridů, ale odpadá nežádoucí vliv chloru na korozi zařízení. [51]

Míru odstranění těžkých kovů a zvýšení biodostupnosti v závislosti na použitém činidle zachycuje Tabulka 4.3.



Obrázek 4.5 Schéma metody Ashdec [51]

Tabulka 4.3 Srovnání činidel použitých při metodě AshDec/Outotec [51]

použité činidlo	chlorid vápenatý/hořečnatý CaCl ₂ , MgCl ₂	síran sodný Na ₂ SO ₄		
teplota v rotační peci	1000–1100 °C	900–950 °C		
výsledný obsah P vyjádřeného jako P ₂ O ₅ v popelu	>10 hm. %	15–20 hm. %		
biodostupnost P	nižší	vyšší		
účinnost odstranění těžkých kovů	Cd, Pb, Zn, Cu	90 hm. %	Cd	80 hm. %
		>70 hm. %	Pb	40 hm. %
			Zn	9 hm. %
		Mo, Sn	>70 hm. %	As
	Hg			70 hm. %
			Tl	66 hm. %

Ekonomická náročnost metod pro získávání fosforu z popela [52] zatím neumožnila jejich použití v komerční sféře, jedná se pouze o laboratorní, případně poloprovozní testování.

V Německu je zavedena povinnost získávání fosforu z kalu, jehož sušina obsahuje alespoň 2 % P, a to buď přímo z kalu (s minimální výtěžností 50 %), nebo z popela (alespoň 80 %) získaného monospalováním kalu). Povoleno je také popel skladovat pro budoucí využití. Podobná povinnost se zavádí i v Rakousku. [3]

Opětovný ohřev popela je velice nákladný proces a pro získání ekonomicky zajímavého produktu musí být realizován ve velkém měřítku.

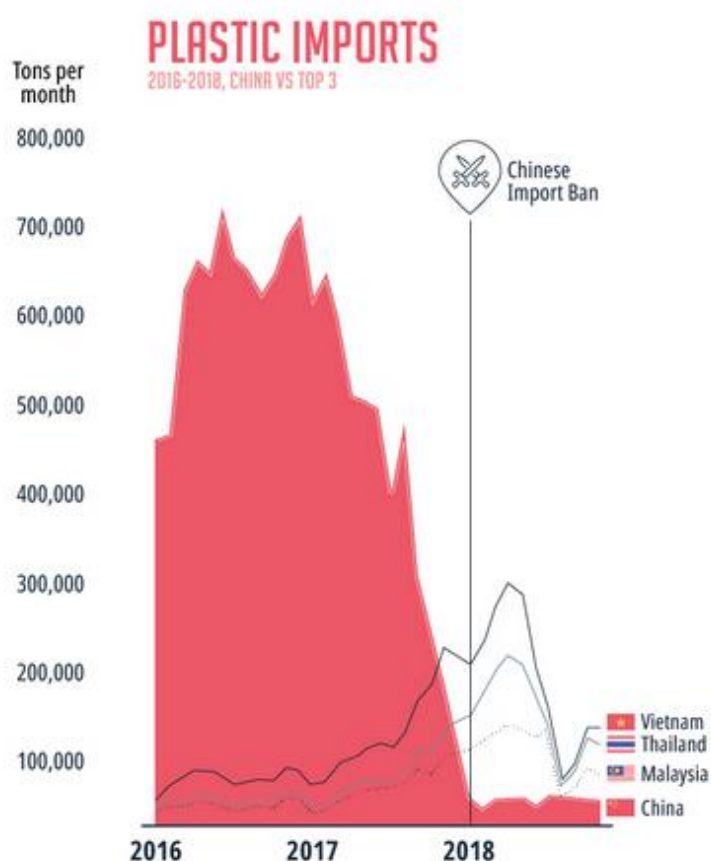
Pokud se ČR inspiruje legislativními změnami sousedních zemí, měla by využít stávající situace v oblasti nakládání s kaly – oproti Německu u nás zatím není vytvořena síť sušáren a spaloven kalu a je tedy možné v zaváděné technologii již od začátku počítat se zpětným získáváním fosforu a pokusit se využít propojení energií k celkovému snížení nákladů.

Možným řešením v Německu je pouze úprava stávající technologie nebo přídavné zařízení na termické zpracování popela s dávkováním činidel. Obě tyto varianty natolik zvyšují náklady, že cena takto získaného fosforu není v současnosti konkurenceschopná a Německo zatím přistoupilo k ukládání popela na dobu, kdy cena primárních zdrojů dostatečně vzroste.

5 MOŽNOSTI NAKLÁDÁNÍ S PLASTOVÝM ODPADEM

S rostoucím využíváním plastů roste i množství produkovaného plastového odpadu. Během poslední doby dosáhlo znečištění plastovým odpadem kritické hranice a začaly se výrazně projevovat dopady na životní prostředí. V reakci na celosvětovou odpadovou krizi mnoho států přistoupilo k vytvoření nových strategií pro snížení množství odpadů. Takovým krokem byl i přechod EU k oběhovému hospodářství. Prioritou posledních let je snížení spotřeby plastů, zákaz jednorázových plastových výrobků, upřednostnění recyklovatelných nebo znovupoužitelných obalů, přetvoření plastového odpadu na nové suroviny, zákaz ničení neprodaného zboží, prodloužení životnosti výrobků a tím snížení závislosti na dovozu primárních surovin. Oběh mají opouštět opravdu jen produkty, které není možné dále materiálově využít.

Spousta států se dlouhodobě spoléhala na export odpadu do zahraničí, což se ale v roce 2018 změnilo, když Čína – nejdůležitější spotřebitel a zpracovatel plastového odpadu – rozhodla, že dovážený odpad již přijímat nebude (viz Obrázek 5.1). Následkem byl 49% pokles vývozu odpadu mezi roky 2016 a 2018. Roli Číny převzaly v následujících letech jihoasijské a východoasijské státy (např. Malajsie, Thajsko, Vietnam) a to i přesto, že jsou stěží schopny zvládat svůj vlastní odpad. K recyklaci zde dochází jen v omezené míře a odpady se zpravidla skládkují nebo spalují. Zákazy dovozu odpadu po vzoru Číny mohou velmi rychle následovat i v těchto zemích. [54] [55]



Obrázek 5.1 Pokles množství přijímaného odpadu po roce 2018 [55]

Země se proto musí soustředit v první řadě na snížení toků odpadů obecně a pokud již odpad vznikne, zpracovávat ho pokud možno přímo na svém území. Doporučovanými způsoby jsou rozvoj recyklačních systémů (nejen třídění, ale i skutečná recyklace), rozvoj trhu s druhotnými a recyklovanými materiály a jeho podpora a obecně zacházení s odpadem jako se zdrojem,

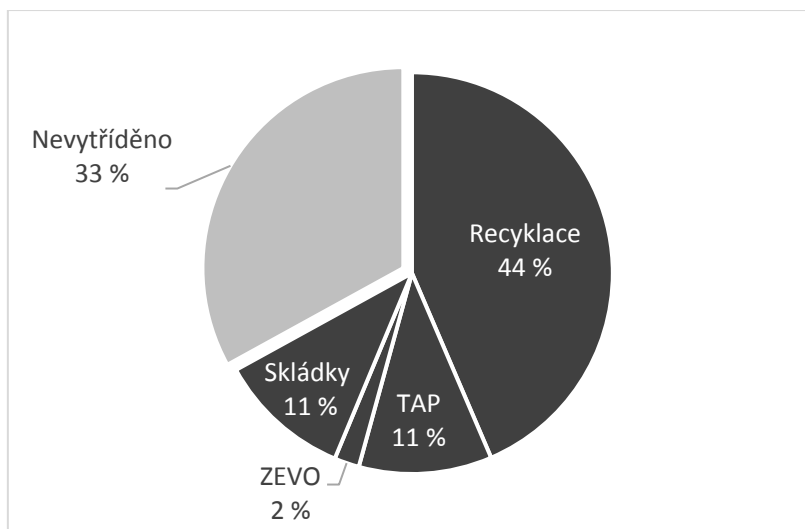
tedy v případě, že není možné odpad zpracovat materiálově, využít alespoň jeho energetický obsah.

Závazky EU ohledně odpadových strategií jsou postupně zaváděny do legislativ jednotlivých členských států, v ČR budou pravděpodobně ve velké míře zahrnuty do projednávaného nového zákona o odpadech. [22]

Pro naplňování evropských cílů odpadového hospodářství je důležité zaměřit se na používání odpadů jako zdrojů. Plastové výrobky a obaly mají v momentě, kdy se jich chceme zbavit, stále dostatečně vysokou ekonomickou hodnotu. Lze je recyklovat na původní materiál a nové produkty nebo, pokud recyklace není možná nebo výhodná, lze využít jejich energetický obsah a nahradit jimi fosilní paliva.

5.1 Sběr a třídění

Důležitým krokem před recyklací je získání kvalitního materiálu pomocí odděleného sběru, tedy zamezení úniku hodnotného materiálu do smíšeného komunálního odpadu, a následného dotřídění. Množství shromážděného odpadu a kvalita jeho vyřídění hraje velkou roli při dosažení vysoké míry recyklace. Třídění využitelných složek komunálního odpadu se stalo součástí běžného života všech, dostupnost třídících nádob je vysoká, dnes již i v malých obcích, v organizacích, v domácnostech. ČR dosahuje dlouhodobě uspokojivých výsledků v množství tříděného odpadu. Patří spolu se Španělskem a Belgií k zemím, které třídí více než polovinu plastových obalů. Česko tak již předčasně splnilo závazek recyklovat 50 % tohoto odpadu do roku 2025 [56] (Obrázek 5.2).

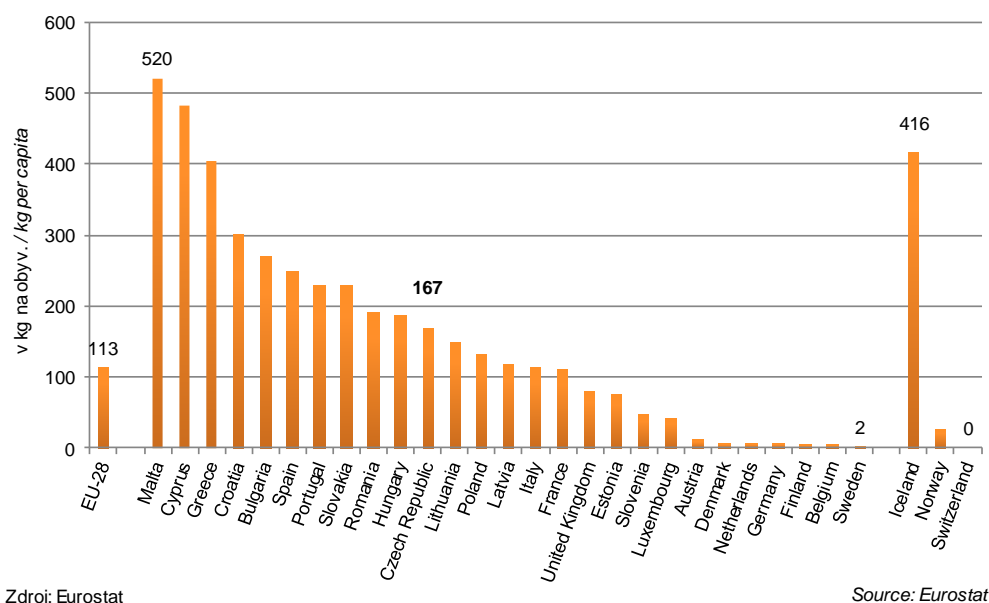


Obrázek 5.2 Míra třídění a využití tříděných plastových obalů v ČR (2018) [57]

V domácnostech se však již třídění blíží limitu. Systém třídění je velice investičně i provozně nákladný a bez financování ze strany výrobců obalů by byl pro obce neproveditelný (velké množství sběrných nádob, jejich údržba a svoz). V případě plastů pak rostou náklady za dopravu v souvislosti s jeho nízkou hmotností.

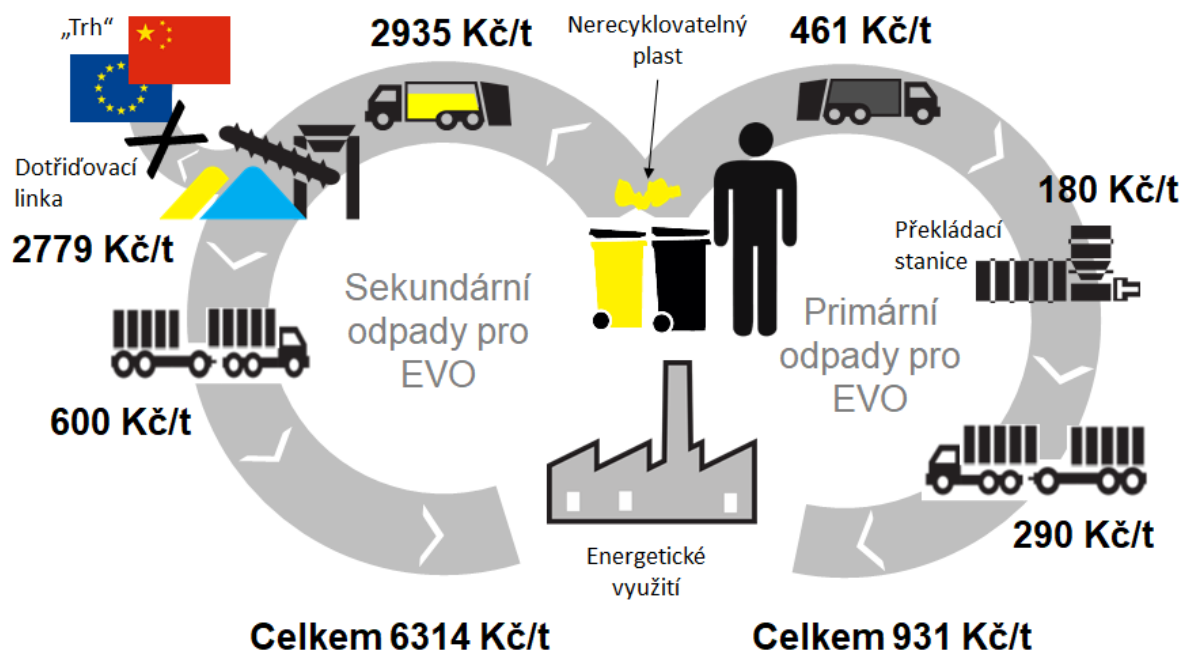
Dalšího zlepšení míry třídění využitelných složek se bude pravděpodobně dosahovat pomocí méně nákladného strojního dotřídění SKO [58]. Plastová frakce z dotřídění komunálního odpadu je často nerecyklovatelná (je znečištěná nebo nelze získat pouze tímto způsobem dostatečné množství pro ekonomicky výhodnou recyklaci). Oddělovat výhřevné složky komunálního odpadu se ale vyplatí z důvodu energetického využití, které je EU podporováno a je dalším prostředkem k dosažení evropských cílů. Hlavní motivací pro výstavbu nových ZEVO je blížící

se zákaz skládkování výhřevných odpadů. V ČR je množství skládkovaného odpadu stále vyšší než evropský průměr (viz **Obrázek 5.3**). V roce 2017 se skládkovalo 167 kg na obyvatele [59].



Obrázek 5.3 Skládkování komunálních odpadů v Evropě (2017) [59]

Na třídících linkách zpracovávajících směsný plastový odpad ze žlutých kontejnerů se separují materiálově využitelné složky podle druhů a barev, odstraňují se nežádoucí příměsi. Balíky jednodruhového odpadu jsou odebírány recyklačními společnostmi, zbytkový odpad je předáván k dalšímu zpracování – může být využit k výrobě tuhého alternativního paliva, termicky zpracován nebo skládkován. Průchod nerecyklovatelného plastového odpadu systémem třídění je nákladnější než jeho přímý odvoz do ZEVO [60] (**Obrázek 5.4**). V svozovém i třídícím systému zabírá místo recyklovatelným složkám, ze kterých plynou příjmy od zpracovatelů recyklátu.



Obrázek 5.4 Dvě možné cesty nerecyklovatelného plastového odpadu [60]

5.2 Recyklace

Recyklace většinou spočívá v drcení, následném tavení a znovuvyužití k výrobě stejných nebo jiných výrobků. Recyklovat se vyplatí zejména velké objemy určitých složek plastového odpadu – záleží vždy na momentální poptávce recyklačních společností a zpracovatelů. Při **materiálové recyklaci** se nejčastěji jedná o:

- **PET²** – PET flakes se přidávají k primárnímu materiálu při výrobě nových PET lahví a dalších výrobků (např. pásky pro svazování a balení ve svitavské firmě SVITAP), výroba polyesterových vláken (textilní průmysl, automobilový průmysl, stavebnictví),
- **LDPE³** – regranulace nebo tepelné zpracování a opětovné použití při výrobě fólií,
- **HDPE, PS a PP⁴** duté obaly – drcení a opětovné použití při výrobě podobných výrobků,
- **EPS⁵** – ze znečištěného pěnového polystyrenu lze vyrábět odlehčený beton, izolační omítky, zásypy, používá se na výrobu pálených cihel s lepšími izolačními vlastnostmi.

V ČR je podle POH [33] provozováno 116 dotříd'ovacích linek, cca 50 zpracovatelů jednodruhových plastů a cca 5 zpracovatelů směsných plastů (údaj k roku 2014).

Existují technologie na zpracování směsných plastových odpadů, včetně znečištěných – bez dotříd'ování je tak materiálově využít i odpad, který by se za normálních okolností likvidoval spalováním nebo na skládce (např. systém Remat od finské firmy Wimao nebo Transform Lázně Bohdaneč).

Plasty je možné recyklovat také chemicky na výstupní surovinu (**surovinová recyklace**), a to hlavně v případech, kdy není materiálová recyklace možná – u kompozitních plastů, směsných nebo kontaminovaných plastových odpadů. Například jednotka OMV ReOil vyvinutá vídeňskou rafinerií Schwechat zpracovává krakováním (štěpením dlouhých a středních uhlovodíkových řetězců na jednodušší) odpadní plasty zpět na ropu, která je dále zpracovávána v rafinerii na palivo nebo suroviny pro opětovnou výrobu plastu. Kromě depolymerace se mezi způsoby surovinové recyklace řadí i zplyňování a pyrolýza (přeměna plastu na syntetický plyn nebo kapalné produkty). Výsledné produkty nahrazují primární paliva nebo mohou být použity jako redukční činidlo při výrobě železa. [61] [62]

Recyklace je obecně velice finančně nákladná a příliš se neliší od samotné výroby. Při recyklaci musí být v rovnováze množství vložené práce, spotřeba energie a kvalita výstupu. Všechny tyto aspekty spolu s náklady na dopravu se promítají do ekonomické bilance procesu. Vzhledem k tomu, že recyklace je výhodná až při velkých objemech, je obtížné recyklaci realizovat v malém (regionálním) měřítku. Doprava plastového odpadu je problematická z důvodu nízké hmotnosti (i po slisování) a pojí se s ní přetížení dopravních tras. Rentabilitu recyklace ovlivňuje i cena ropy a legislativní podpora využívání recyklátů oproti primárním surovinám.

5.3 Energetické využití

Recyklační možnosti jsou limitovány mnoha faktory jako množství shromážděného odpadu, jeho kvalita a čistota, poptávka zpracovatelů nebo dostupnost technologií pro recyklaci. Recyklace za každou cenu není výhodná ekonomicky ani environmentálně a toky odpadů neodpovídající požadavkům recyklačních společností je vhodné využívat alespoň energeticky. EU sice odmítá dále dotovat výstavbu nových spaloven odpadu (prioritou je v souladu s oběhovým hospodářstvím třídění, úprava a recyklace), ale prostor pro energetické využití vysoce

² polyetylentereftalát

³ polyetylen s nízkou hustotou

⁴ polyetylen s vysokou hustotou, polystyren, polypropylen

⁵ pěnový polystyren

výchřevných složek jinak nevyužitelných odpadů zatím poskytuje. V některých zemích se však objevuje vedle poplatku za skládkování i poplatek za spalování [63] [64], a to za účelem zlepšení cenové konkurenceschopnosti recyklace. Z hlediska návrhu zařízení k energetickému využití plastového odpadu je tedy bezpečné počítat pouze s takovými toky odpadu, které opravdu není možné využít jinak.

Spalováním plastového odpadu vzniká celá řada nebezpečných látek a je nezbytné čistit spaliny stejně jako u spalování čistírenských kalů. (viz kap. 4.2.3) Plast může být problematický zejména kvůli obsahu chloru, rizikové druhy se proto při třídění odstraňují (PVC).

Odpad vhodný k energetickému využití ve spalovacím zařízení lze upravit do formy tzv. **tuhého alternativního paliva (TAP)**. Jedná se zejména o materiál vystupující z technologie mechanicko-biologické úpravy odpadu.

Výroba tuhých alternativních paliv je řešením nejen pro nerecyklovatelný plastový odpad, ale i pro textil a další výchřevné složky komunálního nebo průmyslového odpadu. Po vytrídění kovu z přivezeného odpadu se na linkách vyrábějících TAP materiál drtí, separuje a podle požadavku zákazníka lisuje.

Pro případnou výrobu TAP je důležitý původ materiálu a jeho parametry jako výchřevnost a obsah nežádoucích látek – především se sleduje Hg a Cl. Z konkrétních vlastností vyplývá vhodnost jejich využití v daném spalovacím zařízení. Klasifikace TAP dle normy ČSN EN 15359 je uvedena v **Tabulka 5.1**. Tato klasifikace zajišťuje stálé vlastnosti spalovaného materiálu na rozdíl od spalování SKO, jehož složení a výchřevnost jsou silně závislé na lokalitě (liší se dle dosahovaného poměru odděleného sběru v dané lokalitě, případně charakteru zastavby nebo systému vytápění) a v rámci jednoho území se mohou měnit s časem.

Tabulka 5.1 Klasifikace TAP podle normy ČSN EN 15359

Parametr	Statistická míra	Třída				
		1	2	3	4	5
Výchřevnost [MJ/kg]	průměrná hodnota	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Chlor [% hm. v sušině]	průměrná hodnota	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3,0
Rtuť [mg/MJ]	medián	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50
	80. percentil	≤ 0,04	≤ 0,06	≤ 0,16	≤ 0,30	≤ 1,00

I po odstranění PVC je obsah chloru v SKO stále vysoký. Zdrojem Hg jsou zejména baterie, které je snadné oddělit pomocí gravitačních separátorů. Dalšími parametry, které už nejsou klasifikovány, ale zpracovatel na ně může mít zvláštní požadavky, jsou velikost částic, obsah vlhkosti a popelovin a obsah dalších těžkých kovů.

Se **spoluspalováním** je uvažováno zejména ve fluidních kotlích elektráren a tepláren, cementárnách, v případě potřeby zvýšení výchřevnosti i v klasických ZEVO spalujících SKO. Nevýhodou spoluspalování oproti monospalovnám je nutnost úprav stávajících zařízení (dávkování, zvýšené nároky na čištění spalin). Při spoluspalování hrozí vznik nánosů na teplosměnných plochách kotle v důsledku změny vlastností popela, nedokonalé spalování, změna složení spalin, emise HCl a zvýšení rizika vysokoteplotní (chlorové) koroze. [65]

Tato rizika jsou hlavním důvodem, proč je využití TAP z odpadu v teplárnách a elektrárnách omezeno pouze na 10 % z celkového množství použitého paliva.

Nejvýhodnějším se jeví spalování TAP v cementárnách. Kapacita těchto zařízení je však již z velké části pokryta, neboť spalování alternativních paliv v cementárnách je již běžnou praxí. Dle analýzy [65] z roku 2015 cementárny a vápenky využívaly cca 580 kt ročně z celkové potenciální kapacity těchto zařízení cca 810 kt ročně.

Předpokládané nahrazení 10 % primárního paliva ve fluidních kotlích v ČR představuje dle analýzy potenciální využití 453 kt TAP ročně (výhřevnost 17 MJ/kg). Při výtěžnosti 30 % lze z SKO získat celkem cca 687 kt ročně (rok 2012).

Výhody a nevýhody spalování TAP v jednotlivých zařízeních shrnuje **Tabulka 5.2**.

Tabulka 5.2 Vhodnost využití TAP ve spalovacích zařízeních [65]

	+	-
Monospalovna	- oproti ZEVO navržené na vyšší výhřevnost	- vysoká počáteční investice
ZEVO	- možnost zvýšení výhřevnosti přidáním TAP k SKO	- omezený podíl využití kvůli vysoké výhřevnosti (snižování kapacity zařízení) - TAP nakupuji (za zpracovaný SKO peníze dostávám)
Fluidní kotel	- možnost částečného nahrazení fosilních paliv	- nutnost úpravy zařízení (dávkování, čištění spalin – dioxiny, rtuť) - omezený podíl využití (většinou 10 %) - zvýšení rizika vysokoteplotní koroze v zařízení
Cementárna	- účinná destrukce organických složek při vysokých teplotách - snížení kyselých emisí v zásaditém prostředí - zakomponování těžkých kovů do konečného produktu	- omezená kapacita

Bez výrazného zvýšení skládkovacího poplatku se spoluspalování TAP vyplatí pouze při záporné (dotované) ceně tohoto paliva [65].

6 TECHNOLOGIE ODDĚLENÉHO ZPRACOVÁNÍ

Zadavatelem tématu této diplomové práce je společnost EVECŮ Brno, která se zabývá především návrhy spalovacích zařízení a systémů čištění spalin, přičemž se podílí i na výzkumu v této oblasti. V posledních letech vyvinula jednotku pro zpracování zbytkového plastového odpadu se snahou o decentralizaci spalování odpadů a umožnění zpracovávat tento odpad přímo v místě jeho vzniku.

Jedním z dalších vyvíjených zařízení je jednotka tepelně zpracovávající čistírenské kaly. Hlavní motivací při návrhu byla absence zařízení tohoto typu v ČR a také legislativní změny z posledních let, jejichž důsledkem dochází nebo bude docházet k omezení přímé aplikace kalů z ČOV na zemědělské půdy za účelem hnojení. Tento způsob byl dosud nejčastějším finálním zpracováním čistírenského kalu v ČR [5]. Velký potenciál zmíněného zařízení spočívá v možnosti zpětného získávání fosforu z kalu – popel tedy bude stále možné použít v zemědělství a živiny obsažené v kalu nepřijdou vniveč. Zároveň je procesem zajištěno snížení obsahu těžkých kovů a úplná hygienizace.

Úkolem kapitoly je představit tyto oddělené technologie. Navazujícím bodem práce (kap. 7) je zamyšlení se nad jejich vhodným propojením a konkrétními přínosy pro producenty nebo zpracovatele příslušných odpadů.

6.1 Jednotka pro termické zpracování kalů z ČOV s možností zpětného získávání fosforu z popela

Spalování kalů v ČR není zatím rozšířeno, ale po vydání vyhlášky 437/2016 Sb. směřují především velké ČOV k postupné výstavbě zařízení na sušení kalů [39]. Vysušený kal z ČOV má relativně příznivé vlastnosti pro spalování a v kombinaci se zpětným získáváním fosforu z popela, což je z hlediska současných strategií EU podporováno, se může jednat o výhodný způsob nakládání s kalem, který nespĺňuje požadované limity na obsah těžkých kovů a dalšího znečištění.

Sušení a následné spalování s využitím regenerace fosforu představuje vedle významné redukce množství i možnost získávání hnojivého přípravku pro použití v zemědělství s významným podílem živin. Oproti samotné likvidaci kalu spalováním se o tyto živiny nepřichází a odpadá potřeba skládkování vzniklého popela.

Popisovaná jednotka, vyvíjená ve spolupráci EVECŮ Brno a CHEVAK Cheb, v sobě integruje vše zmíněné, tedy sušení, termické využití a dávkování aditiva umožňujícího využít výsledný popel k hnojení. Motivací je dosud chybějící řešení pro efektivní využití kontaminovaných kalů. Realizace jednotky zatím neproběhla, řešení je ve stadiu návrhu.

Kapacita jednotky je stanovena z produkce kalu v ČOV Cheb. Reálná kapacita ČOV je 33 296 EO (vystavěná 65 000 EO), čemuž odpovídá produkce 5,4 kt kalu ročně.

6.1.1 Popis zamýšlené technologie

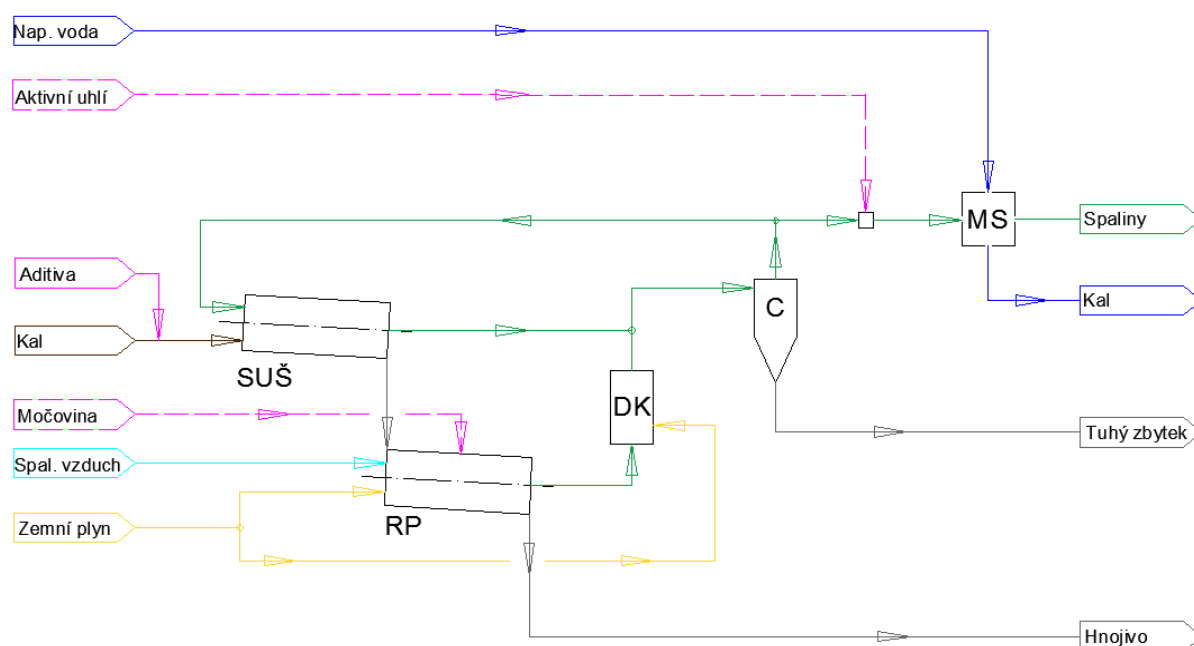
Navržená technologie navazuje na výstup z ČOV skladem odvodněného kalu, odkud je kal o obsahu sušiny cca 20 hm. % dopravován do rotační bubnové sušárny s kapacitou 850 kg/hod. Po dosažení vhodného obsahu sušiny (čím vyšší obsah sušiny a s tím spojená výhřevnost, tím stabilnější proces hoření) se dávkuje do rotační pece a je spalován. K vysušení materiálu je využita energie vzniklá spálením vysušeného kalu – teplo obsažené ve spalinách. Spaliny jsou zaváděny do sušárny, přicházejí přímo do kontaktu s kalem a při průchodu sušárnou do sebe pohlcují odpařenou vlhkost. Otáčením bubnu sušárny s vestavbami dochází k důkladnému promíchávání kalu a rovnoměrnému sušení. Do čela sušárny je zaveden plynový hořák pro případ, že tepelný obsah spalin není dostatečný, v ideálním případě však slouží pouze při náběhu.

Vysušený kal je dávkován do rotační pece (asi 160 kg/h) a za současného přivádění spalovacího vzduchu je spalován. Zdržná doba kalu v peci je dána otáčkami a sklonem pece. Proces hoření je stabilizován plynovým hořákem v čele rotační pece. Popel je na konci spalovací komory odváděn a je s ním dále nakládáno.

Spaliny odcházejí do druhého stupně spalování – dohořivací komory, kde setrvávají nad legislativou požadovaným minimem 850 °C alespoň 2 s. Za dohořivací komorou je proud smíchaný s výstupním proudem ze sušárny, dochází k jeho ochlazení a prochází multicykloňem za účelem odloučení hrubých prachových částic (popílku ze spalovací pece, případně unesených částic kalu ze sušárny). Předpokládá se, že na prachových částicích obsažených ve spalinách vystupujících z dohořivací komory dochází k adsorpci těžkých kovů odtěkaných v prostoru spalovací pece. Prach z multicykloňu je proto odváděn k pozdější likvidaci na skládce nebezpečného odpadu. Nedochází tak k vnosu těžkých kovů zpět do kalu při následném zavedení spalin do sušárny.

Za multicykloňem se z proudu spalin odděluje část sloužící k vysušení kalu a je přiváděna do prostoru sušárny. Zbytek spalin pokračuje do systému čištění, který je realizován dvou-
stupňovou mokrou pračkou spalin, ve které pomocí kyselého a zásaditého roztoku dochází k odstranění kyselých složek spalin. Z důvodu předpokládaného umístění spalovací jednotky přímo v areálu ČOV se jeví mokrá pračka jako vhodná metoda, neboť je zde zajištěno čištění vzniklé odpadní vody (lze ji zavést do technologie ČOV). V systému čištění spalin se také uvažuje o použití injektáže aktivního uhlí pro dodatečné zachycení těžkých kovů a PCDD/F, v případě vysokého obsahu NO_x se bude do spalin v teplotním okně 850–950 °C vstříkovat močovina (SNCR). Dostatečnost těchto metod je prověřována.

Hlavní proudy a aparáty spalovací jednotky zachycuje Obrázek 6.1 Zjednodušené schéma jednotky na termické zpracování kalu; SUŠ – sušárna, RP – rotační pec, DK – dohořivací komora, C – .



Obrázek 6.1 Zjednodušené schéma jednotky na termické zpracování kalu; SUŠ – sušárna, RP – rotační pec, DK – dohořivací komora, C – cyklon, MS – mokrá sorpce

Navrhovaná technologická koncepce se vedle energetického využití kalu zaměřuje i na regeneraci fosforu z popela. Tuhý zbytek po spalování obsahuje až 90 obj. % fosforu původně obsaženého v odpadní vodě. Omezujícím parametrem využití tohoto produktu je nízká biodostupnost fosforu a vysoké koncentrace těžkých kovů. Fosfor je obsažen v nerozpustné formě, nejčastěji v podobě fosforečnanů hliníku a železa, a musí se pomocí vhodných činidel a zvýšené teploty (termického zpracování) převést na biodostupnou formu, pokud má být využitelný na zemědělských půdách nebo jako součást minerálních hnojiv. Zvolená činidla zároveň podpoří vytěkání těžkých kovů, které se v určité míře zachytí (adsorpce) na povrchu prachových částic. V multicyklonu dojde k odloučení těchto částic a obsah těžkých kovů ve výsledném popelu nepřesáhne stanovené limity.

Jak bylo řečeno výše, zařízení je v době psaní této práce ve fázi vývoje. Naplánovány jsou experimenty, které mají pomoci určit vhodná činidla, optimální místo jejich dávkování a reakční teploty. Činidla je možné dávkovat již do prostoru před sušárnou – do zásobníku odvodněného kalu. V sušárně dojde k jejich promísení s kalem a společně pokračují do spalovací komory.

Pro ověření účinnosti navržené technologie je také nutné provést analýzu zachytu těžkých kovů na prachových částicích odváděných z multicyklonu, posoudit vhodnost použití tohoto zařízení a zároveň určit zbytkovou koncentraci těchto kontaminantů v popelu. Posuzována bude také dosahovaná biodostupnost fosforu. Na základě výsledků analýz a experimentů bude odvozeno konečné řešení a zrealizována prototypová jednotka.

6.2 Jednotka pro energetické využití materiálově nevyužitelného plastového odpadu

Třídění plastových odpadů je v současné době dobře zvládnuto, obce běžně plastové odpady třídí, ale poměrně velká část z nich není vhodná pro další zpracování a končí na skládkách. Protože skládkování takového odpadu se neslučuje s plánovaným omezením likvidace výhřevných odpadů (viz kap. 3.1), představují malá spalovací zařízení výhodnou alternativu k velkým spalovnám odpadu, neboť umožňují zpracování odpadu přímo v místě jeho vzniku a ušetření nákladů na jeho přepravu. Vyprodukovanou energii je možné využít v blízkém okolí zařízení, ať už v podobě technologické páry, transformací na elektrickou energii nebo v systému CZT.

Kompaktní řešení představuje modulární jednotka zpracovávající materiálově nevyužitelné plastové odpady vyvinutá a provozovaná společností EVECO Brno. Jednotku tvoří soubor zařízení umístěných v na míru upravených kontejnerech. Toto řešení podstatně urychluje její výstavbu a umožňuje umístit jednotku na relativně malou plochu – např. ve stávajícím průmyslovém areálu.

Zařízení je instalováno v areálu společnosti C-Energy v Plané nad Lužnicí. Zpracovává jak zbytkový odpad z třídících linek, tak odpad z průmyslové výroby. Kritéria pro příjem jsou především obsah chloru pod 1 % a výhřevnost okolo 25 MJ/kg. Zpracovatelská kapacita je 2400 t ročně (7200 h/r) a je dána především rozměry spalovacího zařízení, které se musí vejít do normalizovaného kontejneru. Zbytkový odpad z třídění dané oblasti zajišťuje celoroční kontinuální provoz. Jednotka dosahuje maximálního tepelného výkonu 1,8 MW, vyrábí 2,9 t/hod páry o tlaku 6–7 bar a teplotě 165 °C (stanoveno z potřeby C-Energy). Zdroj částečně nahrazuje tepelný výkon uhelné elektrárny a společnost C-Energy Planá zajišťuje trvalý odběr veškerého vyrobeného tepla.

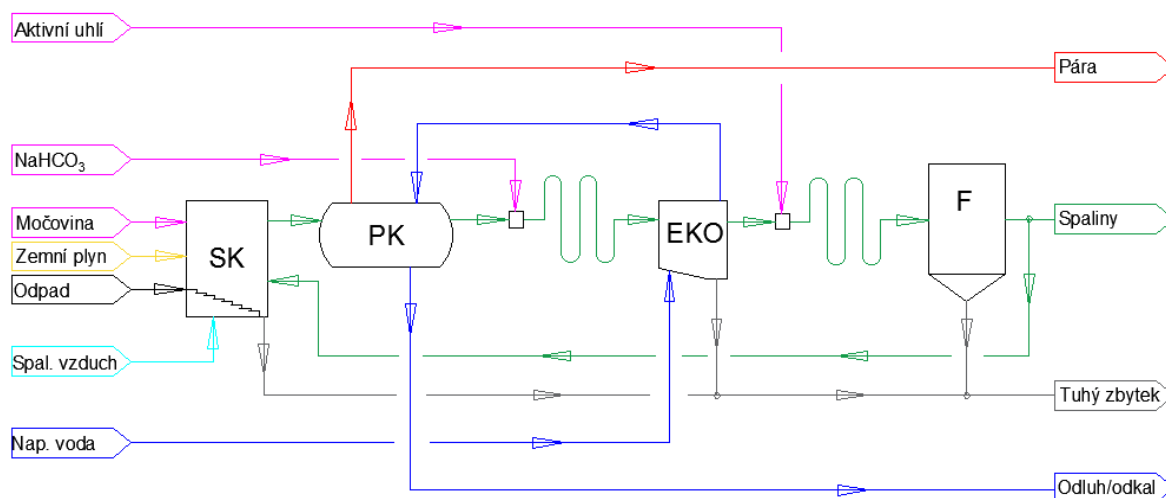
6.2.1 Popis fungující technologie

Do zařízení může odpad vstupovat ve formě slisovaných balíků, které jsou výstupem z třídící linky nebo volně loženého odpadu (např. průmyslový odpad ze zpracování plastů – odřezky, nátoky). Balíky procházejí rozdužovačem, odpad získává sypaný charakter a je pásovým dopravníkem dopravován do zásobního sila. Odtud je již odpad postupně dávkován na posuvný rošt spalovací pece, kde se mísí s přiváděným spalovacím vzduchem a hoří. Pro vyrovnání výkyvů ve výhřevnosti jednotlivých dávek paliva je součástí spalovací komory stabilizační plynový hořák. K regulaci vysoké výhřevnosti naopak slouží sekundární vzduch, případně vstříkovací trysky pro chlazení plamene. Prohoření paliva do násypky brání ochranná vodní clona na vstupu na rošt. Během spalování vzniká tuhý zbytek (popel) a spaliny.

Popel je odváděn hydraulickým hrablem a dále šnekovým dopravníkem do popelnice. Spaliny ze spalovací komory přecházejí do dohořivací komory, kde je zajištěno dohoření uhlovodíkových sloučenin, případně CO při dodržení minimální teploty 850 °C po dobu 2 s. Dohořivací komora je za tímto účelem vybavena automatickým plynovým hořákem propojeným se snímačem teploty na výstupu spalin z dohořivací komory. Dohořivací komora je osazena tryskami pro dávkování močoviny k redukci NO_x ve spalinách (selektivní nekatalytická redukce SNCR).

Spaliny dále procházejí parním kotlem, kde se teplo obsažené ve spalinách využije na výrobu syté páry. Toto primární zchlazení (na 200–230 °C) je nutné zajistit před injektáží sorbentu ke snížení obsahu kyselých složek spalin. To je realizováno prostřednictvím jemně mletého prášku hydrogenuhličitanu sodného (NaHCO₃). Následně spaliny procházejí ekonomizérem, kde dochází k ohřevu napájecí vody pro parní kotel a ochlazení spalin tak, aby bylo dosaženo příznivé teploty (120–150 °C) pro dávkování jemně mletého aktivního uhlí za účelem adsorpce znečišťujících látek jako jsou např. PCDD/F a těžké kovy na povrch částic tohoto sorbentu. Dostatečná reakční doba a promíchání proudu spalin se sorbenty je zabezpečena zařazením kontaktorů (vhodně trasovaných potrubí s vestavbami) za příslušné dávkovače NaHCO₃, případně aktivního uhlí. Chemicky upravené spaliny následně procházejí filtrem, kde jsou zreagované i nezreagované sorbenty zachyceny spolu s TZL. Spalinový ventilátor odvádí vyčištěný plyn přes monitorovací emisní systém do komína, pro zvýšení účinnosti zařízení je před komínem část spalin recirkulována zpět do prostoru ohniště.

Hlavní proudy a aparáty spalovací jednotky zachycuje obrázek 6.2.



Obrázek 6.2 Zjednodušené schéma jednotky na energetické využití plastového odpadu; SK – spalovací komora, PK – parní kotel, EKO – ekonomizér, F – rukávcový filtr

Ve spalinách odcházejících do komína je pomocí měřicího systému kontinuálně měřena hmotnostní koncentrace HCl, TZL, CO, SO₂, NO_x, TOC, procentní obsah H₂O, O₂, teplota, tlak a průtok spalin. Při překročení některého specifického limitu musí být dle legislativy blokováno dávkování paliva do spalovací komory. Řídicí systém dále vyhodnocuje teplotu spalin ve spalovací komoře a v dohořivací komoře – dle požadavků legislativy [28]. Při jejich poklesu zapaluje pomocné hořáky nebo zastavuje přívod paliva.

7 VARIANTY INTEGRACE

Připravovaná odpadová legislativa může přinést zásadní změny – už samotné omezení skládkování (rok 2030) a plnění ostatních cílů cirkulární ekonomiky povede k tomu, aby obce přehodnotily dosavadní způsoby nakládání s odpady. Některé ČOV byly již v roce 2016 (vydání vyhlášky o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě) nuceny začít hledat jiná technologická řešení, kterými bude možné u kalů dosahovat předepsaných požadavků.

Integrace technologií na spalování odpadu a kalu je atraktivní především pro obce, které disponují jak čistírnou odpadních vod s dostatečně velkou kapacitou na to, aby se tato metoda vyplatila, tak s dostatečně velkými toky výhřevného odpadu (např. zbytkový odpad z třídící linky, který byl dosud předáván externímu zpracovateli).

Ve výsledné jednotce jsou v několika možných variantách propojeny dvě dříve popsané technologie (kap. 6.1 a 6.2) s maximálním podpořením jejich kladů a potlačením záporů. Integrace spočívá zejména v převedení přebytečné energie do míst, kde se jí nedostává, a dále v částech, které umožňují společné řešení (např. systém čištění spalin).

- **varianta 1** – spalování plastového odpadu a využití uvolněného tepla k sušení čistírenského kalu
- **varianta 2** – spalování plastového odpadu, využití uvolněného tepla k sušení čistírenského kalu a následné spalování tohoto kalu se zpětným získáváním fosforu
- **varianta 3** – společné spalování obou materiálů

Referenční jednotkou pro všechny varianty propojené technologie je jednotka pro zpracování zbytkového plastového odpadu (kap. 6.2). Její konstrukční řešení (modulární – v kontejnerech) i objem zpracovávaného odpadu odpovídá záměrům ohledně kapacity navrhované jednotky s integrovanou technologií pro kaly a plasty. Z množství spalovaného plastového odpadu vyplývá množství vysoušeného kalu a míra vysušení. Ve variantě 3 dochází ke smíchání obou toků a množství plastového odpadu je navýšeno o přidávaný kal.

Práce se nezabývá detailním řešením konstrukce, ale pouze základním technologickým schématem a materiálovými a energetickými toky v rámci zařízení. Vzhledem k tomu, že se řešení týká modelového případu, není lokalita konkretizována. V řešení je uvažováno území disponující separační linkou s roční produkcí zbytkového plastového odpadu cca 2400 tun, a s čistírnou odpadních vod pro 50–100 tis. EO.

V ČR bylo k roku 2014 provozováno 116 dotříd'ovacích linek [33] a k roku 2018 celkem 34 čistíren odpadních vod s uvažovanou kapacitou [66].

Hlavní motivací integrace je společné řešení pro dva toky v současnosti zatím nevyhnutelných odpadů. Kal je možné považovat za obnovitelný zdroj. I přes veškeré odpadové strategie není pravděpodobné, že by plastový odpad dosahoval takové čistoty, aby ho bylo možné beze zbytku zrecyklovat. Kombinace právě těchto toků je výhodná z důvodu vysoké výhřevnosti jednoho (plast) a nedostatečné výhřevnosti druhého (kal).

Oproti samostatné jednotce 6.2 umožňuje integrovaná technologie zpracovávat kal – sušit nebo spalovat. Naopak v porovnání se samostatnou jednotkou 6.1 přinese integrace možnost využívat přebytečnou energii a zajistí bezpečné vysušení a spálení kalu bez nepřetržitého provozu stabilizačních hořáků. Čištění spalin z obou spalovacích procesů může být realizováno společně, což představuje úsporu prostoru i nákladů v porovnání se dvěma samostatnými jednotkami 6.1 a 6.2.

7.1 Varianta 1 – Spalování plastového odpadu, sušení kalu

Spalování plastového odpadu, spaliny tvoří sušící médium pro sušárnu kalu. Předpoklady:

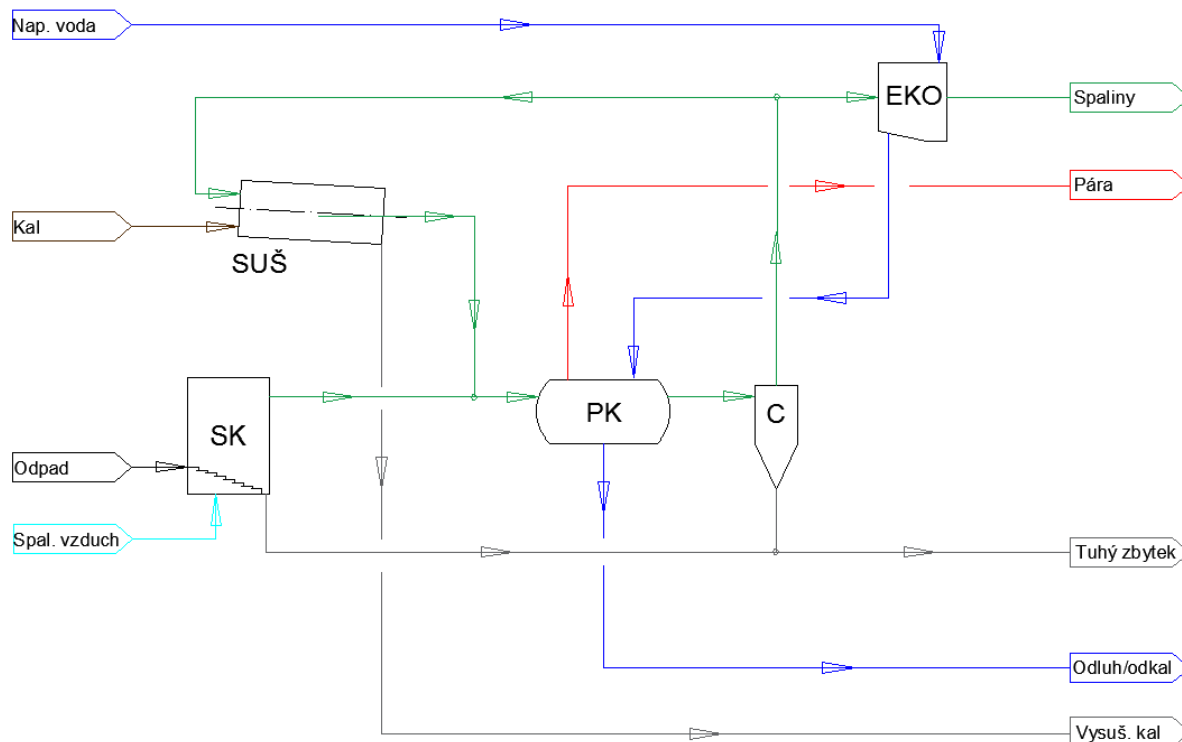
- prioritou je získávat sušený kal, ne ho spalovat
- zájem místních zemědělců o kal ve vysušené podobě
- řešení pro kal s přípustným obsahem kontaminantů (těžkých kovů)
- zájem o využití přebytečné energie

Při spalování plastového odpadu vzniká relativně velké množství přebytečné energie, kterou lze dále využít různými způsoby. Propojení technologií v rámci této práce počítá s využitím přebytečné energie ke zvýšení obsahu sušiny v kalu a k produkci páry s možností dalšího využití. Výslednými produkty je popel z termického zpracování plastu a sušený kal, u kterého je dále počítáno s využitím v zemědělství. Řešení je proto přípustné pouze pro kaly splňující legislativou stanovené limity na těžké kovy a další toxické látky. Plnění mikrobiologických kritérií bude zajištěno vysušením. Za hygienizaci sušením je považováno dosažení minimálně 90 % sušiny v kalu a jeho ohřev nad 80 °C po dobu alespoň 10 minut [67].

Takto sušený kal je dlouhodobě skladovatelný, dochází k redukci objemu (cca na 1/3) a tím ke snížení nákladů na dopravu k zpracovateli.

Kaly splňující všechny legislativní požadavky již po stabilizaci je zbytečné sušit, vhodnější pro půdu je aplikovat kal včetně obsažené vlhkosti (kap. 4.2).

Technologie je zachycena na **Obrázek 7.1** Zjednodušené schéma technologie varianty 1; SUŠ – sušárna, SK – spalovací komora, PK – parní kotel, EKO – ekonomizér, C – cyklon



Obrázek 7.1 Zjednodušené schéma technologie varianty 1; SUŠ – sušárna, SK – spalovací komora, PK – parní kotel, EKO – ekonomizér, C – cyklon

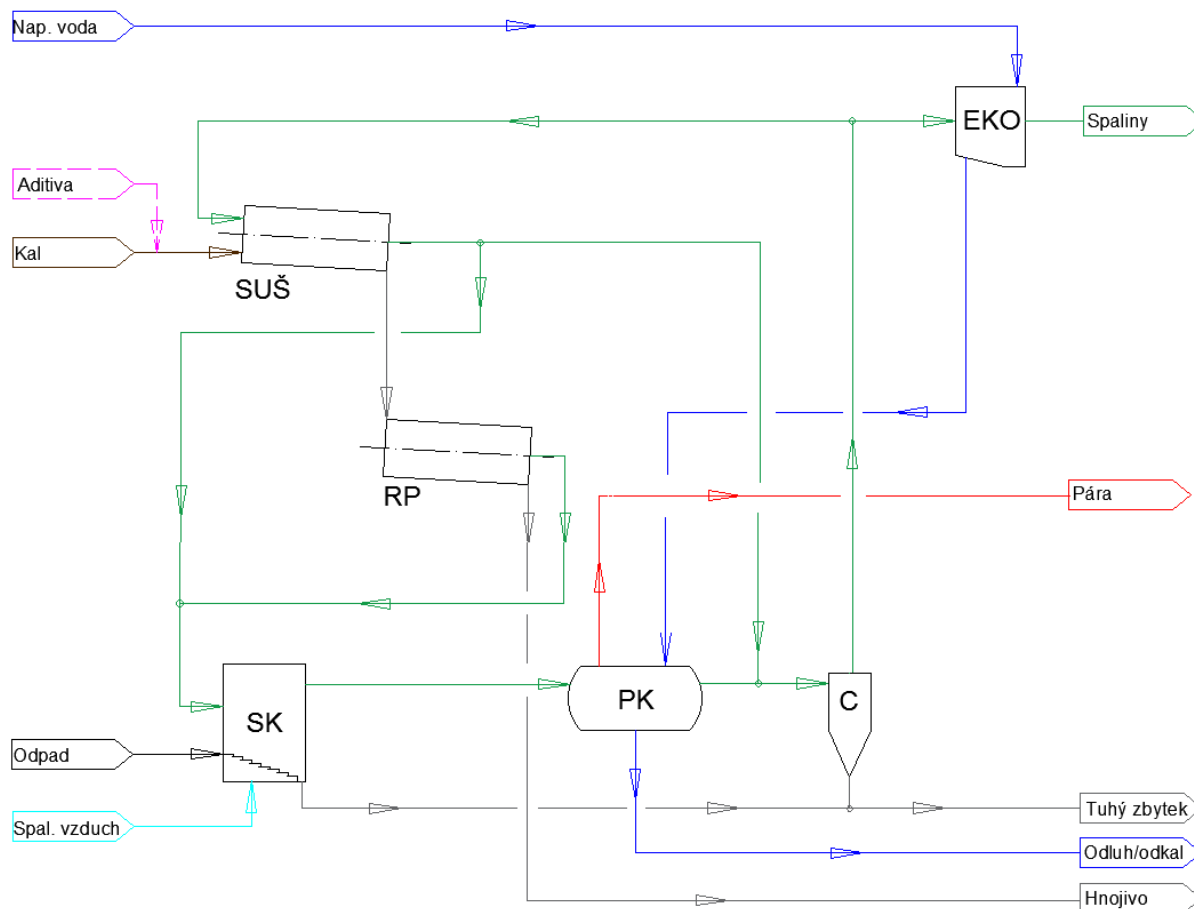
Plastový odpad o stejném množství jako v případě jednotky 6.2 (333 kg/h) je spalován ve spalovací komoře za současného přivádění potřebného množství vzduchu (z důvodu

vysoké výhřevnosti paliva bez předehřevu). Vzniklé spaliny procházejí parním kotlem, který produkuje páru o teplotě 165 °C a tlaku 7 bar. Spaliny se průchodem ochlazují na teplotu optimální pro vstup do sušárny (<300 °C). Před sušárnou spaliny procházejí multicyklonem (předčištění spalin před vstupem do sušárny, respektive do mokré pračky), a za ním se z proudu odděluje množství spalin potřebné k vysušení kalu. V sušárně dochází ke kontaktu spalin s kalem a spaliny do sebe přebírají odpařenou vlhkost. Vlhký proud je následně z části zaváděn do spalovací komory za účelem snížení teploty. Zbytek spalin za odbočkou do sušárny pokračuje přes ekonomizér do systému čištění spalin a do komína. Čištění spalin je realizováno mokrou sorpcí s kyselým a zásaditým stupněm a adsorpcí na aktivním uhlí.

7.2 Varianta 2 – Oddělené spalování plastového odpadu a vysušeného kalu

Spalování vysušeného kalu a plastového odpadu odděleně, propojení technologií zavedením spalin ze spalování plastového odpadu do sušárny kalů. Předpoklady:

- prioritou je získávání popela s významným obsahem fosforu
- zájem o využití přebytečné energie
- zahrnuje dvě kompletní spalovací zařízení, ale oproti samostatným jednotkám 6.1 a 6.2 jsou spaliny čištěny společně mokrou vypírkou



Obrázek 7.2 Zjednodušené schéma technologie varianty 2; SUŠ – sušárna, RP – rotační pec, SK – spalovací komora, PK – parní kotel, EKO – ekonomizér, C – cyklon

Navržené řešení (**Obrázek 7.2**) propojuje dříve popsané jednotky pro energetické využití plastového odpadu (6.2) a pro termické zpracování čistírenského kalu (6.1) se zpětným

získáváním fosforu, přičemž propojení spočívá v použití spalin vzniklých spalováním plastů jako sušicího média pro vysušení kalu. Oproti variantě 1 není sušený kal využíván v zemědělství, ale je po vysušení spalován, přičemž technologie spalování plastů a kalů jsou oddělené. Technologie pro spalování plastů je shodná s variantou 1. Vysušený kal ze sušárny pokračuje do spalovací rotační pece, vzniklé spaliny jsou zavedeny do spalovací komory pro plastový odpad. Následně procházejí společně parním kotlem, multicyklonem a po oddělení části proudu zavedeného do sušárny jsou společně čištěny. Výsledným produktem je popel ze spalování plastu (nevyužitelný) a popel ze spalování kalu, který obsahuje velké množství živin a lze ho využít jako hnojivo – mísením kalu s čínidly (na vstupu do sušárny) je dosaženo odstranění těžkých kovů z kalu a biodostupnosti obsaženého fosforu (podrobný popis aplikace čínidel viz kapitola 6.1.1).

Integrace zde řeší problém nedostatečného tepelného obsahu spalin ze spalování kalu a dokonce je možné velkou část přebytečného tepla využít i dalšími způsoby.

Kal lze sušit i na nižší obsah sušiny, protože v tomto případě není prioritou jeho důkladná hygienizace.

7.3 Varianta 3 – Spoluspalování plastového odpadu s kalem

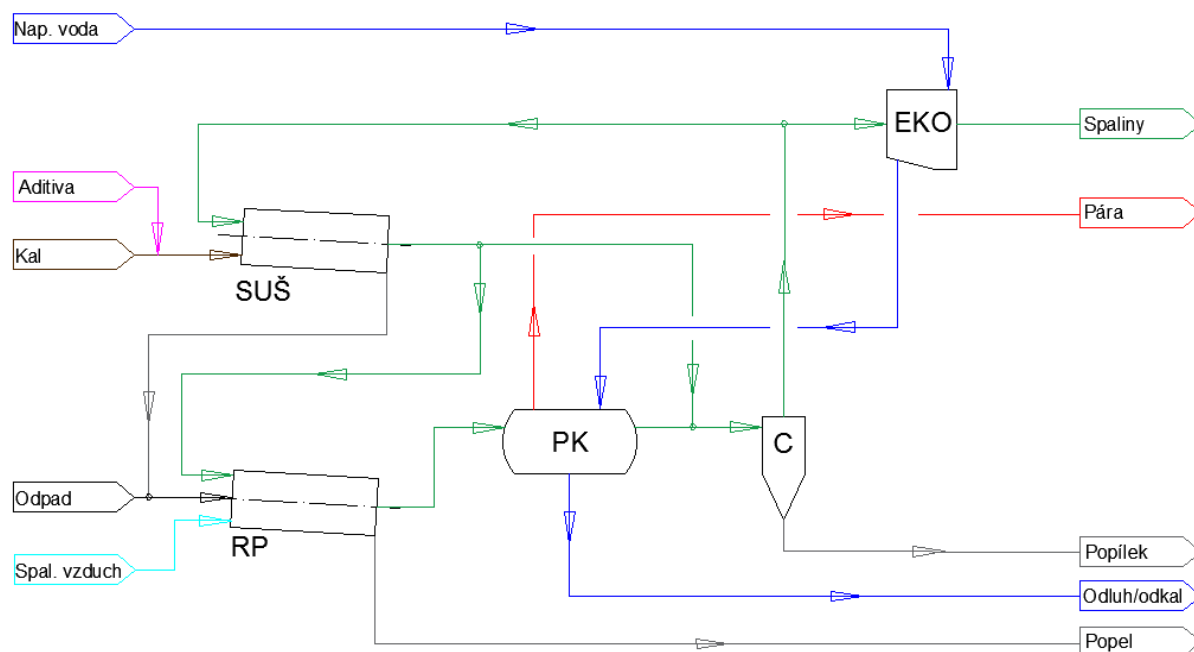
Spalování plastového odpadu a kalu současně v jednom zařízení. Předpoklady:

- Prioritou je získávání energie, ne fosforu
- Nízký obsah fosforu v kalu a jeho získávání se nevyplatí
- Způsob likvidace kontaminovaného kalu, který nelze využít v zemědělství
- Menší množství kalu, nevyplatí se samostatné spalování
- Regulace výhřevnosti plastu kalem

V případě že obsah fosforu v kalu je nízký a jeho získávání se nevyplatí nebo je k dispozici pouze v malém množství, může být spoluspalování tohoto kalu s plastovým odpadem výhodné zejména z toho důvodu, že smísením obou materiálů dojde k regulaci vysoké výhřevnosti spalovaných plastů.

Teoreticky lze tímto způsobem spalovat i odvodněný kal (výhřevnost plastu je dostatečná), manipulace a skladování vysušeného kalu (ve formě “granulí“) jsou však méně problematické než u pastovité hmoty. K sušení se přistupuje i z důvodu snazšího promísení obou odpadů a zmírnění hasicích účinků vlhkého kalu. Navrhovaná technologie poskytuje dostatek přebytečné energie k pokrytí energetických nároků sušárny.

V navrhované technologii (**Obrázek 7.3**) je opět využito propojení procesu sušení a spalování prostřednictvím spalin jako sušicího média. Spaliny v této variantě pocházejí ze společného spalování plastu a sušeného kalu předem smísených v zásobníku. Zbytek technologie je shodný s předchozími variantami.



Obrázek 7.3 Zjednodušené schéma technologie varianty 3; SUŠ – sušárna, RP – rotační pec, SK – spalovací komora, PK – parní kotel, EKO – ekonomizér, C – cyklon

8 MATERIÁLOVÁ A ENERGETICKÁ BILANCE VYBRANÝCH PROCESŮ

Bilanční výpočty byly provedeny v programu W2E (Waste to Energy) vyvinutém na Ústavu procesního inženýrství FSI VUT v Brně. Program obsahuje přednastavené bloky využívané v technologiích pro energetické využití odpadů a uživatel je tak schopen vytvářet jejich propojením jednoduchá schémata takových technologií. Program zahrnuje výpočty potřebné pro bilancování spalovacích procesů a systémů čištění spalin – množství spalovacího vzduchu, předávaný výkon a ztráty v zařízeních, tlakové ztráty, reakce probíhající při spalování a při čištění spalin, složení spalin, sušení materiálu apod.

Tato práce uvažuje následující zjednodušení:

- Při výpočtu nebyly uvažovány tlakové ztráty. Ve schématu tudíž oproti skutečnosti chybí spalinové ventilátory. V celé spalinové trase je uvažován atmosférický tlak.
- Přisávání falešného vzduchu na trase spalin je zanedbáno.
- Tepelné ztráty na trase a v malých zařízeních jsou zanedbány, uvažováno je s tepelnými ztrátami ve spalovací komoře/rotační peci, kotli a ekonomizéru, přičemž tyto ztráty jsou stanoveny jako podíl z výkonu příslušného zařízení na základě konzultací (viz níže).
- V bilanci je počítáno se suchým vzduchem a objem spalin je vyjádřen v Nm³/h.

Další předpoklady a omezení:

Vlastnosti a složení použitého vstupního plastového odpadu a čistírenského kalu jsou převzaty z veřejné databáze Phyllis2 (**Tabulka 8.1**):

- Plastová frakce komunálního odpadu
- Anaerobně stabilizovaný kal z ČOV v odvodněném a vysušeném stavu

Tabulka 8.1 Palivový rozbor vstupních odpadů (původní vzorky) [20] [45]

Složka [hm. %]	Plastová frakce komunálního odpadu	ASK mechanicky odvodněný	Sušený kal
W	10,00	81,60	10,00
A	3,96	6,70	32,77
h	C	73,00	6,20
	H	12,00	0,96
	S	0,01	0,13
	N	0,10	0,99
	O	0,75	3,40
	Cl	0,18	0,02
Sušina [hm. %]	90,00	18,40	90,00
Výhřevnost [MJ/kg]	35,02	0,62	12,58

W – voda, A – popelovina, h – hořlavina

Tato paliva byla použita při bilančních výpočtech oddělených i integrovaných technologií, aby bylo možné integraci s oddělenými procesy vzájemně porovnat.

Množství spalovacího vzduchu bylo vypočítáno programem podle množství paliva a zadaného přebytku vzduchu. Přebytek vzduchu byl zvolen na základě konzultací 1,4 pro roštovou spalovací pec a 1,6 pro rotační pec.

Požadované parametry páry jsou shodné pro všechny varianty: 7 bar, 165 °C (sytá pára).

Předávané výkony v jednotlivých zařízeních byly vypočítány přímo programem nebo na základě rozdílu entalpií před a na výstupu ze zařízení a příslušného hmotnostního toku.

Limitující jsou při výpočtu především teploty spalin na vstupu do některých zařízení. Spaliny nesmí podkročit rosný bod za účelem předcházení korozi materiálu stěn. Doporučená rozmezí teplot (na základě konzultací, provozních dat nebo literatury) u aparátů je důležité dodržet zejména kvůli optimálně probíhajícím reakcím, při překročení také hrozí degradace dávkované látky (např. aktivní uhlí) nebo materiálu (např. stěny spalovací pece, filtr).

- Vstřikování močoviny: 850-1050 °C
- Suchá sorpce (NaHCO₃): 200-230 °C
- Dávkování aktivního uhlí: do 160 °C
- Provozní teplota filtru: do 160 °C
- Multicyklon: do 300 °C

Teploty ve spalovací komoře je možné regulovat přiváděným vzduchem nebo recirkulací spalin o určité teplotě nebo pomocným plynovým hořákem. Zároveň je nutné sledovat tvorbu CO a NO_x ve spalinách, neboť ta je s teplotou spalin, případně přítomností kyslíku, úzce spjata⁶.

Teplota spalin na vstupu do sušárny kalu je shora limitována hodnotou 300 °C z důvodu uvolňování prchavé hořlaviny z kalu a snižování výhřevnosti vysušeného produktu. Při této teplotě také nehrozí napékání kalu na stěny. Na teplotu pod 300 °C se spaliny zchladí průchodem parním kotlem. Teplota vysušeného kalu je stanovena na 80 °C – jedná se o teplotu, při které je zajištěna hygienizace kalu a zároveň je bezpečná z hlediska případné výbušnosti směsi kalového prachu se vzduchem⁷.

Riziko podkročení teploty rosného bodu hrozí ve spalinovodu za sušárny, neboť v sušárně dochází k odevzdání velkého množství tepla z důvodu odpařování vody obsažené v kalu. Spaliny obsahují oxidy síry, které zvyšují rosný bod. U spalování plastu byla bezpečná teplota za sušárny stanovena na 130 °C. Kal obsahuje větší podíl síry, a proto byla ve výpočtech zahrnujících spalování kalů tato teplota zvýšena na 160 °C pro směs spalin ze spalování plastů a kalů a na 170 °C pro spaliny pocházející pouze z kalu.

Veškeré spaliny ze sušárny jsou ve výpočtech zaváděny do spalovací komory za účelem lepší porovnatelnosti. Zavedení části spalin až za parní kotelnou povede ke zvýšení jeho výkonu. Optimální množství a místa směšování vyžadují detailnější rozbor problematiky.

Teplné ztráty má smysl uvažovat zejména u zařízení pracujících při vysokých teplotách nebo u zařízení s velkým vnějším povrchem. Ztráty byly pro jednoduchost odhadnuty jako

⁶ Výše zmíněné pravidlo 3T – temperature, turbulence, time (teplota, turbulence/promísení, čas)

⁷ Závěry obdržené v průběhu návrhu jednotky pro termické zpracování kalu z ČOV se zpětným získáváním fosforu (EVECO Brno)

procentuální podíl z výkonu předávaného v daném zařízení na základě provozních dat a konzultací:

- ztráty do okolí ze spalovací komory: 2 %
- ztráta nedopalem ve spalovací komoře: 2 %
- ztráty do okolí z kotle: 2 %
- odluh/odkal: 2 % z napájecí vody
- ztráty do okolí z rotační pece: 5 %
- ztráty nedopalem v rotační peci: 2 %
- ztráty do okolí ze sušárny: 5 %
- ztráty v ekonomizéru a ve výměníku pro ohřev spalovacího vzduchu: 1 %
- ztráty na filtru byly stanoveny odhadem na základě předpokládaného vnějšího povrchu (v závislosti na průtoku spalin), povrchové teploty 50 °C, teploty okolí 20 °C a součinitele přestupu tepla 3–5 W/m²K

Systém čištění spalin je u jednotky pro spalování kalu a u všech variant integrace uvažován jako mokrá sorpce s kyselým a zásaditým stupněm, neboť se předpokládá jejich umístění v areálu ČOV. Odpadní vodu z čištění spalin je možné zavádět zpět do technologie ČOV. Mokrý vypírka je doplněna o injektáž aktivního uhlí, případně je počítáno se vstřikováním močoviny do spalin za účelem snížení emisí NO_x. U jednotky pro spalování plastového odpadu systém čištění spalin sestává ze vstřikování močoviny, dávkování suchých sorbentů (aktivní uhlí, hydrogenuhličitan sodný) a filtrace.

Mokrý vypírka spolu se vstřikováním močoviny a aktivního uhlí do spalin jsou teoreticky schopny zachytit veškeré polutanty ve směsi spalin ze spalování kalů a plastového odpadu. Konkrétní množství aditiv a vhodnost aparátů k odloučení/neutralizaci problémových složek spalin na úroveň požadovanou legislativou je třeba prověřit. Posouzení vhodnosti ani stanovení množství aditiv není náplní této práce, program W2E sice problematiku čištění spalin pokrývá, je ale nutné znát konkrétní množství produkovaných emisí za blokem spalování.

Za bloky, které lze v programu využívat, se skrývá model probíhajícího procesu v závislosti na účelu příslušného bloku. Po propojení bloků proudy a po zadání okrajových podmínek provede program výpočty a výstupem je energetická a materiálová bilance zadané technologie. Ve výsledném schématu jsou zobrazeny průtoky a teploty proudů a ztráty zařízení. Zadané okrajové podmínky (provozní teploty aparátů, požadované vstupní, výstupní parametry apod.) a předávané výkony jsou k dispozici po rozkliknutí jednotlivých zařízení. V následujících podkapitolách jsou výsledná schémata z programu doplněna o přehled zadaných parametrů (tab. 8.x.1) a tabulky s materiálovými (tab. 8.x.2) a energetickými bilancemi (tab. 8.x.3).

Blok spalování (ohniště) v programu W2E umožňuje zadat pouze jeden vstup paliva a jeden vstup spalovacího vzduchu/recirkulovaných spalin. Další vstupy do spalovací komory je možné zadávat až do proudu při spalování vzniklých spalin pomocí směšovače. Za účelem lepší přehlednosti byl do schémat přidán červený rámeček ohraničující spalovací komoru jako celek.

Sušárna je v programu W2E koncipována jako bezkontaktní, sušící médium nepřichází do styku se sušeným materiálem a vypařená vlhkost je odváděna z prostoru sušárny odděleně. V návrzích je však uvažováno s kontaktním sušením a v programu je toto naznačeno zavedením proudu vlhkosti do výstupního proudu spalin.

8.1 Jednotka pro termické zpracování kalů z ČOV s možností zpětného získávání fosforu z popela

Vzhledem k tomu, že návrh zařízení není v době psaní této práce dokončen, byl v rámci výpočtu prostor ke změně v uspořádání. Oproti variantě popsané v kapitole 6.1, kde se proud spalin za multicyklonem o teplotě dělí na dva, z nichž první vstupuje do sušárny a druhý pokračuje do systému čištění spalin, bylo pro výpočet zvoleno takové uspořádání, že k sušení jsou využity veškeré spaliny a proud se dělí na dvě části až za sušárnou (viz Obrázek 8.1). První se napojuje za rotační pec a druhá pokračuje do systému čištění spalin. Za multicyklon je navíc zařazen výměník k ohřevu spalovacího vzduchu. Při tomto uspořádání je tepelný obsah spalin lépe využit (v původní variantě měly odváděné spaliny pořádku příliš vysokou teplotu – i po zapojení tepelného výměníku pro ohřev spalovacího vzduchu). Pro stabilizaci hoření je ve výpočtu přesto uvažováno s plynovým hořákem. Praxe tento závěr potvrzuje.

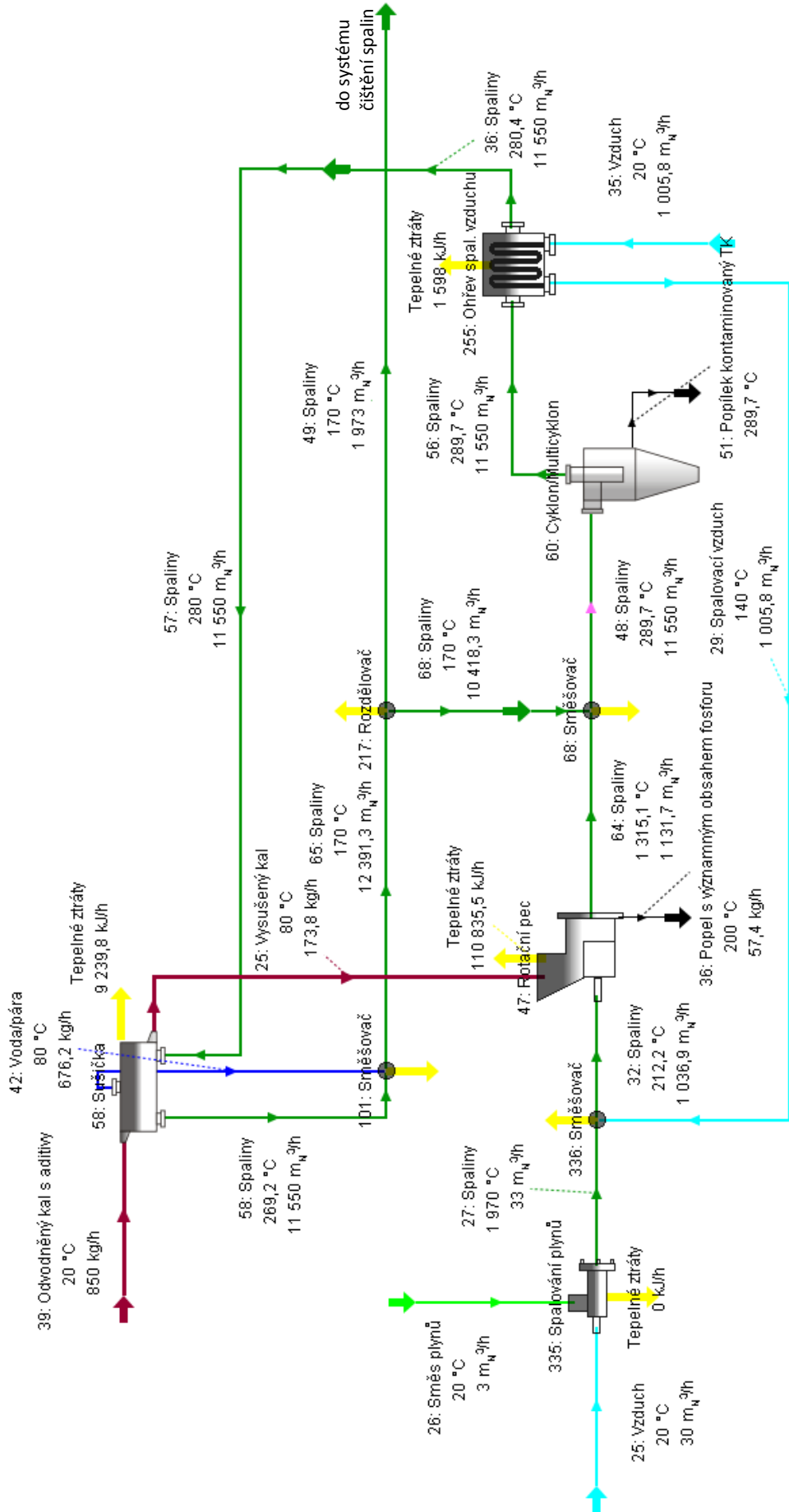
Z důvodu vysokého obsahu síry v použitém vzorku kalu a velkého množství v sušárně odpařené vlhkosti hrozí za sušárnou podkročení rosného bodu spalin (cca 157 °C). Minimální teplota za sušárnou byla stanovena na 170 °C.

Tabulka 8.1.1 Parametry a okrajové podmínky zadané do programu

Parametry a okrajové podmínky zadané do programu		
Sušárna	množství vstupujícího kalu	850 kg/h
	teplota vstupujícího kalu	20 °C
	teplota vystupujícího kalu	80 °C
	obsah sušiny na výstupu	90 hm. %
	teplota spalin na vstupu do sušárny	<300 °C
	teplota spalin na výstupu ze sušárny	>170 °C
	ztráty přenosem tepla ze sušárny do okolí	5 %
Rotační pec	teplota popela	200 °C
	teplota spalovacího vzduchu	140 °C
	přebytek vzduchu	1,6
	nedopal	2 %
	ztráty přenosem tepla z RP do okolí	5 %
	ztráty přenosem tepla z výměníku pro ohřev spalovacího vzduchu do okolí	1 %

Tabulka 8.1.2 Materiálová bilance zpracování kalů

Sušárna					
vstupy			výstupy		
odvodněný kal (81,6 % H ₂ O, 20 °C)	850	kg/h	vysušený kal (10 % H ₂ O, 80 °C)	174	kg/h
spaliny	11550	Nm ³ /h	spaliny + odpar	12391	Nm ³ /h
Rotační pec					
vstupy			výstupy		
palivo – vysušený kal	174	kg/h	popel	57	kg/h
spalovací vzduch	1006	Nm ³ /h	spaliny	1132	Nm ³ /h
zemní plyn	3	Nm ³ /h			



Obrázek 8.1 Schéma technologie zpracování kalů (W2E)

Před sušárnou jsou do kalu dávkována aditiva v množství, které je možné v rámci výpočtu zanedbat. Průběh reakcí, posouzení vhodnosti činidel a určení jejich množství není náplní této práce.

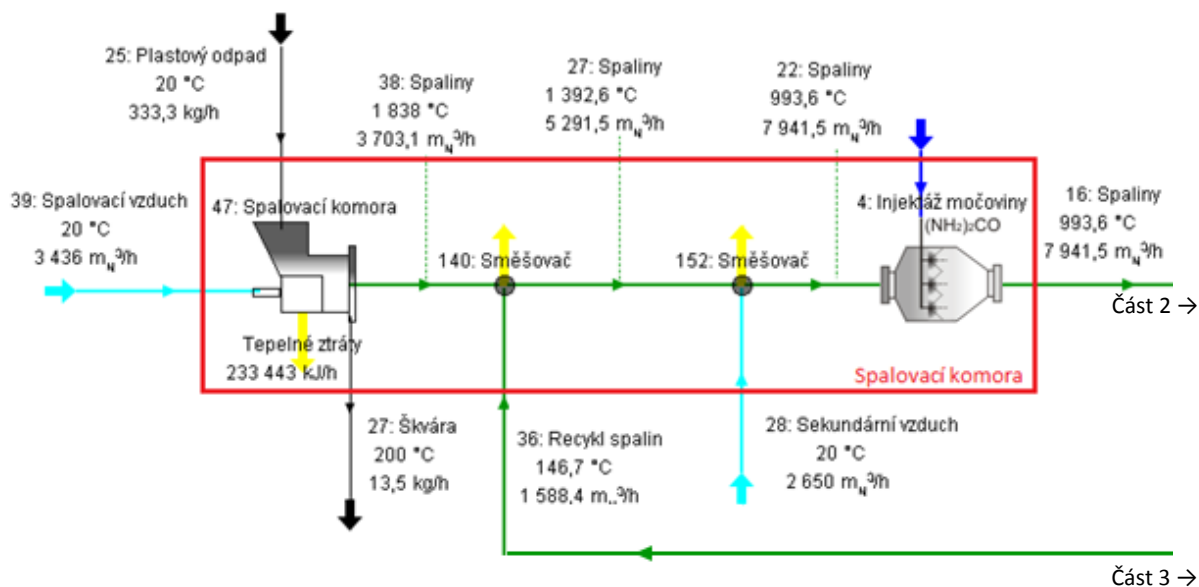
Tabulka 8.1.3 Energetická bilance zpracování kalů

Energetická bilance			
Sušárna	teplo předané kalu	51	kW
	ztráty přestupem tepla do okolí	2,6	kW
	teplo na odpaření vlhkosti ⁸	424	kW
Rotační pec	výhřevnost paliva	12,6	MJ/kg
	teplo uvolněné v peci	595	kW
	z toho: teplo odcházející v tuhém zbytku	2,6	kW
	ztráty přestupem tepla do okolí	30	kW
	ztráty nedopalem	12	kW
OV	tepelný obsah spalin za RP	630	kW
	teplo předané vzduchu	44	kW
	ztráty přestupem tepla do okolí	0,4	kW
tepelný obsah spalin před vstupem do systému čištění		117	kW

OV – ohřev vzduchu

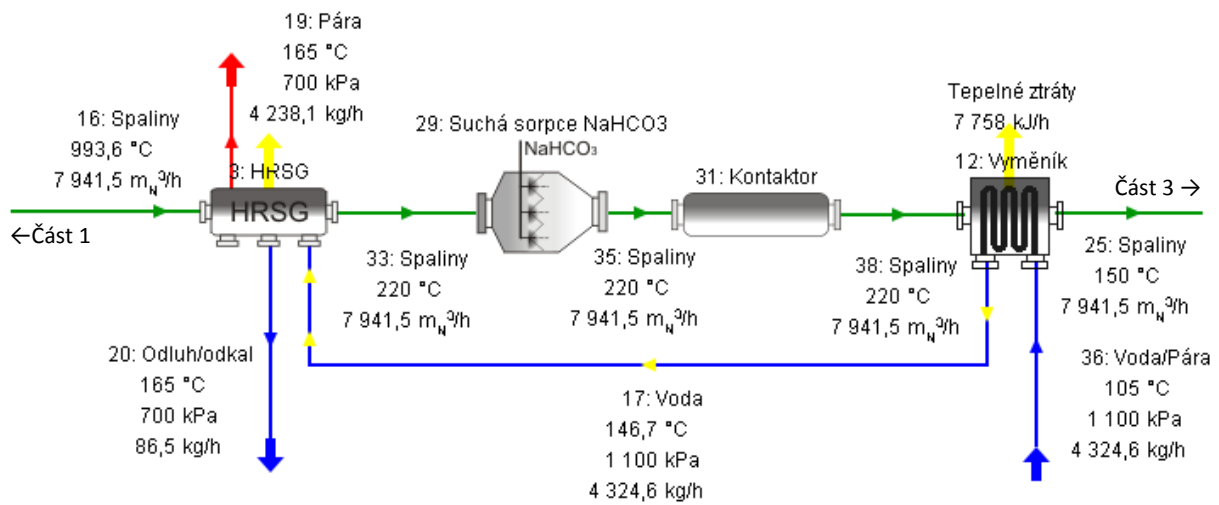
8.2 Jednotka pro energetické využití materiálově nevyužitelného plastového odpadu

Technologie vložená do programu W2E (obr. 8.2–8.4) odpovídá popisu v kap. 6.2.

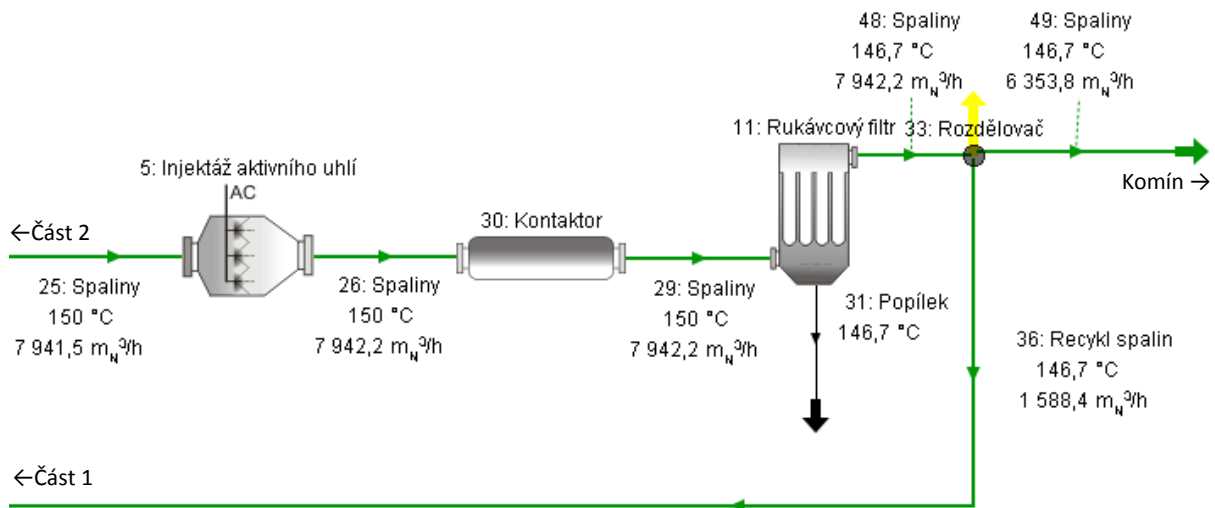


Obrázek 8.2 Schéma technologie zpracování plastového odpadu – část 1/3 (W2E)

⁸ Dohřev vody v kalu na 100 °C, vypaření a dohřev páry na konečnou teplotu spalin



Obrázek 8.3 Schéma technologie zpracování plastového odpadu – část 2/3 (W2E)



Obrázek 8.4 Schéma technologie zpracování plastového odpadu – část 3/3 (W2E)

Tabulka 8.2.1 Parametry a okrajové podmínky zadané do programu

Parametry a okrajové podmínky zadané do programu		
Spalovací komora	množství paliva	333 kg/h
	teplota paliva	20 °C
	teplota popela	200 °C
	teplota spalovacího vzduchu	20 °C
	přebytek vzduchu	1,4
	nedopal	2 %
	ztráty přenosem tepla ze SK do okolí	2 %
vstřikování močoviny		850-1050 °C
Parní kotel	parametry páry	7 bar
		165 °C
	odluh	2 %
	ztráty přenosem tepla do okolí	2 %
	teplota spalin na výstupu z kotle	220 °C

Ekonomizér	napájecí voda do ekonomizéru	105 °C
		11 bar
	teplota spalin na výstupu z EKO	150 °C
	ztráty přestupem tepla z EKO do okolí	1 %
	ztráty přenosem tepla z filtru do okolí	10 kW

Tabulka 8.2.2 Materiálová bilance zpracování plastového odpadu

Spalovací komora						
vstupy			výstupy			
palivo – plastový odpad		2400	t/rok	škvára	14	kg/h
		7200	provoz. hod.	spaliny	7942	Nm ³ /h
		333	kg/h			
spalovací vzduch	primární	3436	Nm ³ /h			
	sekundární	2650	Nm ³ /h			
recykl spalin (20 %)		1588	Nm ³ /h			
Kotel na odpadní teplo + EKO						
vstupy			výstupy			
napájecí voda		4325	kg/h	odluh	87	kg/h
				pára	4238	kg/h

Tabulka 8.2.3 Energetická bilance zpracování plastového odpadu

Energetická bilance			
Spalovací komora	výhřevnost paliva	35	MJ/kg
	teplo uvolněné v ohništi	3242	kW
	z toho: teplo odcházející v tuhém zbytku	0,6	kW
	z toho: ztráty přestupem tepla do okolí	65	kW
	ztráty nedopalem	65	kW
	tepelný obsah spalin za SK	3184	kW
EKO	teplo předané vodě	216	kW
	ztráty přestupem tepla do okolí	2,2	kW
Parní kotel	teplo předané vodě	2526	kW
	z toho: teplo odcházející v odluhu	15	kW
	ztráty přestupem tepla do okolí	52	kW
Filtr	ztráty přestupem tepla do okolí	10	kW
zbytkové teplo ve spalinách – komínová ztráta		304	kW

EKO – ekonomizér

8.3 Varianta integrace 1

Množství kalu, které lze vysušit spalinami vzniklými spalováním 333 kg/h plastového odpadu, je omezeno vlastnostmi těchto spalin. Na vstupu do sušárny musí mít vhodnou teplotu a vlhkost. Teplota je shora limitována 300 °C, aby se předešlo uvolňování prchavé hořlaviny z kalu během sušení. Obsah vody ve spalinách je důležitý z toho důvodu, že spaliny mají při průchodu sušárnou za úkol odebrat ze sušeného kalu vlhkost. S rostoucím obsahem vody

ve spalínách tato schopnost klesá. Spaliny se průchodem sušárnou zároveň ochladí a hrozí pokročení rosného bodu spalín (tvorba H_2SO_4 z vody a oxidů síry obsažených ve spalínách a následná koroze materiálu). Teplotu spalín na výstupu je nutné nastavit tak, aby při daném obsahu vlhkosti a SO_x byla stále bezpečně nad rosným bodem. Množství vysoušeného kalu je třeba vhodně přizpůsobit objem spalín cirkulující sušárnou.

V rámci výpočtu byly prověřeny 3 různé hmotnostní průtoky kalu sušárnou (základní množství 850 kg/h, 600 kg/h a 1200 kg/h), přičemž vždy bylo požadováno dosažení 90 % sušiny a 80 °C výsledného kalu z důvodu zajištění jeho hygienizace a dlouhodobé skladovatelnosti (je počítáno s využitím vysoušeného kalu v zemědělství). Ve všech případech byly k vysušení využity spaliny vzniklé spalováním 333 kg/h plastového odpadu, měnil se pouze průtok spalín sušárnou. Teploty před a za sušárnou byly drženy na konstantních hodnotách. S rostoucím průtokem spalín sušárnou klesala teplota směsi spalín před kotlem, a tedy i předávaný tepelný výkon v kotli (teplota za kotlem byla zafixována – odpovídá teplotě spalín před sušárnou). Úměrně se mění i množství spalín odváděných do komína. Odvést je třeba stejné množství, které bylo do cirkulační smyčky přivedeno – množství spalín vznikajících v SK je konstantní (množství paliva a vzduchu je konstantní) a mění se pouze objem vlhkosti přiváděné do spalín z kalu, která je úměrná množství vysoušeného kalu.

Detailní bilance je uvedena pro variantu se základním množstvím kalu – 850 kg/h (viz obrázek 8.5).

Tabulka 8.3.1 Parametry a okrajové podmínky zadané do programu

Parametry a okrajové podmínky zadané do programu		
Spalovací komora	množství paliva	333 kg/h
	teplota paliva	20 °C
	teplota popela	200 °C
	teplota spalovacího vzduchu	20 °C
	přebytek vzduchu	1,4
	nedopal	2 %
	ztráty přenosem tepla ze SK do okolí	2 %
Sušárna	množství vstupujícího kalu	850 kg/h
	teplota vstupujícího kalu	20 °C
	teplota vystupujícího kalu	80 °C
	obsah sušiny na výstupu ze sušárny	90 hm. %
	teplota spalín na vstupu do sušárny	<300 °C
	teplota spalín na výstupu ze sušárny	>130 °C
	ztráty přenosem tepla ze sušárny do okolí	5 %
Parní kotel	parametry páry	7 bar
		165 °C
	odluh	2 %
	ztráty přenosem tepla z kotle do okolí	2 %
EKO	napájecí voda	105 °C
		11 bar
	výstup vody z EKO/vstup do kotle	160 °C
	ztráty přenosem tepla z EKO do okolí	1 %

Tabulka 8.3.2 Materiálová bilance varianty 1

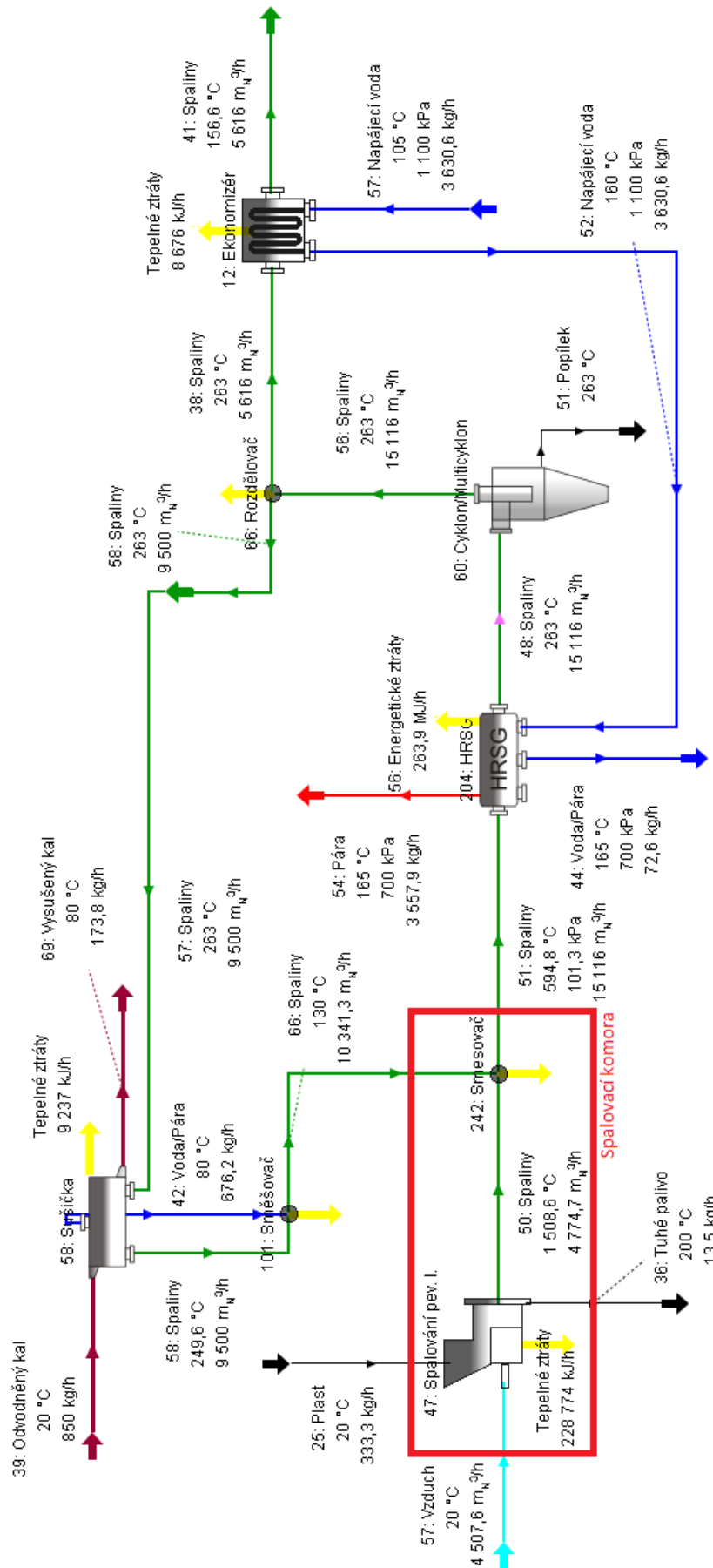
Sušárna					
vstupy			výstupy		
odvodněný kal (81,6 % H ₂ O, 20 °C)	850	kg/h	vysušený kal (10 % H ₂ O, 80 °C)	174	kg/h
spaliny	9500	Nm ³ /h	spaliny + odpar	10341	Nm ³ /h
Spalovací komora					
vstupy			výstupy		
palivo – plastový odpad	2400	t/rok	škvára	14	kg/h
	7200	provoz. hod.	spaliny	15116	Nm ³ /h
	333	kg/h			
spalovací vzduch	4508	Nm ³ /h			
recykl spalin ze sušárny	10341	Nm ³ /h			
Parní kotel + ekonomizér					
vstupy			výstupy		
napájecí voda	3631	kg/h	odluh	73	kg/h
			pára	3558	kg/h

Tabulka 8.3.3 Energetická bilance varianty 1

Energetická bilance			
Spalovací komora	výhřevnost paliva	35	MJ/kg
	ztráty nedopalem	65	kW
	teplo uvolněné v ohništi	3177	kW
	z toho: teplo odcházející v tuhém zbytku	0,6	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	64	kW
	tepelný obsah spalin za SK	3551	kW
EKO	teplo předané vodě	237	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	2,4	kW
Parní kotel	teplo předané vodě	2063	kW
	z toho: teplo odcházející v odluhu	12	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	42	kW
Sušárna	teplo předané kalu	51	kW
	z toho: zbytkové teplo ve vysušeném kalu	4,3	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	2,6	kW
	teplo na odpaření vlhkosti ⁹	424	kW
zbytkové teplo ve spalinách		298	kW

EKO – ekonomizér

⁹ Dohřev vody v kalu na 100 °C, vypaření a dohřev páry na konečnou teplotu spalin

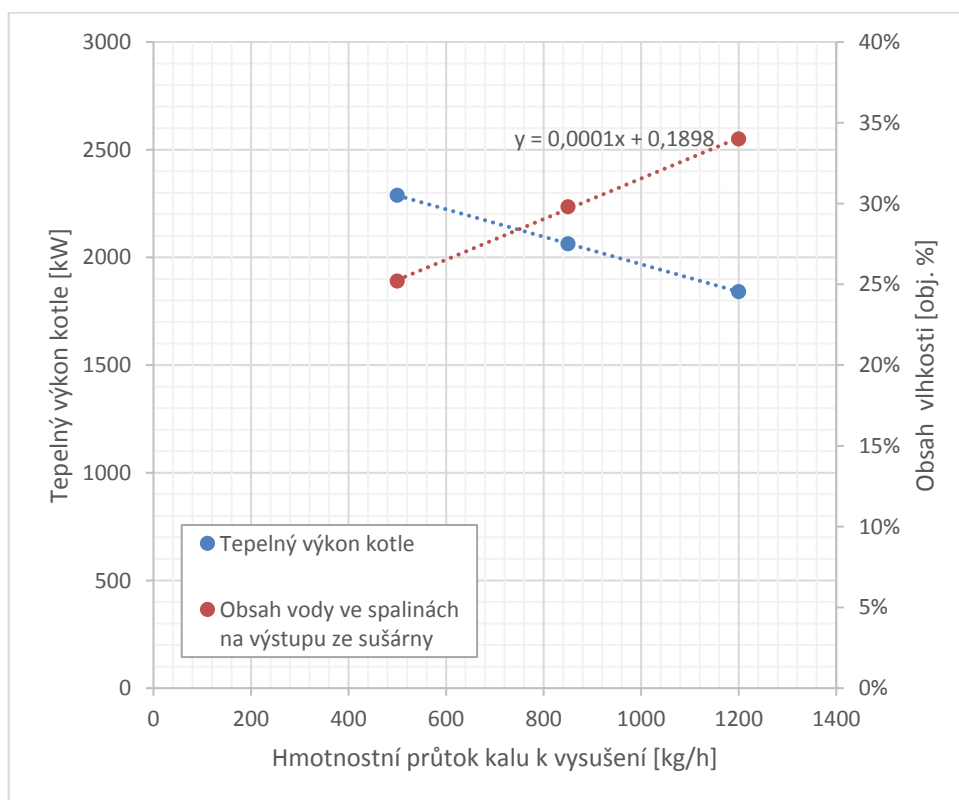


Obrázek 8.5 Schéma integrované technologie – varianta 1 (WZE)

Se změnou množství přivedeného kalu (a současným zachováním množství spalovaného paliva) se přímo úměrně mění množství výsledného vysušeného produktu, množství cirkulujících spalin, jejich vlhkost, množství a teplota spalin odváděných do systému čištění spalin a nepřímo úměrně tepelný výkon kotle, respektive množství páry. Zjednodušeně lze tedy prohlásit, že pokud je vysušeno větší množství kalu, snižuje se produkce páry a hrozí dřívější kondenzace H_2SO_4 ve spalinách. Změny parametrů při snížení/navýšení množství vysušeného kalu zachycuje tabulka 8.3.4 a obrázek 8.6.

Tabulka 8.3.4 Změny parametrů v závislosti na množství vysušeného kalu

Varianta 1 - porovnání				
odvodněný kal	[kg/h]	500	850	1200
vysušený kal 90 hm. % sušiny	[kg/h]	102	174	245
objem spalin před sušárnou	[Nm ³ /h]	5620	9500	13400
odpařená vlhkost	[kg/h]	398	676	955
objem spalin za sušárnou	[Nm ³ /h]	6115	10341	14588
obsah vody ve spalinách za sušárnou	[obj. %]	25,2	29,8	34,0
rosný bod spalin za sušárnou	[°C]	114,6	116,7	118,3
tepelný výkon kotle	[kW]	2288	2063	1841
množství páry 7 bar, 165 °C	[kg/h]	3945	3558	3175



Obrázek 8.6 Závislost výkonu kotle a vlhkosti ve spalinách na množství vysušeného kalu

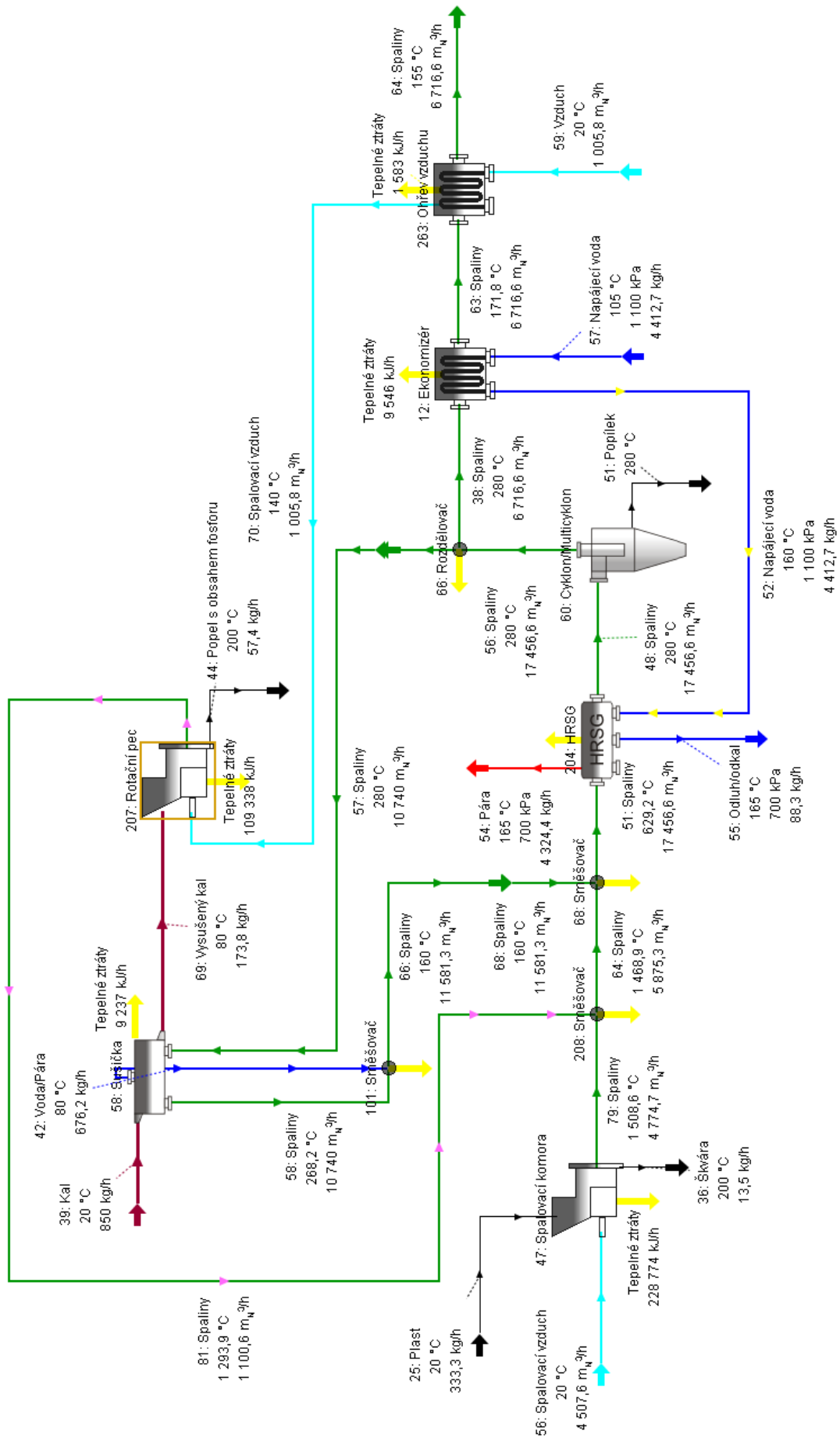
8.4 Varianta integrace 2

Požadavkem na výstupní kal oproti variantě 1 není dokonalá hygienizace, může proto být vysušen i méně. Nižší míra vysušení se však promítne do výhřevnosti vysušeného materiálu, respektive do nutnosti použít u vlhčích kalů pomocný hořák. Výkon kotle se se změnou míry vysušení nemění, jedná se o uzavřený systém (menší vysušení – spalování většího množství kalu o menší výhřevnosti). Cílem integrace je minimalizovat množství přídavného paliva (nebo jeho spotřebu eliminovat), proto je vhodné vysoušet kal na maximum a dosahovat tak co nejvyšší výhřevnosti.

V případě vysoušení většího/menšího množství kalu se výkon kotle téměř nemění, neboť je tento kal následně spalován a vzniklé teplo je využito uvnitř systému. Oproti variantě 1 bylo třeba zvýšit minimální teplotu za sušárnou z důvodu vyšší teploty rosného bodu směsi spalin (spaliny pocházející ze spalování kalu mají vyšší zastoupení oxidů síry, neboť kal obsahuje vyšší procento síry). Technologie je shodná s popisem v kapitole 7 (viz obrázek 8.7).

Tabulka 8.4.1 Parametry a okrajové podmínky zadané do programu

Parametry a okrajové podmínky zadané do programu		
Spalovací komora	množství paliva	333 kg/h
	teplota paliva	20 °C
	teplota popela	200 °C
	teplota spalovacího vzduchu	20 °C
	přebytek vzduchu	1,4
	nedopal	2 %
	ztráty přestupem tepla do okolí	2 %
Sušárna	množství vstupujícího kalu	850 kg/h
	teplota vstupujícího kalu	20 °C
	teplota vystupujícího kalu	80 °C
	obsah sušiny	90 hm. %
	teplota spalin na vstupu do sušárny	<300 °C
	teplota spalin na výstupu ze sušárny	>160 °C
	ztráty přestupem tepla do okolí	5 %
Rotační pec	teplota popela	200 °C
	teplota spalovacího vzduchu	140 °C
	přebytek vzduchu	1,6
	nedopal	2 %
	ztráty přestupem tepla do okolí	5 %
Parní kotel	parametry páry	7 bar 165 °C
	odluh	2 %
	ztráty přestupem tepla do okolí	2 %
	teplota spalin na výstupu z kotle	280 °C
EKO	napájecí voda do ekonomizéru	105 °C 11 bar
	výstup vody z EKO/vstup do kotle	160 °C
	ztráty přestupem tepla do okolí	1 %
ztráty ve výměníku pro ohřev spalovacího vzduchu		1 %



Obrázek 8.7 Schéma integrované technologie – varianta 2 (W2E)

Tabulka 8.4.2 Materiálová bilance varianty 2

Sušárna					
vstupy			výstupy		
odvodněný kal (81,6 % H ₂ O, 20 °C)	850	kg/h	vysušený kal (10 % H ₂ O, 80 °C)	174	kg/h
spaliny	10740	Nm ³ /h	spaliny + odpar	11581	Nm ³ /h
Rotační pec					
vstupy			výstupy		
palivo – vysušený kal	174	kg/h	popel	57	kg/h
spalovací vzduch	1006	Nm ³ /h	spaliny	1101	Nm ³ /h
Spalovací komora					
vstupy			výstupy		
palivo – plastový odpad	2400	t/rok	škvára	14	kg/h
	7200	provoz. hod.	spaliny	17457	Nm ³ /h
	333	kg/h			
spalovací vzduch	4508	Nm ³ /h			
nápojení spalin z RP	1101	Nm ³ /h			
recykl spalin ze sušárny	11611	Nm ³ /h			
Kotel na odpadní teplo + EKO					
vstupy			výstupy		
napájecí voda	4413	kg/h	odluh	88	kg/h
			pára	4324	kg/h

Jak je z bilance patrné, řešení uvažuje se zaváděním veškerých spalin z rotační pece do spalovací komory. V praxi je také možné část spalin ze spalování kalů recirkulovat zpět do rotační pece.

Tabulka 8.4.3 Energetická bilance varianty 2

Energetická bilance			
Sušárna	teplo předané kalu	51	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	2,6	kW
	teplo na odpaření vlhkosti ¹⁰	450	kW
Rotační pec	výhřevnost paliva	12,6	MJ/kg
	ztráty nedopalem	12	kW
	teplo uvolněné v peci	595	kW
	z toho: teplo odcházející v tuhém zbytku	2,6	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	30	kW
	tepelný obsah spalin za RP	601	kW
Spalovací komora	výhřevnost paliva	35	MJ/kg
	ztráty nedopalem	65	kW
	teplo uvolněné v ohništi	3177	kW
	z toho: teplo odcházející v tuhém zbytku	0,6	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	64	kW
	tepelný obsah spalin za SK	4340	kW

¹⁰ Dohřev vody v kalu na 100 °C, vypaření a dohřev páry na konečnou teplotu spalin

EKO	teplo předané vodě	288	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	2,9	kW
Parní kotel	teplo předané vodě	2508	kW
	z toho: teplo odcházející v odluhu	1,9	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	50	kW
OV	teplo předané vzduchu	44	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	0,4	kW
zbytkové teplo ve spalínách		351	kW

EKO – ekonomizér, OV – ohřev vzduchu

8.5 Varianta integrace 3

Oproti variantě 2 dochází ke spalování kalu spolu s plastovým odpadem v jedné rotační peci. Výhřevnost plastu je vysoká, u samostatné jednotky na spalování plastového odpadu je počítáno s dodatečným chlazením SK. Ve variantách 1 a 2 je chlazení zajištěno spalinami procházejícími přes sušárnu. Spoluspalování umožňuje snižovat výhřevnost plastového odpadu přidáním vhodného množství kalu přímo do zásobníku.

Není nutné dosahovat vysoké míry vysušení, cílem není hygienizace ale pouze zlepšení procesu hoření. Pro snadné porovnání s předchozími variantami byl však požadovaný obsah sušiny ponechán na 90 %. Při případném nižším vysušení se změní množství a výhřevnost výsledného produktu a množství recirkulovaných spalin (vliv na velikost sušárny, výkon ventilátoru), ale nepromítne se do výkonu kotle, neboť jde o uzavřený systém.

Program W2E neumožňuje směšování paliv, složení výsledné směsi bylo vypočítáno předem za předpokladu, že k základní dávce plastového odpadu je přidáváno 174 kg/h vysušeného kalu (tabulka 8.5).

Tabulka 8.5 Palivový rozbor spalované směsi a jejích složek

Složka [hm. %]		Plastová frakce komunálního odpadu	Sušený kal	Směs
W		10,00	10,00	10,00
A		3,96	32,77	13,83
h	C	30,32	6,20	58,37
	H	4,69	0,96	9,50
	S	0,64	0,13	0,22
	N	4,84	0,99	1,72
	O	16,61	3,40	6,19
	Cl	0,13	0,02	0,16
Hmotnostní průtok [kg/h]		333,3	173,8	507,1
Hmotnostní zlomek [-]		0,66	0,34	1
Výhřevnost [MJ/kg]		35,02	12,58	27,33

W – voda, A – popelovina, h – hořlavina

Tabulka 8.5.1 Parametry a okrajové podmínky zadané do programu

Parametry a okrajové podmínky zadané do programu		
Sušárna	množství vstupujícího kalu	850 kg/h
	teplota vstupujícího kalu	20 °C
	teplota vystupujícího kalu	80 °C
	obsah sušiny	90 hm. %
	teplota spalin na vstupu do sušárny	<300 °C
	teplota spalin na výstupu ze sušárny	>160 °C
	ztráty v sušárně	5 %

Rotační pec	teplota popela	200 °C
	přebytek vzduchu	1,6
	nedopal	2 %
	ztráty přenosem tepla do okolí	5 %
Parní kotel	parametry páry	7 bar
		165 °C
	odluh	2 %
	ztráty přenosem tepla do okolí	2 %
EKO	napájecí voda do ekonomizéru	105 °C
		11 bar
	výstup vody z EKO/vstup do kotle	160 °C
	ztráty přenosem tepla do okolí	1 %

Tabulka 8.5.2 Materiálová bilance varianty 3

Sušárna					
vstupy			výstupy		
odvodněný kal (81,6 % H ₂ O, 20 °C)	850	kg/h	vysušený kal (10 % H ₂ O, 80 °C)	174	kg/h
spaliny	10780	Nm ³ /h	spaliny + odpar	11621	Nm ³ /h
Rotační pec					
vstupy			výstupy		
palivo – směs	507	kg/h	popel	71	kg/h
spalovací vzduch	6197	Nm ³ /h	spaliny	18181	Nm ³ /h
recykl spalín ze sušárny	11621	Nm ³ /h			
Kotel na odpadní teplo + EKO					
vstupy			výstupy		
napájecí voda	4273	kg/h	odluh	86	kg/h
			pára	4188	kg/h

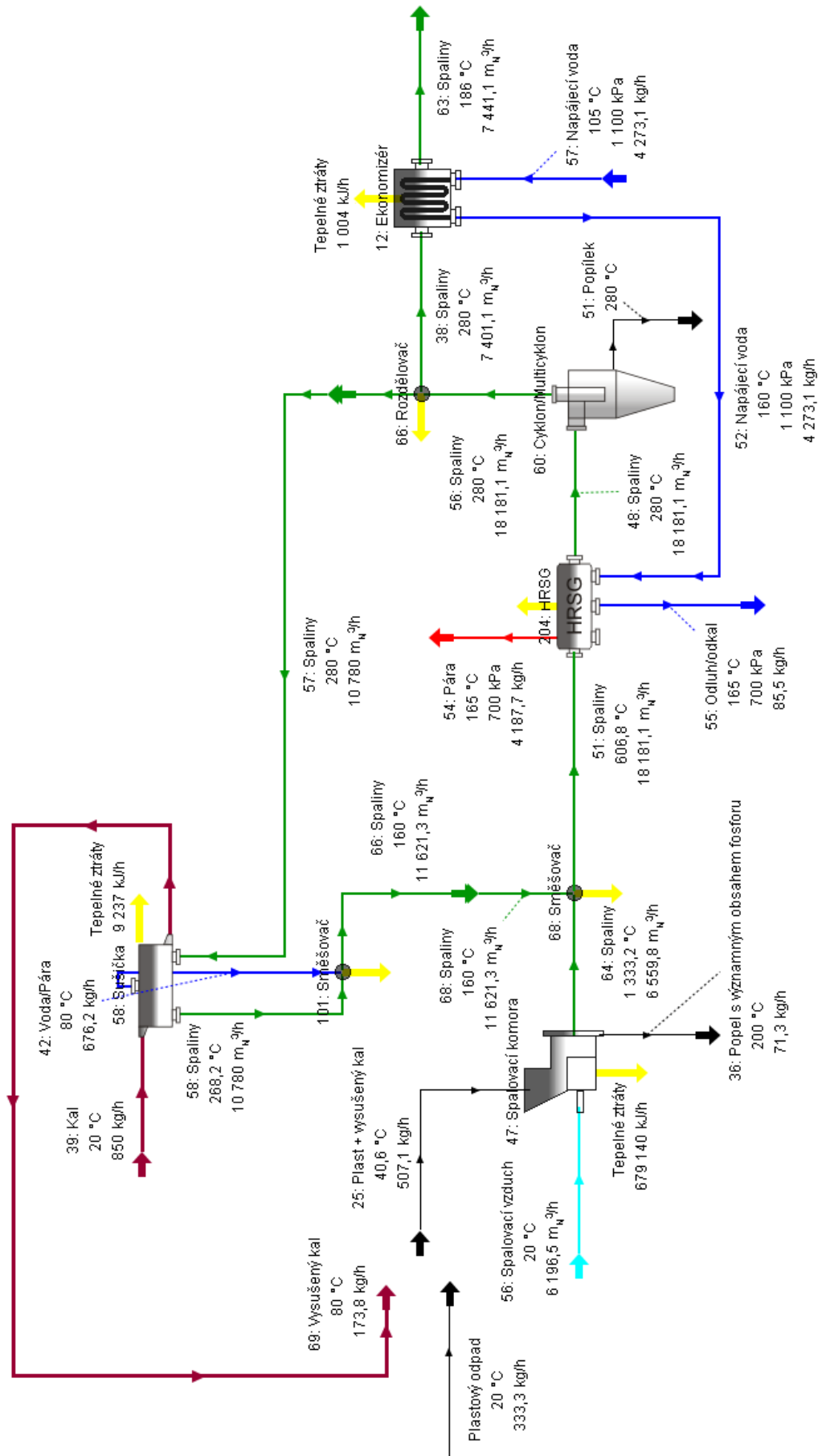
Tabulka 8.5.3 Energetická bilance varianty 3

Energetická bilance			
Sušárna	teplo předané kalu	51	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	2,6	kW
	teplo na odpaření vlhkosti ¹¹	450	kW
Rotační pec	výhřevnost paliva	27,3	MJ/kg
	ztráty nedopalem	77	kW
	teplo uvolněné v ohništi	3773	kW
	z toho: teplo odcházející v tuhém zbytku	3,2	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	189	kW
	tepelný obsah spalín za RP	4327	kW

¹¹ Dohřev vody v kalu na 100 °C, vypaření a dohřev páry na konečnou teplotu spalín

EKO	teplo předané vodě	279	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	2,8	kW
Parní kotel	teplo předané vodě	2428	kW
	z toho: teplo odcházející v odluhu	15	kW
	ztráty přenosem tepla do okolí	48	kW
zbytkové teplo ve spalinách		478	kW

EKO – ekonomizér, OV – ohřev vzduchu



Obrázek 8.4 Schéma integrované technologie – varianta 3 (W2E)

9 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Ekonomické zhodnocení je nedílnou součástí porovnání technologií a v rozhodovacím procesu hraje ekonomické hledisko významnou roli.

Předložená řešení jsou hodnocena na základě odhadu investičních nákladů uvažovaných zařízení a předpokládaných provozních nákladů. Do pořizovacích nákladů obecně spadají projekční práce, stavba, strojní část (spalovací komora, kotel, ekonomizér, výměníky, napájecí nádrž, zásobníky, dopravníky, dávkovače, aparáty systému čištění spalin, spalinovody, rozvody vzduchu a vody, klapky a ventily, čerpadla, ventilátory, snímače, řízení apod.). Provozní náklady zahrnují likvidaci zbytků ze spalování a čištění spalin, použité chemikálie, sorbenty, vodu, údržbu, servis, výměnu filtračních rukávceů, stabilizační palivo, elektrickou energii, ...

V rámci práce bylo vzhledem k přijatým zjednodušením přistoupeno k vyčíslení hlavních strojních částí a systému čištění spalin (

Tabulka 9.1). Cílem je zachytit, v čem se od sebe jednotlivé varianty liší a kde dochází zásluhou integrace k úsporám. Zařízení zastoupená ve všech zvažovaných variantách nejsou do ekonomické bilance zahrnuta. Ceny jsou stanoveny odborným odhadem zaměstnanci firmy Eveco.

Tabulka 9.1 Odhad investičních nákladů rozdílových položek

Varianta	1		2		3		4	
	Spalování plastu, sušení kalu		Spalování plastu, sušení kalu, spalování kalu		Spoluspalování		Oddělené jednotky	
Spalovací komora	✓		✓		×		✓	
Rotační pec	×		✓		✓		✓	
LUVO	×		✓		×		✓	
Odhad investičních nákladů [mil. Kč]	5		12,3		7		12,3	
Systém čištění spalin	Suchá sorpce NaHCO ₃	×	✓	×	×	×	✓	✓
	Látkový filtr	×	✓	×	×	×	✓	✓
	Cyklon	menší	×	větší	větší	větší	menší	menší
	Mokrý pračka	menší	×	větší	větší	větší	menší	menší
Odhad nákladů na systém čištění spalin [mil. Kč]	3,4	3,9	4,4	4,4	4,4	4,4	7,3	7,3
Odhad rozdílových investičních nákladů [mil. Kč]	8,4	8,9	16,7	16,7	11,4	11,4	19,6	19,6

Rozdílovými položkami ve strojní části jsou spalovací komora, rotační pec a výměník pro ohřev vzduchu (s ohřevem vzduchu bylo počítáno pouze u variant, kde dochází k samostatnému spalování kalu). S kotlem, ekonomizérem a injektáží aktivního uhlí je uvažováno ve všech variantách bez rozdílu. Sušička kalu se může napříč variantami lišit podle množství kalu a objemu spalin. Vzhledem k výpočtům, u kterých bylo základní množství vysoušeného kalu a míra vysušení stále stejné pro snazší porovnání a množství spalin procházejících sušárnou bylo přizpůsobeno tomuto množství, lze počítat se stejnou sušárnou ve všech variantách.

Systém čištění spalin je realizován buď suchou sorpcí a následnou filtrací nebo mokrou vypírkou v kombinaci s předčištěním spalin v cyklonu. Zařízení se navzájem liší velikostí – v závislosti na množství spalovaného odpadu a průtoku spalin.

U varianty 1 lze vzhledem k tomu, že je spalován pouze plastový odpad, použít oba systémy čištění spaliny – mokrý nebo suchý. Předpokládané umístění na ČOV (možnost čištění odpadní vody) zvyhodňuje mokrou metodu.

Za rozdílové položky v rámci provozních nákladů lze považovat zejména chemikálie spotřebované v systému čištění spalin a nutnost likvidace tuhých zbytků. Provozní náklady tak budou nejnižší u varianty 1, kde se spaluje pouze plast, a tedy objem tuhých zbytků i spalin procházejících systémem čištění je nejmenší. Naopak s nejvyššími provozními náklady je třeba počítat u varianty 4 (oddělené technologie), kde jsou spaliny čištěny ve 2 na sobě nezávislých systémech.

10 DISKUZE

Úkolem kapitoly 8 bylo srovnání navrhovaných variant na základě bilancí vytvořených v programu W2E, přičemž bylo zafixováno maximum parametrů na konstantních hodnotách napříč výpočty.

Z výstupů lze posoudit vhodnost dané varianty pro konkrétní množství odpadů a jejich další vlastnosti.

Pro spalování je důležitý obsah organických látek, který má přímou souvislost s výhřevností kalu. Tu lze dále ovlivnit mírou vysušení. Okrajové podmínky výpočtů bylo nutné měnit s ohledem na rosný bod spalin (vliv obsahu oxidů síry ve spalinách). Neméně důležitým parametrem je obsahu fosforu – jeho zpětné získávání z popela se vyplatí především v kalech, kde má fosfor významné zastoupení. Pokud výsledný kal obsahuje některé legislativou kontrolované látky v množství větší než povoleném, lze využít jednu z variant 2 nebo 3. Pokud kal veškeré limity splňuje a problém představuje pouze nedostatečná hygienizace, je možné použít všechny 3 varianty, přičemž varianta 1 počítá s využitím výsledného kalu (ve vysušeném stavu) v zemědělství. Problémem může být potenciální zpřísnění legislativních předpisů v souvislosti s odhalením negativního vlivu některých dalších složek (např. mikroplasty, xenobiotika), které zatím v kalech kontrolovány nejsou. V takovém případě nemusí být sušení dostatečnou metodou k eliminaci rizik. Vysušený kal je však široce využitelný i v jiných technologiích – nabízí se např. spalování v monospalovnách, které by řešily zpracování vysušeného kalu centrálně, v cementárnách, k pyrolýze.

Množství zpracovávaného kalu ve variantě 1 je dáno množstvím spalovaného plastu, přičemž průtok spalin sušárnou lze v závislosti na množství kalu navyšovat. S rostoucím množstvím vysušeného kalu klesá výkon parního kotle, záleží tedy na preferencích zpracovatele. Od množství spalin a kalu se odvíjí velikost sušárny a výkon potřebných ventilátorů a promítne se do ekonomické bilance. Množství je třeba optimalizovat na základě znalostí konkrétních parametrů, přičemž významný podíl v rozhodování hraje ekonomické hledisko (velikosti a kapacity zařízení, provozní náklady, možné příjmy z prodeje výsledného produktu).

Varianta 2 představuje finální řešení nakládání s kalem, odpadá tedy nutnost komunikace s dalšími zpracovateli. Provozovateli této kalové koncovky plyne příjem z prodeje popela s významným obsahem biodostupného fosforu (zajištěno dávkováním činidel do kalu dle popisu v kapitole 6.1) k hnojicím účelům. Použití těchto produktů zatím není v české legislativě nijak ošetřeno, ale lze předpokládat jejich podporu v budoucnu.

Varianta 3 je zamýšlena jako způsob likvidace kalů (v případě kontaminace a nízkého obsahu fosforu). Využití varianty pro kal s významným obsahem fosforu (pro něž je nejvhodnější varianta 2) není z důvodu mísení paliva doporučeno. Jednotlivé druhy popela nelze navzájem oddělit a využití výsledného popela jako zdroj fosforu není vhodné bez předchozího vyloučení možnosti vnosu nežádoucích látek vyskytujících se v plastu do půd. Některé zdroje uvádějí [3], že fosfor lze získávat pouze z popela po monospalování. Spoluspalováním je nejčastěji myšleno přidávání kalů do cementářských pecí či fluidních topenišť, kde je podíl kalu naprosto minimální. Při spoluspalování ve vhodném poměru s plasty, které mají velice nízký obsah popelovin, k výraznému snížení koncentrace fosforu v popelu nedochází. Obsah fosforu (forma P_2O_5) v popelu z konkrétního vzorku čistírenského kalu použitého pro výpočty byl 23 hm. % [45]. Za předpokladu, že v tuhém zbytku z plastového odpadu není obsažen žádný fosfor, dojde ke snížení obsahu P ve výsledném popelu na 18,6 %. Pokud by bylo složení výsledného popela prověřeno a došlo by k vyloučení negativního vlivu při aplikaci na půdy je varianta 3 ekvivalentní variantě 2, přičemž dojde k úspoře jednoho spalovacího zařízení a zásadnímu poklesu investičních nákladů.

Dodatečným kritériem při rozhodování mezi variantami může být požadovaný výkon kotle. Vyššího výkonu bude dosahováno ve variantách 2 a 3, neboť je uvolňováno teplo ze spalování obou materiálů. Výkon kotle ve variantě 1 je nižší a je možné ho regulovat množstvím vysoušeného kalu. Pára představuje zdroj energie umožňující široké využití, ať už v samotné technologii zpracování odpadů, technologii čistírny odpadních vod (např. ohřev kalu před odvodněním), k jiným účelům v areálu či blízkém okolí nebo v systému centrálního zásobování teplem.

Neméně důležitým hlediskem jsou potřebné náklady na pořízení a provoz instalovaného zařízení. Levnější řešení představují varianty 1 a 3, neboť obsahují pouze 1 spalovací zařízení. Investiční náklady jsou nejvyšší u varianty 2, ale v porovnání s pořízením oddělených technologií (v ekonomické části jako varianta 4) je dosaženo úspory ve společném systému čištění spalin. Varianta 2 přináší příjmy z prodeje výsledného upraveného popela.

Z porovnání jednoznačně vyplývá, že pokud se obec vypořádává s oběma druhy uvedených odpadů, o propojení technologií se vyplatí uvažovat, a to jak z ekonomického, tak technického hlediska. Oddělené zpracování je nejnákladnější a v obou technologiích jsou problémová místa, která se daří integrací řešit (příliš vysoká výhřevnost plastů, nestabilní a ztrátový proces spalování kalů, vysoké emise ve spalinách pocházejících z monospalování kalů).

Vzájemné porovnání všech variant nabízí **obrázek**, přičemž porovnání je provedeno pro jednotné množství zpracovávaných odpadů a je sledováno, jak se způsob integrace projeví na parametrech v technologii.

Tabulka 10.1 Porovnání variant 1–3¹⁾

Varianta integrace	1	2	3	Závisí na	Má vliv na
Množství spalin do sušárny [Nm ³ /h]	9500	10740	10780	množství vysoušeného kalu, míře vysušení	výkon ventilátoru, velikost sušárny
Množství výsledného produktu ²⁾	174	57	71 ³⁾		výši příjmů z prodeje
Rosný bod spalin [°C]	116,7	142,6	140,7	složení spalin	komínovou ztrátu, riziko koroze
Obsah vody ve spalinách za sušárnou [obj. %]	29,8	27,1	25,6	množství vysoušeného kalu, míře vysušení, průtoku sušicího média, vlhkosti v palivu	rosný bod spalin, riziko koroze
SO _x ve spalinách [ppm]	500	112	99	obsahu síry v palivu	
Tepelný výkon kotle [kW]	2063	2506	2428	množství vysoušeného kalu, výhřevnosti paliva, objemu recirkulovaných spalin	schopnost pokrytí energetických nároků provozovatele
Množství páry [kg/h] 7 bar, 165 °C	3558	4324	4188	výkonu kotle	

1) jednotné vstupy: 330 kg/h plastu, 850 kg/h kalu, sušení na 90 % sušiny

2) sušený kal nebo upravený popel s obsahem P

3) možnost využití je třeba prověřit

Zařízení je vhodné umístit přímo do místa vzniku likvidovaného odpadu, čímž dojde k eliminaci nebo alespoň minimalizaci nákladů na dopravu. V tomto případě se jeví jako vhodný areál ČOV. Převoz lisovaného plastového odpadu je méně komplikovaný než přeprava odvodněného kalu. Zdrojem plastového odpadu může být například třídící linka (výmět) nebo závod zpracovávající plasty (materiálově nevyužitelné zbytky).

11 ZÁVĚR

Kaly z čistíren odpadních vod ani plastový odpad nejsou v energetice běžně používaná paliva. Přesto se vzhledem k jejich vysoké produkci nabízí je energeticky využívat. Spalování čistírenských kalů zatím nemá v ČR výrazné zastoupení a z důvodu nízké výhřevnosti je bez předpokladu a použití přídavného paliva obtížné dosáhnout stabilního procesu. Vysoká výhřevnost plastu naopak může být při samostatném spalování problematická. Spojení obou procesů do jednoho bylo předmětem předkládané diplomové práce.

Jelikož kal z odpadních vod se týká zaměření energetického ústavu pouze okrajově, byla v rámci práce provedena rešerše v oblasti čištění odpadních vod a nakládání s čistírenským kalem. Energetické využití plastů bylo porovnáno s ostatními metodami zpracování tohoto odpadu. Důležitým krokem bylo zmapování související legislativy, z níž vyplynula doporučení a omezení pro další návrhy. Byly představeny oddělené technologie pro zpracování řešených odpadů vyvinuté společností EVECŮ Brno a na základě těchto znalostí bylo přistoupeno k návrhu a porovnání 3 variant jejich integrace. Motivací práce bylo nalezení v ČR chybějícího efektivního způsobu likvidace uvedených odpadů.

Největší přínos propojení termického zpracování kalu právě s plastovým odpadem spočívá ve velkém množství energie, které se během spalování plastu uvolní a které je schopné pokrýt vysoké energetické nároky sušárny. Propojení sušičky přímo se spalováním vysušených kalů je sice možné, ale bez přídavného paliva se stabilního procesu dosáhnout nedaří¹².

Ve všech 3 navržených variantách je teplo uvolněné spalováním plastového odpadu použito k sušení čistírenského kalu, míra dalšího propojení se již liší. Ve variantě 1 je vysušený kal následně předáván k dalšímu upotřebení v zemědělství k hnojícím účelům (pouze v případě splnění limitů výskytu těžkých kovů a dalších toxických látek). Ve variantě 2 dochází ke spalování vysušeného kalu, přičemž obě spalovací komory jsou odděleny a k propojení dochází kromě prostoru sušárny také v systému čištění spalin. Varianta 3 představuje největší míru propojení, neboť odpady jsou smíšeny již na vstupu do spalování.

Zhodnocení a porovnání jednotlivých variant s oddělenými technologiemi i mezi sebou navzájem bylo provedeno na základě materiálových a energetických bilancí v programu W2E. Pro analýzu bylo zvoleno 850 kg/h kalu, které odpovídá produkci ČOV s cca 33000 EO, a 333 kg/h plastového odpadu. Složení odpadů bylo převzato z veřejně dostupné internetové databáze paliv. Složení reálného paliva se může lišit. V rámci návrhu bylo přistoupeno k mnohým zjednodušením, která rovněž mohou vést ke zkreslení výsledků.

Nejlepším a nejkompaktnějším řešením se jeví varianta 2, jejíž přidanou hodnotou je v případě dávkování činitelů i možnost získávání cenného produktu v podobě popela s vysokým obsahem biodostupného fosforu. Pořizovací náklady varianty integrace č. 2 nejsou nejnižší, ale dá se očekávat zakotvení povinnosti na získávání fosforu z kalů v legislativě a pak by z prodeje výsledného produktu plynuly jisté příjmy¹³. Významná ložiska primárních zdrojů fosforu se na území EU nenacházejí. Vzhledem k rostoucí poptávce po hnojivech vzrůstá potřeba využití na fosfor bohatých sekundárních zdrojů, jímž čistírenský kal bezesporu je.

Z ekonomického hlediska se jeví jako nejvýhodnější varianta 1 (nejnižší pořizovací i provozní náklady), otázkou je však udržitelnost tohoto řešení do budoucna. Sušení sice zajišťuje úplnou stabilizaci a hygienizaci kalu, ale neodstraňuje rizika spojená s kontaminací půd těžkými kovy nebo dalšími obsaženými látkami, jejichž dopad na životní prostředí zatím není znám (xenobiotika, mikroplasty, kosmetické a čisticí prostředky, léčiva, ...). V případě úplného

¹² Zkušenosti EVECŮ Brno.

¹³ Rentabilita závisí na vývoji cen za primární zdroje fosforu využívané k výrobě hnojiv.

zákazu aplikace kalů na zemědělské půdy¹⁴ bude nutné v případě varianty 1 předávat vysušený kal spalovně, s čímž mohou být spojeny náklady za jeho likvidaci.

Přímá aplikace kalů na zemědělské půdy, případně kompostování bylo dosud nejčastějším způsobem nakládání s výstupem z ČOV. V souvislosti se změnami v legislativě ČR i legislativách okolních států (Německo, Rakousko) přistupují především velké ČOV postupně k termickému zpracování kalů. Využití alternativního zdroje energie, úspora primárních paliv a minimalizace rizik spojených s kontaminací půd patří mezi jeho hlavní výhody.

Komplexní přístup a zahrnutí perspektivní metody zpětného získávání fosforu z popela do plánovaného řešení kalové koncovky již od počátku návrhu může představovat velkou výhodu oproti technologiím, které řeší pouze aktuální situaci a nesnaží se při návrhu předvídat budoucí vývoj.

¹⁴ Z důvodu předběžné opatrnosti mnohé státy zakazují nebo již zakázaly využití kalů v zemědělství [59]

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Vyhláška č. 437/2016 Sb. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-437>.
2. Carrington, Damian. Phosphate fertiliser 'crisis' threatens world food supply. *The Guardian*. [Online] 6. 9. 2019. [Citace: 2. 3. 2020.] <https://www.theguardian.com/environment/2019/sep/06/phosphate-fertiliser-crisis-threatens-world-food-supply>.
3. Pohořelý, Michael, Jaroslav Moško, Michal Šyc, Šárka Václavková, Siarhei Skoblia, Zdeňek Beňo, Karel Svoboda. *Materiálové a energetické využití suchého stabilizovaného čistírenského kalu*. 2018. Dostupné z: http://www.cpga.cz/files/prednasky/1806_KAO_Pohorely_full_text.pdf.
4. Hlavínek, Petr, Jan Mičín, Petr Prax. *Stokování a čištění odpadních vod*. Brno : CERM, s.r.o. Brno, 2003. ISBN 80-214-2535-0.
5. Zákon o vodách 254/2001 Sb., par. 38.
6. Vítěz, Tomáš, Bořivoj Groda. *Čištění a čistírny odpadních vod*. Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. ISBN 978-80-7375-180-7.
7. ECO trend Research centre, s.r.o. Optimalizace nakládání s kaly z komunálních čistíren odpadních vod: Oddíl III - Návrhová část. Praha, 2015.
8. ČSN EN 14346. *Charakterizace odpadů - Výpočet sušiny stanovením podílu sušiny nebo obsahu vody*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007. Třídící znak: 838016.
9. ČSN EN 15169. *Charakterizace odpadů - Stanovení ztráty žíháním v odpadech, kalech a sedimentech*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007. Třídící znak: 838026.
10. Dohányos, Michal. Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. *Biom.cz*. [Online] [Citace: 28. únor 2020.] <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>.
11. Evropský úřad IPPC. *Integrovaná prevence a omezování znečištění: Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování odpadů*. 2005. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecistení/referencni-dokumenty-bref/2017/1/20080407_BREF_WI_CZ_final.pdf.
12. Kutil, Josef, Michal Dohányos. Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. *Biom.cz*. [Online] 5. 1. 2005. [Citace: 28. 2. 2020.] <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu-2>.
13. Lenfeld, Petr. Zpracování plastů. *Technologie II*. [Online] Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie. [Citace: 27. 3 2020.] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm.
14. What are Plastics. *Plastics Europe*. [Online] 2020. [Citace: 28. 3 2020.] <https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/what-are-plastics>.
15. Vyhláška č. 93/2016 Sb. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-93?text=katalog+odpad%C5%AF>.
16. Produkce, využití a odstranění odpadu - 2018. *Český statistický úřad*. [Online] 31. 10. 2019. [Citace: 18. 5. 2020.] <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2018>.
17. Jak třídíme plasty a jak se dále využijí. *ESTAV.cz*. [Online] 25. 2. 2016. [Citace: 18. 5. 2020.] <https://www.estav.cz/cz/2955.jak-tridime-plasty-a-jak-se-dale-vyuziji>.
18. Recyklační symboly plastů. *Samosebou.cz*. [Online] 15. 1. 2018. [Citace: 18. 5. 2020.] <https://www.samosebou.cz/2018/01/15/recyklačni-symboly-plastu/>.
19. IPPC, Evropský úřad. *Integrovaná prevence a omezování znečištění: Shrnutí Referenčního dokumentu o nejlepších dostupných technikách pro průmysl zpracování odpadů*. 2005. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc->

- integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2017/1/Preklad-BREF-Zpracovani-odpadu.pdf.
20. Plastic fraction (the Netherlands) (#1877). *Phyllis2 - database for (treated) biomass, algae, feedstocks for biogas production and biochar*. [Online] 1. 2. 2001. [Citace: 25. 4. 2020.] <https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis>.
21. Zákon č. 185/2001 Sb. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>.
22. Tomášková, Hana. Aktuálně o odpadových zákonech. *Komunální ekologie.cz*. [Online] 23. 10. 2019. [Citace: 29. 1. 2020.] <https://www.komunalniekologie.cz/info/aktualne-o-odpadovych-zakonech>.
23. Vyhláška č. 341/2008 Sb. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2008-341?text=skupiny>.
24. Vyhláška č. 383/2001 Sb. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-383>.
25. Zákon č. 156/1998 Sb. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1998-156/zneni-20171101>.
26. Vyhláška č. 474/2000 Sb. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-474>.
27. Zákon č. 201/2012 Sb. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>.
28. Vyhláška č. 415/2012 Sb. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>.
29. Vyhláška č. 294/2005 Sb. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2005-294?text=6%2C5%20MJ%2Fkg>.
30. Česko čeká velká odpadková revoluce, vláda dnes schválila novou odpadovou legislativu. *Ministerstvo životního prostředí*. [Online] 9. 12. 2019. [Citace: 10. 3. 2020.] https://www.mzp.cz/cz/news_20191207_cesko_cka_velka_odpadkova_revoluce_vlada_dnes_schvalila_novou_odpadovou_legislativu.
31. Ministerstvo životního prostředí. *Mýty vs. fakta o skládkování, vyjádření MŽP*. [online] dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/news_160505_zakon_odpady/\\$FILE/Myty_vs_fakta_fin.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/news_160505_zakon_odpady/$FILE/Myty_vs_fakta_fin.pdf).
32. Záznam z tiskové konference 19 svazů, asociací, firem a sdružení obcí a měst k nové odpadové legislativě. *Česká asociace odpadového hospodářství*. [Online] 28. 4. 2019. [Citace: 15. 2. 2020.] <http://www.caoh.cz/odborne-clanky-a-aktuality/zaznam-z-tiskove-konference-svazu-asociaci-firem-a-sdruzeni-obci-a-mest-k-nove-odpadove-legislative.html>.
33. Ministerstvo životního prostředí. *Plán odpadového hospodářství České republiky pro období 2014-2024*. Praha, 2014. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/poh_cr_prislusne_dokumenty/\\$FILE/OODP-POH_CR_2015_2024_schvalena_verze_20150113.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/poh_cr_prislusne_dokumenty/$FILE/OODP-POH_CR_2015_2024_schvalena_verze_20150113.pdf).
34. Základní informace o integrované prevenci a omezování znečištění. *Ministerstvo průmyslu a obchodu*. [Online] 1. 7. 2016. [Citace: 13. 2. 2020.] <https://www.mpo.cz/ippc/popis--177404/>.
35. Integrovaná prevence a omezování znečištění (IPPC). *CENIA*. [Online] 2018. [Citace: 13. 2. 2020.] <https://www.cenia.cz/odborna-podpora/ippc/>.
36. Evropský úřad IPPC. *Integrovaná prevence a omezování znečištění: Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích v systémech čištění odpadních vod a odpadních plynů a hospodaření s nimi v chemickém průmyslu*. 2002. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2017/1/cww_10-6-_complete.pdf.
37. Evropský úřad IPPC. *Integrovaná prevence a omezování znečištění: Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách v oblasti energetická účinnost*. 2008. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2017/1/BREF_ENE_Fin_Cerven_08_prekladCZ_cely.pdf.

38. Sirový, M. Sušení čistírenských kalů – teorie a praxe. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011.
39. Wanner, Filip. *Studie nakládání s čistírenskými kaly v České republice*. 2019. Sdružení oboru vodovodů a kanalizací ČR (SOVAK ČR). Dostupné z: <https://www.sovak.cz/sites/default/files/2019-11/SOVAK%20C4%8CR%20Studie%20nakl%C3%A1d%C3%A1n%C3%AD%20s%20C4%8Dist%C3%ADrensk%C3%BDmi%20kaly%20v%20C4%8CR%20FINAL.pdf>.
40. Změny v nakládání s kaly z čistíren odpadních vod. *enviweb.cz*. [Online] 12. 8. 2019. [Citace: 10. 2. 2020.] <http://www.enviweb.cz/114231>.
41. Lyčková, Barbora, Peter Fečko, Radmila Kučerová. *Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů*. Vysoká škola báňská. Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/ZpracovaniKalu/info.html>
42. Products, Commission expert group on Fertilising. *Phosphorus*. 2014. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/transparency/regexpert/index.cfm?do=groupDetail.groupDetailDoc&id=13639&no=26>.
43. Boráň, Jaroslav. *Zpracování kalů z čistíren odpadních vod s energetickým využitím*. BRNO, 2008. ISSN 1213-4198.
44. Kos Miroslav, Oto Zwettler. *Moderní technologie zpracování kalů s využitím tepla, prezentace v rámci 21. vodohospodářské výstavy 21.-23. 5. 2019*. 2019. Dostupné z: <https://www.sovak.cz/sites/default/files/2019-06/5%20-%20Kos-Zwettler%20-%20VOD-KA%202019%20final.pdf>.
45. Sewage sludge (#1178). *Phyllis2 - database for (treated) biomass, algae, feedstocks for biogas production and biochar*. [Online] 30. 3. 1998. [Citace: 25. 4. 2020.] <https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis>.
46. Drga, Pavel. *Charakteristické teploty popelovin*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019.
47. Kuraš, Mečislav, Vojtech Dirner, Vladimír Slivka, Milan Březina. *Odpadové hospodářství*. Chrudim : Ekomonitor, 2008. ISBN 978-80-86832-34-0.
48. Hemerka, Jiří, František Hrdlička. Emise z kotelen a ochrana ovzduší (I). *tzbinfo*. [Online] 20. 12. 2004. [Citace: 18. 2. 2020.] <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/2294-emise-z-kotelen-a-ochrana-ovzdusi-i>.
49. Krejčí, Tomáš. *Středotonážní spalovna odpadů - systém čištění spalin*. Brno : Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2015.
50. Jungmann, Jiří. Využívání alternativních paliv v cementárnách snižuje celkové emise ze spalování. *Odpadové fórum*. 2015, 4/2015, stránky 16-19. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/upload/pageFiles/of-04-2015-pdf.pdf>.
51. Šyc, Michal, Matěj Kruml, Michael Pohořelý, Karel Svoboda, Miroslav Punčochář. *Recyklace fosforu z popelu po spalování čistírenských kalů*. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2016/prispevky/304.pdf>.
52. Szołkowski, Matěj. *Recyklace fosforu z odpadních vod*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019.
53. *Use of Phosphate Rocks for Sustainable Agriculture*. 13, Rome : autor neznámý, 2004. ISBN 92-5-105030-9. Dostupné z: <http://www.fao.org/3/y5053e/y5053e0d.htm>.
54. Karmazín, Milan. Falešná recyklace Německa, kde končí tisíce tun plastového odpadu? *inODPADY*. [Online] 12. 8 2019. [Citace: 27. 3 2020.] <https://inodpady.cz/falesna-recyklace-nemecka-kde-konci-tisice-tun-plastoveho-odpadu/>.
55. Ghosh, Iman. Mapping the Flow of the World's Plastic Waste. *Visual Capitalist*. [Online] 3. 7. 2019. [Citace: 24. 5. 2020.] <https://www.visualcapitalist.com/mapping-the-flow-of-the-worlds-plastic-waste/>.

56. PlasticsEurope. *Plastics - the facts 2019, an analysis of European plastics production, demand and waste data*. 2019. [online]. Dostupné z: https://www.plasticseurope.org/application/files/1115/7236/4388/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf.
57. EKO-KOM. *Výroční shrnutí 2018*. 2018. [online]. Dostupné z: https://www.ekokom.cz/uploads/attachments/Obecne/Vyrocní_shrnutí_2018_EKO_KOM.pdf
58. Bielan, Petr. Výroba paliv ze směsných komunálních odpadů. *Odpadové fórum*. 2015, 4/2015, stránky 12-13.
59. Český statistický úřad. Produkce, využití a odstranění odpadů - 2018. [online]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2018>.
60. Gregor, J., a další. Hodnocení nákladů různých cest svozu a odvozu separovaných složek. *Odpady*. 2018. Sv. č. 2018/07, s. 25-26. ISSN: 1210-4922.
61. Plastové odpady se mění do syntetické ropy. *inODPADY*. [Online] 16. 5. 2019. [Citace: 18. 3. 2020.] <https://inodpady.cz/recyklace-plastove-odpady-se-meni-do-synteticke-ropy/>.
62. PlasticsEurope. *Plastics convert iron ore into steel - Feedstock recycling in blast furnaces*. Dostupné z: https://www.plasticseurope.org/application/files/7315/1703/6618/2009SeptPlastics_convert_iron_ore_to_steel.pdf.
63. Muznik, Sara. “Deliver or pay”, or how waste incineration causes recycling to slow down. *Zero Waste Europe*. [Online] 31. 10. 2017. [Citace: 24. 3. 2020.] <https://zerowasteurope.eu/2017/10/deliver-pay-waste-incineration-causes-recycling-slow/>.
64. Are we only a month away from an incineration tax? *United Kingdom Without Incineration Network*. [Online] 28. 9. 2018. [Citace: 24. 3. 2020.] <https://ukwin.org.uk/2018/09/28/are-we-only-a-month-away-from-an-incineration-tax/>.
65. prostředí, Ministerstvo životního. *Analýza přechodu komunálního odpadu na palivo z odpadu*. 2016. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/\\$FILE/OODP-4_6_MZP_FIN-20160810.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/OODP-4_6_MZP_FIN-20160810.pdf).
66. Ministerstvo zemědělství. Vybrané údaje majetkové evidence (VÚME) - Čistírný odpadních vod. *eAGRI*. [Online] 18. 7. 2019. [Citace: 20.. 6. 2020.]
67. Jaké jsou požadavky na hygienizaci kalu sušením. *Naše voda*. [Online] 14. 12. 2018. [Citace: 21. 4. 2020.] <https://www.nase-voda.cz/jake-jsou-pozadavky-na-hygienizaci-kalu-susenim/>.
68. Adamus, P. Zpracování čistírenských kalů. *Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, 2017.
69. Pohořelý M., Moško J., Šyc M., Václavková Š., Skoblia S., Beňo Z., Svoboda K. *Materiálové a energetické využití suchého stabilizovaného čistírenského kalu*.
70. The European Parliament and the Council of the European Union. *Směrnice 2000/76/ES o spalování odpadu*. [Online] 4. 12 2000. [Citace: 14. 3 2015.] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0076&from=CS>.
71. Systém EKO-KOM je na evropské směrnice připraven. *EKO-KOM*. [Online] 12. 12. 2019. [Citace: 20. 5. 2020.] <https://www.ekokom.cz/news/759/212/system-eko-kom-je-na-evropske-smernice-pripraven>.
72. Nejaktuálnější informace o balíčku k cirkulární ekonomice. *Institut cirkulární ekonomiky*. [Online] 2. 3. 2018. [Citace: 20. 5. 2020.] <https://incien.org/tag/balicek-k-obehovemu-hospodarstvi/>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AOX	-	halogenované organické sloučeniny
ASK	-	anaerobně stabilizovaný kal
AU	-	aktivní uhlí
BAT	-	nejlepší dostupné techniky
BREF	-	Referenční dokumenty o nejlepších dostupných technikách
CZT	-	centrální zásobování teplem
ČOV	-	čistírna odpadních vod
EKO	-	ekonomizér
EO	-	ekvivalentní obyvatel
EPS	-	pěnový polystyren
FSI VUT	-	Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně
HDPE	-	polyetylén o vysoké hustotě
IPPC	-	integrováná prevence a omezování znečištění
KO	-	komunální odpad
LDPE	-	polyetylén o nízké hustotě
PAU	-	polycyklické aromatické uhlovodíky
PET	-	polyetylentereftalát
PCB	-	polychlorované bifenyly
PCDD/F	-	polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany
PK	-	parní kotel
POH	-	plán odpadového hospodářství
POP	-	perzistentní organické látky
PP	-	polypropylen
PS	-	polystyren
PVC	-	polyvinylchlorid
RP	-	rotační pec
SCR	-	selektivně katalytická redukce
SK	-	spalovací komora
SKO	-	směsný komunální odpad
SNCR	-	selektivně nekatalytická redukce
SUŠ	-	sušárna
TAP	-	tuhé alternativní palivo
TOC	-	celkový organický uhlík
TEQ	-	toxický ekvivalent
TZL	-	tuhé znečišťující látky
W2E	-	Waste to Energy
ZEVO	-	zařízení k energetickému využití odpadu