



Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, člen ZSVTS, REHVA
Stavebná fakulta STU Bratislava, Katedra TZB
Slovenská komora stavebných inžinierov

zborník prednášok

z 31. medzinárodnej vedecko-odbornej konferencie

VYKUROVANIE 2023

na tému

**Energetické koncepcie a bezpečnosť
zásobovania teplom**



20. - 24. marec 2023

Horný Smokovec

ISBN 978 – 80 – 8284 – 006 – 6



Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, člen ZSVTS, REHVA
Stavebná fakulta STU Bratislava, Katedra TZB
Slovenská komora stavebných inžinierov

31. medzinárodná vedecko-odborná konferencia

VYKUROVANIE 2023

Energetické koncepcie a bezpečnosť zásobovania teplom

20. - 24. marec 2023

Horný Smokovec



PRÍHOVOR

31. medzinárodná vedecko-odborná konferencia VYKUROVANIE 2023

Vážení kolegovia,
Účastníci a sympatizanti konferencie Vykurovanie 2023.

Sme veľmi radi a tešíme sa, že už po pandemickej situácii sa môžeme konečne s Vami stretnúť, tento-krát už na 31. ročníku, tejto najvýznamnejšej konferencie v oblasti zásobovanie budov teplom, ktorá bude zameraná na nosnú tému, a to:

"Energetické koncepcie a bezpečnosť zásobovania teplom".

Nosnou časťou konferencie sú monotematické semináre na aktuálne témy, súčasne sme pripravili aj viaceré prezentácie, tak generálnych ako i hlavných partnerov konferencie, uskutoční sa výstavka popredných firiem v predmetnej oblasti, v neposlednom rade môžeme diskutovať za účasti mediálnych partnerov počas kávových prestávok. S prednáškami vystúpi okolo 100 odborníkov, pričom ich príspevky budú publikované v takmer 500 stránkovom zborníku, zároveň 35 popredných firiem bude prezentovať svoje výrobky, zariadenia a technológie.

Konferencia už tradične ponúka 13 samostatných seminárov v rámci 5 obsahovo ucelených monotematických dní, súčasne 4 aktuálne diskusné fóra, zároveň sa udelia ocenenia za celoživotný prínos v oblasti vykurovania, ako aj cena pre mladého odborníka.

Odborný program pozostáva z 5 samostatných celkov prislúchajúcich jednotlivým dňom:

- Energetika budov
- Progresívna výroba tepla
- Obnoviteľné zdroje energie
- Automatizácia vo vykurovaní
- Energetické služby

Konferencia je určená odborníkom z oblasti vykurovania a energetiky budov, projektantom, prevádzkovateľom, investorom, zástupcom bytových družstiev a podnikov, spoločenstvám vlastníkov bytov, predstaviteľov štátnej správy, školstva, vedy a výskumu.

Tešíme sa na príjemné chvíle počas 31. ročníka konferencie VYKUROVANIE 2023.

Prof. Ing. Dušan Petráš, PhD.
odborný garant konferencie

VIII. SEKCIA

ENERGETICKÉ ZHODNOTENIE ODPADU

vedie: doc. Ing. Ľudovít Kolláth, PhD.

- ❖ *David Jecha, Pavel Skryja,
Vladimír Brummer, Igor Hudák,
Jiří Bojanovský*
- ❖ *Martin Lisý*
- ❖ *Kamil Szymik*
- ❖ *Róbert Procházka*
- ❖ *Andrej Klačko, Michal Holubčík,
Jozef Jandačka*
- ❖ *Jaroslav Frantík, Jan Najser*
- ❖ *Kende Kocsis, Balázs Bokor*



SPALOVÁNÍ PALIVOVÝCH SMĚSÍ JAKO NÁHRADA FOSILNÍCH PALIV

Ing. David Jecha, PhD.

Ing. Pavel Skryja, PhD.

Ing. Vladimír Brummer, PhD.

Ing. Igor Hudák, PhD.

Ing. Jiří Bojanovský

Fakulta strojního inženýrství

VUT v Brně

Ústav procesního inženýrství

Technická 2, 616 69 Brno

e-mail: jecha@fme.vutbr.cz

Abstrakt

Nahrazování fosilních paliv jak v energetice, tak v teplárenství v dnešní době velké téma. Jedním z důvodů je plánovaný odklon od spalování uhlí a druhým je přechod na novější technologie s nižší produkcí emisí. V návaznosti na tyto aspekty je nutné se také zabývat novými typy vstupních surovin, které se musí dle platné legislativy odstraňovat jinak, než bylo zažité v minulých letech a jedním z možných řešení je spalování. Na základě těchto požadavků vzniklo palivo pro plánovaný provoz v energetice o složení dřevní biomasa, tuhé alternativní palivo (TAP) a čistírenský kal (ČK) jako záložní palivo bylo uvažováno uhlí. Pro různé směsi těchto paliv byly provedeny spalovací zkoušky v rotační peci a následně vyhodnoceny výsledky měření jak samotného procesu spalování tak posouzení vzniklých spalin s důrazem na znečišťující látky.

1. ÚVOD

Na zkušebně hořáků a pecí Ústavu procesního inženýrství FSI Vysokého učení technického v Brně proběhlo několik spalovacích poloprovozních zkoušek. Účelem těchto zkoušek bylo ověřit možnosti spalování nových palivových mixů. S ohledem na vývoj trhu byly vybrány tři palivové směsi čistírenského kalu a tuhé alternativního paliva TAP. Cílem bylo získat provozní zkušenosti s těmito palivovými mixy s ohledem na vlastní proces hoření, emisní tvorbu a zanášení teplosměnných ploch výměníku tepla. Získaná data jsou také použita jako vstupní okrajové podmínky pro simulační tepelné výpočty a CFD analýzu proudění

2. PALIVA

Pro spalovací zkoušku tuhých alternativních paliv (dále TAP) byla zvolena paliva ASAPAL a kal z ČOV. Spalovací zkouška zahrnovala dílčí zkoušky spalování samostatných paliv a dále

spalování tří směsí těchto paliv. Směs MIX I byla namíchána v poměru 90% hm. ASAPAL a 10% hm. kalu z ČOV, směs MIX II v poměru 70 : 30 % hm. a směs MIX III v poměru 50 : 50 % hm.

Tuhé alternativní palivo (TAP) definuje norma ČSN EN 15357 [1]. TAP je tuhé palivo připravené z odpadu, který není klasifikován jako nebezpečný, použitelné pro energetické využití ve spalovnách nebo spoluspalovacích zařízeních a splňující požadavky na klasifikaci a specifikaci stanovené v EN 15359.

Evropská norma EN 15359 je obsažena v české verzi normy ČSN EN 15359 [2]. Cílem normy je poskytnout jednoznačné a jasné principy klasifikace a specifikace TAP. TAP jsou vyrobená z odpadů neklasifikovaných jako nebezpečné. Vstupní odpad může být specifickým odpadem z výroby, tuhým komunálním odpadem, průmyslovým odpadem, obchodním odpadem ze staveb a demolic, čistírenský kal atd. TAP patří do heterogenní skupiny paliv. Norma zahrnuje všechny typy TAP. Cílem výroby TAP je jeho použití pro výrobu energie při nejvyšší možné energetické účinnosti.

K hlavním charakteristikám TAP patří:

- a) ekonomická charakteristika (výhřevnost)
- b) technická charakteristika (obsah chloru)
- c) environmentální charakteristika (obsah rtuti)

Systém klasifikace TAP (Tab. 1) je založen na limitních hodnotách pro tři charakteristiky paliva:

- průměrné hodnoty výhřevnosti (ar)
- průměrné hodnoty obsahu Cl (d)
- mediánu a 80. percentilu hodnot obsahu HG (ar)

Každá charakteristika je rozdělena do pěti tříd. TAP musí být přiřazeno číslo třídy od 1 do 5. pro každou charakteristiku.

Tab. 1 Systém klasifikace pro tuhá alternativní paliva

Klasifikační charakteristika	Statistická míra	Jednotka	Třídy				
			1	2	3	4	5
Výhřevnost (NCV)	průměrná hodnota	MJ/kg (ar)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Chlor (Cl)	průměrná hodnota	% (d)	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3,0
Rtuť (Hg)	medián	mg/MJ (ar)	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50
	80. percentil	mg/MJ (ar)	≤ 0,04	≤ 0,06	≤ 0,16	≤ 0,30	≤ 1,00

Čistírenský kal (Obr. 1) pocházel z čističky odpadních vod v Karlových Varech. Tato čistička zpracovává pouze komunální vody. Kal prošel mezofilním vyhníváním po dobu 60 dnů při teplotě do 40 °C. Kal byl dále odstředěn a sušen po dobu 2 hodin při teplotě 90 °C. Finální vlhkost peletizovaného kalu byla naměřena na hodnotě kolem 6,5 hm. %. Rozměr peletek je 3 mm v průměru, zatímco jejich délka se pohybuje v rozmezí od přibližně 2 do 40 mm. Původ tohoto kalu z oblasti s přítomností vysoce minerálních vod je příčinou jeho zvýšeného obsahu arzenu.



Obr. 1 Fotografie čistírenského kalu

Výsledky palivové analýzy jednotlivých složek včetně palivových směsí souhrnně uvádí Tab. 2.

Tab. 2 Palivová analýza dílčích složek a směsí

Podíl paliva			TAP	KAL	MIX I	MIX II	MIX III
Podíl z uvolněného tepla	TAP	%	100	0	95,9	85,9	72,3
	KAL ČOV	%	0	100	4,1	14,1	27,7
Hm. podíl složky	TAP	% hm.	100	0	90	70	50
	KAL ČOV	% hm.	0	100	10	30	50
Charakteristika			TAP	KAL	MIX I	MIX II	MIX III
Obsah vody		% hm.	0,08	6,38	0,71	1,97	3,23
Popeloviny		% hm.	3,76	40,71	7,46	14,85	22,24
Obsah hořlaviny		% hm.	96,16	52,91	91,84	83,19	74,54
Elementární složení hořlaviny	C	% hm.	66,83	53,06	65,45	62,70	59,95
	H	% hm.	9,10	7,97	8,99	8,76	8,54
	N	% hm.	0,18	6,98	0,86	2,22	3,58
	O	% hm.	23,83	29,26	24,37	25,46	26,55
	S	% hm.	0,06	2,72	0,33	0,86	1,39
LHV _{20, původní vlhké palivo}		MJ/kg	29,13	11,15	27,33	23,74	20,14

3. POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ

Experimentální zařízení se nachází na zkušebně hořáků a pecí Ústavu procesního inženýrství FSI VUT v Brně. Jedná se o rotační pec o délce 5 m a vnitřním průměru spalovací komory 400 mm. K ohřevu pece slouží plynový automatový hořák PBS APH-M02PZN o výkonu 220 kW. Kontinuální přísuv vsázky zajišťuje šnekový dopravník o příkonu 370 W s průměru šneku 50 mm. Odvod popílku je zajištěn gravitačním spádem do nerezové popelnice na druhé straně pece. Sklon pece lze měnit v rozsahu od 0 do 16 °. Otáčky pece lze nastavit v rozsahu od 0, 1 do 6 otáček za minutu. Maximální teplota uvnitř pece je přibližně 1200 °C, záleží však na charakteru procesu. Zanášení potrubních tras a teplosměnných ploch je hodnoceno na trubkovém chladiči, který je umístěn ve spalinové cestě nad rotační pecí. Konstrukce je navržena s ohledem na účel jeho použití, tedy vyhodnocení míry zanášení na teplosměnných plochách. Strana vody je rozdělena do čtyř sekcí, které jsou nezávisle na sobě demontovatelné. Chladič umožňuje souproudé i protiproudé uspořádání průtoků spalin a chladicí vody pro souproudý i protiproudý provoz rotační pece. Pro najíždění a dochlazování pece, ale i pro další režimy, kdy není průchod spalin chladicí částí chladiče žádoucí, je chladič

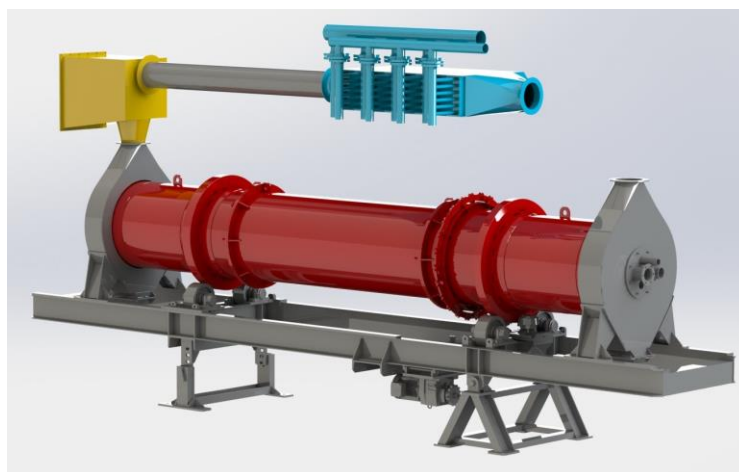
opatřen obtokem spalín (bypasssem). Během všech zkoušek byl použit protiproudý režim, kdy chladicí voda vstupovala na protilehlé straně než spaliny.

Vyhodnocení účinnosti zachytávání TZL v trubkovém chladiči je umožněno pomocí dvou speciálně navržených inspekčních otvorů. Jedná se o příruby, které umožňují připojení aparatury pro měření TZL i dalších sond viz Obr. 2. Aby bylo možné vyhodnotit zachytávání částic TZL samostatně v trubkovém chladiči, nachází se příruby před a za chladičem. Jejich umístění je zvoleno tak, aby bylo dodrženo pravidlo 5 průměrů před a 3 průměrů za měřicím bodem. Toto pravidlo umožňuje dosáhnout homogenního proudění uvnitř potrubí s cílem minimalizace chybového měření. Uspořádání měřicích bodů pro měření TZL umožňuje vyhodnocení míry tvorby nálepů na trubkách spalínového chladiče. Spalinová potrubní trasa je dále opatřena dvěma průchodkami G1 pro měření dalších parametrů spalín. Příkladem využití těchto průchodek může být měření fluoridů a chloridů ve spalínách.



Obr. 2 Příruba pro odběr spalín

Konečné uspořádání experimentálního zařízení je patrné z Obr. 3. Spaliny po průchodu chladičem prochází přes další odběrné místo do filtru, spalínového ventilátoru a dále do komínu.



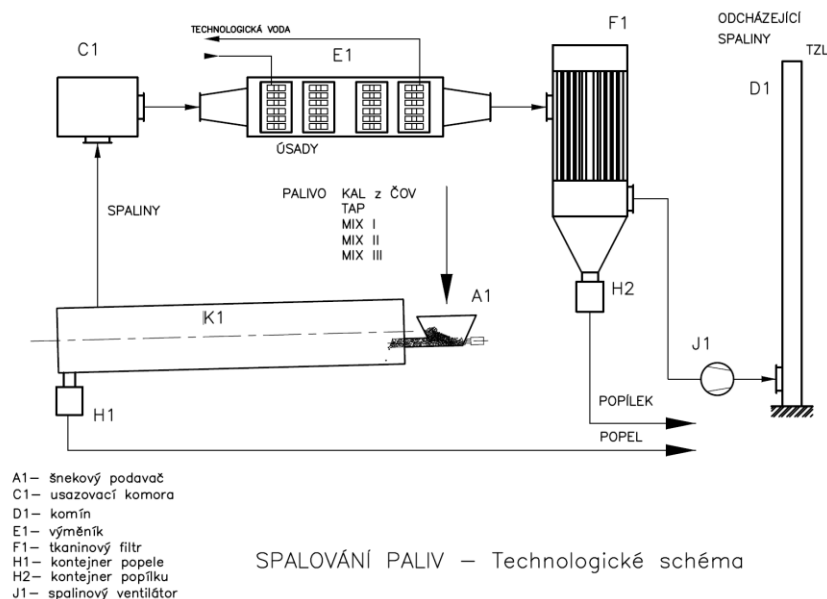
Obr. 3 Dispozice experimentální jednotky včetně chladiče spalín

5. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Technologické schéma rotační pece, kde vyly spalována paliva, je znázorněno na Obr. 4. Jednotlivá paliva (KAL z ČOV, TAP, MIX I, MIX II a MIX III) byla dávkována šnekovým

podavačem A1 do rotační pece K1. V rotační peci K1 byla paliva spalována při teplotách 634 – 1174 °C v závislosti na vlastnostech právě spalovaného paliva. Vznikající spaliny odcházely spalinovým potrubím přes usazovací komoru C1 do výměníku E1, který byl chlazen vodou. Výměník E1, sloužil k analýze zanášení teplosměnných ploch spaliny. Spaliny po průchodu výměníkem byly vedeny do tkaninového filtru F1, kde docházelo k zachytu prachových částic. Z filtru F1 do komínu D1 byly spaliny odtahovány ventilátorem J1, který zajišťoval podtlak v celé jednotce.

Popeloviny byly shromažďovány v kontejnerech. Popel z rotační pece K1 v byl zachycován do kontejneru H1 a popílek z tkaninového filtru F1 do kontejneru H2. Pro bilanční analýzu byl popel a popílek vážen, úsady ve výměníku jsou vypočítány z emisního měření TZL.



Obr. 4 Spalování paliv - Technologické schéma

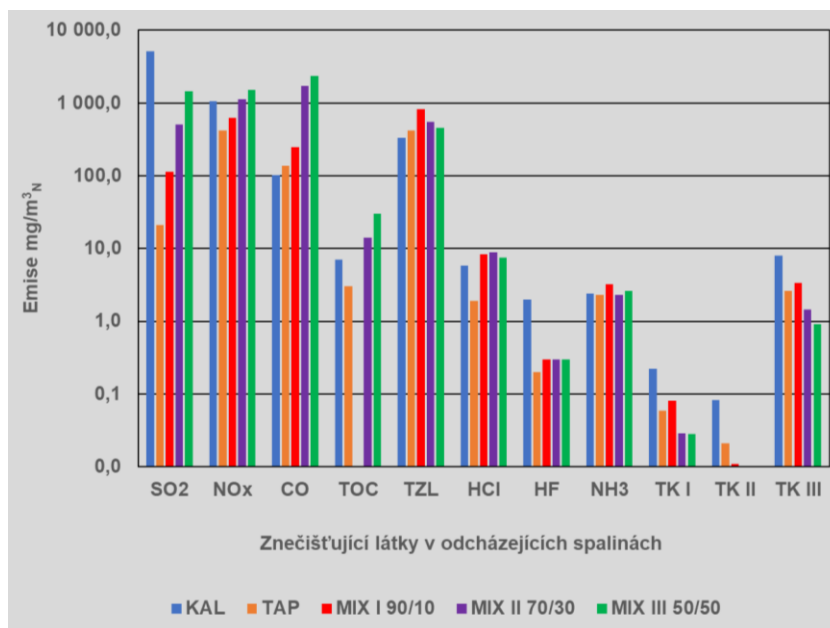
V celém průběhu spalování tuhých alternativních paliv (TAP, kal z ČOV a jejich mixů) byla prováděna měření znečišťujících látek v odcházejících spalinách a odběry pro jednorázová měření. Jedná se o:

1. kontinuální měření plyných znečišťujících látek O_2 , CO , SO_2 , NO_x a TOC ,
2. jednorázová měření NH_3 , Cl , TZL pro analýzu (analýzu provádí firma ALS Czech Republic, s. r. o.)
3. jednorázová měření těžkých kovů ($Cd+Tl$, Hg a její sloučeniny, $Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V$ a jejich sloučeniny pro analýzu (provádí firma ALS Czech Republic, s. r. o.).

Souhrnné výsledky kontinuálního měření emisí CO , SO_2 , NO_x a TOC v odcházejících spalinách při spalování paliv TAP, KAL z ČOV a jejich směsí jsou uvedeny v Obr. 5 V tomto obrázku jsou rovněž uvedeny výsledky jednorázových měření emisí TZL , HCl , NH_3 ve spalinách.

Při spalování odpadů je dle příslušné legislativy hladina referenčního kyslíku stanovena na 11 %, zatímco u spalování biomasy na 6 %. Pro možnost jednoduššího srovnání emisních výsledků tohoto navazujícího projektu s původními experimenty provedenými i s biomasou v roce 2020, byla zachována hodnota referenčního kyslíku 6 %.

U kontinuálního měření se jedná se o třicetiminutové střední hodnoty koncentrací naměřených znečišťujících látek přepočtených na suchý plyn za normálních podmínek (teplota 0°C, tlak 101 325 Pa) vztažených na referenční O_2 6 %.



Obr. 5 Koncentrace znečišťujících látek při spalování paliv

4. ZÁVĚR

Cílem spalování paliv bylo nalézt takové spalovací podmínky, aby bylo dosaženo rovnoměrného teplotního zatížení rotační pece, aby nedocházelo k tvorbě taveniny a následně k nálepům na vnitřních stěnách spalovacího prostoru a aby došlo k maximální míře dohoření spalovaného paliva.

Nejprve byly provedeny spalovací zkoušky s dílčími složkami palivové směsi a poté s jejich směsí. Spalování ČK (tepelný výkon 65 kW) probíhalo při teplotách do 970 °C, výkon přídavného hořáku na zemní plyn byl 27 kW. Při těchto teplotách nebyl pozorován sklon k natavování popelu, nedopal v popelu byl do koncentrace 1 hm. %. Zdržná doba byla odhadnuta na 3 hodiny. Tyto spalovací podmínky lze označit pro spalování ČK jako vhodné (nenatavení popela, vysoká míra vyhoření částic).

Hlavním výsledkem všech měření bylo stanovení znečišťujících látek ve spalinách odcházejících z rotační pece. Tyto informace dále poslouží k návrhu vhodné technologie čištění spalin. Většina sledovaných polutantů v tomto bodě technologie překročila stanové emisní limity. Z měření vyplývá, jaké jsou výstupní koncentrace, a dle informací o legislativě lze vypočítat, s jakou účinností budou potřeba navrhnout nové technologie čištění spalin. Dalším benefitem je možnost vyvodit z měření jednotlivých paliv a mixů korelace složení paliva versus koncentrace znečišťujících látek např. že emise SO₂ přímo závisí na hmotnostním zastoupení čistírenského kalu v palivu.

Poděkování

Tento článek vznikl v rámci projektu číslo CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008413 „STRATEGICKÉ PARTNERSTVÍ PRO ENVIRONMENTÁLNÍ TECHNOLOGIE A PRODUKCI ENERGIE“ za finanční podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v OP Výzkum, vývoj a vzdělávání.

Literatura

- [1] ČSN EN 15357: Tuhá alternativní paliva - Terminologie, definice a popis. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011,36s.
- [2] ČSN EN 15359: Tuhá alternativní paliva - Specifikace třídy. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012,24s.



ENVIRONMENTÁLNÍ ASPEKTY SPALOVÁNÍ ALTERNATIVNÍCH PALIV V LOKÁLNÍCH ZDROJÍCH

Ing. Martin Lisý, PhD.

Fakulta strojního inž., VUT v Brně

Energetický ústav

Technická 2896/2

61669 Brno, Česká republika

e-mail: lisy@fme.vutbr.cz

Abstrakt

Hmotnostní koncentrace prachových částic ve spalínách je z environmentálního hlediska jedním z hlavních sledovaných faktorů při spalování tuhých biopaliv. Pro komplexní vyhodnocení dopadu prachových částic na životní prostředí je dále vhodné tato měření doplnit jejich velikostní distribucí, morfologií a prvkovým složením. V rámci studie byly tyto faktory souběžně sledovány při spalování tří různých biopaliv: smrkového dřeva, slunečnicových slupek a zbytků ze zpracování kukuřice. Zdaleka nejvyšší koncentrace byly naměřeny při spalování slunečnice ($375,2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Při spalování dřeva byly koncentrace podstatně nižší ($28,2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$), u kukuřice potom $177,2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Dále bylo zjištěno, že provoz kotle na sníženém výkonu má vliv nejenom na celkovou hmotnostní koncentraci, ale i na velikostní distribuci prachových částic.

1. ÚVOD

Prachové částice jsou jedním z hlavních polutantů ze spalování tuhých paliv. Nejčastěji je sledována jejich celková hmotnostní koncentrace ve spalínách. Pro komplexní vyhodnocení je však vhodné tento údaj doplnit i měřením velikostní distribuce prachových částic, jejich morfologií a prvkovým složením. Tyto faktory mohou napomáhat při návrhu systému odlučování částic, při zhodnocení jejich dopadu na životní prostředí apod. V posledních letech dále roste zájem o energetické využití nedřevní biomasy, a to i v kontextu domovního vytápění [1,8]. Prachové částice ze spalování nedřevní biomasy se často svým složením a velikostní distribucí liší od částic vzniklých spalováním dřeva.

Při garančních měřeních kotlů pro domovní vytápění jsou běžně sledovány dva provozní stavy: nominální výkon a redukovaný výkon, který dle platné normy ČSN EN 303-5 představuje 30 % nominálního výkonu. Směrnice pro Ekodesign navíc přikládá emisím produkovaným za sníženého výkonu vyšší podíl než za nominálního, a to 85 %. Emisím na různých výkonových hladinách kotle se již některé studie věnovaly [2-4], avšak ne vlivem těchto provozních režimů na velikostní distribuci prachových částic. K tomuto cíli byl v rámci této studie použit nízkotlaký impaktor Dekati DLPI+. Obdobné zařízení bylo použito například

Yangem a kol. [5] při sledování částic ze spalování kukuřičných stonků, nebo Hanem a kol. [6] při sledování přenosu anorganické složky tuhých biopaliv. Pro zvolená paliva byla v této studii velikostní distribuce i hmotnostní koncentrace sledována jak za nominálního, tak za sníženého výkonu.

2. POPIS EXPERIMENTU

V rámci provedeného experimentu byly sledovány emise a vlastnosti prachových částic ze spalování tří tuhých biopaliv: smrkového dřeva, slunečnicových slupek a zbytků ze zpracování kukuřice. Smrkové dřevo a kukuřice byly dodány ve formě 6mm pelet, slunečnice ve formě pelet o průměru 8 mm. Sledovanými vlastnostmi prachových částic byly celková hmotnostní koncentrace ve spalínách stanovena v souladu s ČSN EN 13284-1, velikostní distribuce, morfologie a prvkové složení. V tomto příspěvku bude věnována větší pozornost celkové hmotnostní koncentraci, velikostní distribuci a plynným emisím ze spalování jednotlivých biopaliv.

2.1 Rozbory paliv

U všech paliv byly provedeny základní palivářské rozbory, tedy stanovení vlhkosti dle ČSN EN 18134-3, prchavé hořlaviny dle ČSN EN 18123 a popeloviny dle ČSN EN 18122. Spalné teplo a výhřevnost byly stanoveny v souladu s ČSN EN 18125. U všech paliv byl dále proveden prvkový rozbor pomocí analyzátoru CHNOS Elemental Analyzer. Rozbory paliv jsou uvedeny v následujících tabulkách 1 a 2.

Tab. 1 Hrubý rozbor paliv v surovém stavu

Xxxxxxx	Výhřevnost (MJ·kg ⁻¹)	Vlhkost (hm.%)	Popelovina (hm.%)
Dřevo	16,1	7,3	0,4
Slunečnice	16,0	11,5	7,9
Kukuřice	15,4	8,8	6,2

Tab. 2 Stanovení prchavé hořlaviny a prvkový rozbor hořlaviny

	Prchavá hořlavina (hm.%)	C (hm.%)	H (hm.%)	N (hm.%)	S (hm.%)	O (hm.%)	Cl (hm.%)
Dřevo	84,6	49,7	7,2	0,03	<0,003	43,0	<0,0005
Slunečnice	82,3	52,7	7,7	2,2	0,3	37,3	0,0046
Kukuřice	83,8	48,9	7,8	2,1	0,14	41,1	0,1065



Obr. 1 Pelety z jednotlivých biopaliv (zleva smrkové dřevo, slunečnice a kukuřice)

2.2 Provozní podmínky a plynné emise

Laboratorní měření byla realizována na automatickém kotli na tuhá paliva s roštovým hořákem. Měření byla provedena jak na nominálním výkonu (25 kW), tak i na výkonu sníženém (7,5 kW). Před samotným měřením byl vždy kotel uveden do stálého chodu na provozní teplotě, tj. 60 °C na vstupu a 75–85 °C na výstupu. Teplotní rozdíl byl regulován průtokem vody kotlem. Po ustálení měřeného výkonu a plynných emisí byly v cca dvouhodinovém okně provedeny potřebné odběry částic. Plynné emise byly měřeny v reálném čase analyzátozem Horiba VA-5000 series. Hodnoty plynných emisí byly zaznamenávány každých 5 sekund, hodnoty měřeného výkonu každé 3 sekundy. Udávané hodnoty plynných emisí a výkonu kotle byly stanoveny jako průměr měřených hodnot během vzorkování prachových částic. Plynné emise (měřeny v suchých spalínách a za normálních podmínek) byly dále přepočteny na referenční obsah kyslíku 10 % dle následujícího vztahu:

$$\text{koncentrace (ref.)} = \text{koncentrace (měřená)} \cdot \frac{21 - 10}{21 - O_{2, \text{měřená}}} \quad (1)$$

2.3 Vzorkování prachových částic

Vzorkování prachových částic bylo provedeno dvěma způsoby: manuální gravimetrickou metodou pro stanovení celkové koncentrace částic ve spalínách (v souladu s ČSN EN 13284-1) a pomocí nízkotlakého impaktoru Dekati HT-DLPI [7] pro stanovení velikostní distribuce. Vzorky odebrané manuální gravimetrickou metodou byly dále uschovány pro sledování morfologie prachových částic a pro stanovení jejich prvkového složení metodou ICP-OES.

3. VÝSLEDKY A DISKUZE

Průměrné koncentrace plynných emisí a prachových částic naměřené v obou režimech jsou pro všechna paliva uvedeny v následující tabulce. Z naměřených hodnot jde u všech paliv vidět výrazný rozdíl mezi nominálním a sníženým výkonem z hlediska chemického nedopalu, tedy emisí CO a TOC. Provoz na snížením výkonu obecně probíhá s vyšším přebytkem spalovacího vzduchu a za nižších teplot ve spalovací komoře, což má negativní dopad na kinetiku spalovacích reakcí. Největší rozdíl byl pozorován u slunečnicových pelet, kdy emise CO za sníženého výkonu nabývaly více než sedminásobných hodnot oproti výkonu

nominálnímu. Při spalování dřeva byl pozorovaný rozdíl v emisích CO minimální. Naopak emise TOC byly za sníženého výkonu podstatně nižší. U obou agropaliv byly pozorovány zvýšené emise NO_x a SO₂, což bylo vzhledem k jejich složení očekávané. Teploty v ohništi i přebytek vzduchu byly u všech sledovaných paliv obdobné, a to jak za nominálního, tak za sníženého výkonu. Lze tedy tvrdit, že emise NO_x u slunečnice a kukuřice pochází převážně z dusíku vázaného v palivech.

Tab. 3 Průměrné hodnoty plynných emisí a O₂, emisí prachových částic a výkonu kotle

	NO _x [mg·m ⁻³]	SO ₂ [mg·m ⁻³]	CO [mg·m ⁻³]	TOC [mg·m ⁻³]	Prachové částice [mg·m ⁻³]	O ₂ [obj.%]	Výkon [kW]
Dřevo (nominální)	143,4	2,4	290,2	1,72	28,2 ± 1,97	9,15	24,5
Dřevo (snížený)	152,4	6,7	284,7	6,5	68,8 ± 5,16	12,53	7,2
Slunečnice (nominální)	440,0	113,2	242,7	3,9	375,2 ± 26,24	9,91	25,3
Slunečnice (snížený)	576,6	128,8	1727,5	24,0	379,1 ± 22,73	12,13	7,8
Kukuřice (nominální)	723,5	115,9	218,7	3,4	177,2 ± 12,60	9,6	24,8
Kukuřice (snížený)	697,0	184	671,7	8,3	128,1 ± 3,65	11,11	7,6

Průměrné koncentrace prachových částic se napříč jednotlivými palivy také výrazně liší. U dřevních pelet byl pozorovaný nárůst oproti nominálnímu výkonu způsoben především vyšší úrovní nedopalu, a tedy vyšší produkcí sazí. To bylo pozorováno i na plynných emisích (CO a TOC). Nejvyšší průměrné koncentrace byly naměřeny při spalování pelet ze slunečnice. Zde byl rozdíl mezi nominálním a sníženým výkonem minimální. Vysoké koncentrace lze přisoudit především vyššímu obsahu popeloviny a chloru, neboť při spalovacích zkouškách docházelo k intenzivnímu zanášení kotle chloridem draselným (viz foto níže).

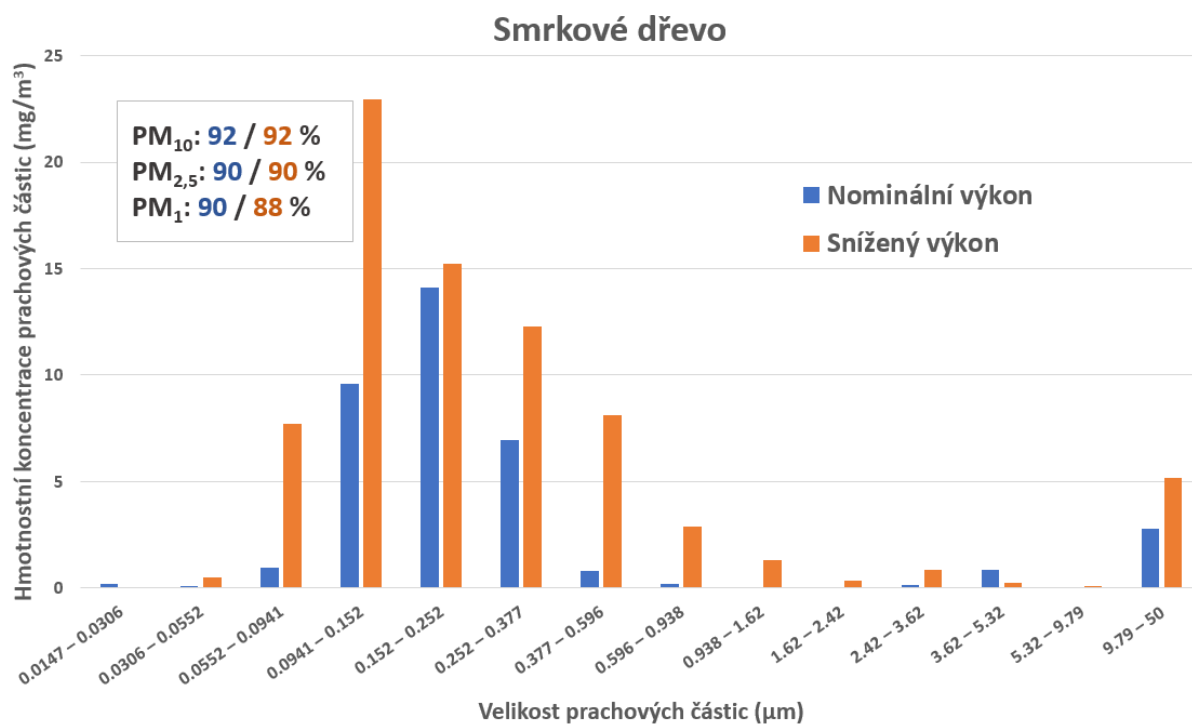


Obr. 2 Nánosy v prvním tahu kotle při spalování pelet ze slunečnice

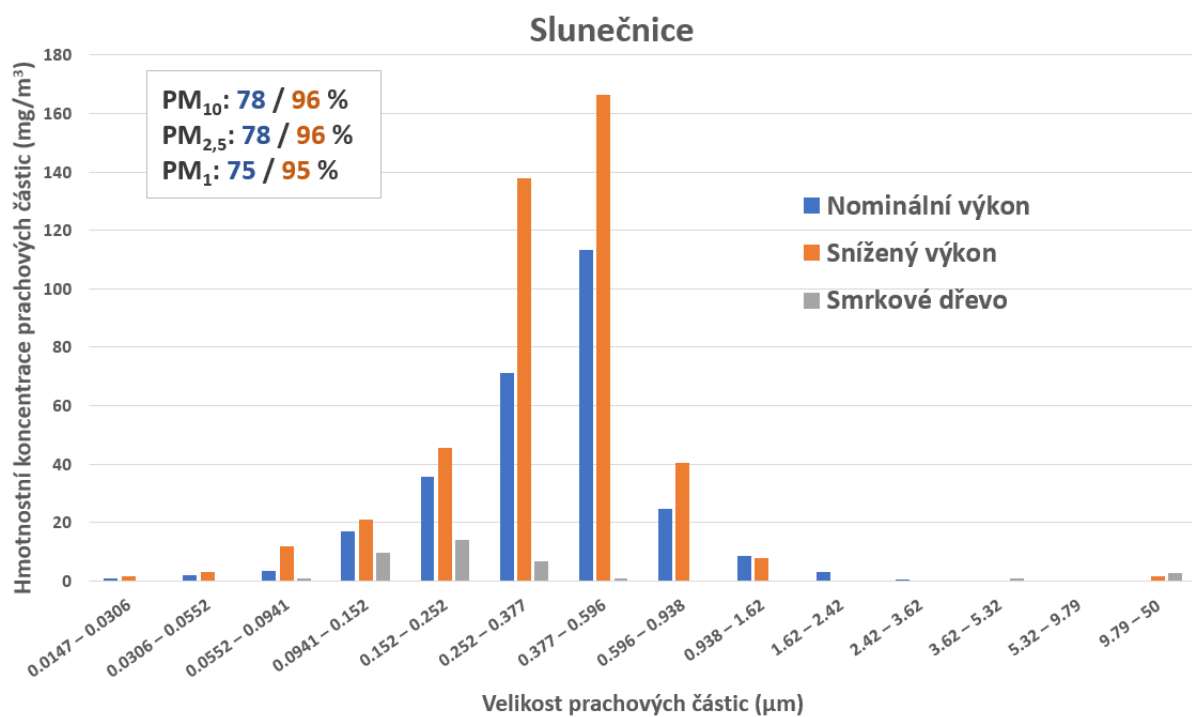
Stejně tak i deposity prachových částic na odebraných filtrech měly charakteristickou bílou barvu (oproti černým depositům u dřeva způsobených sazemi). Protože je chlorid draselný rozpustný ve vodě, daly by se celkové emise výrazně snížit podkročením rosného bodu spalin, popř. mokrou vypírkou. Tato řešení však dávají smysl až u kotlů s výrazně vyšším výkonem. U kukuřice byl za sníženého výkonu naopak pozorován pokles oproti průměrné koncentraci za nominálního výkonu. I zde se předpokládá vyšší zastoupení popílků v prachových částicích, ovšem za sníženého výkonu bylo pravděpodobně jeho uvolňování do proudu spalin omezeno.

Velikostní distribuce prachových částic je znázorněna v následujících třech schématech. Na horizontální ose je uveden rozsah ekvivalentního aerodynamického průměru jednotlivých pater impaktoru (μm), na vertikální ose potom hmotnostní koncentrace stanovená z navážky každého patra. Celková hmotnostní koncentrace ve spalinách je tak dána jako suma koncentrací jednotlivých pater. Protože však z principu funkce impaktor nezachytí všechny prachové částice, byla vždy celková koncentrace nižší oproti té stanovené referenční gravimetrickou metodou. V každém grafu je navíc uveden podíl prachových částic jednotlivých velikostí, tedy PM₁₀, PM_{2,5} a PM₁, tzn. podíl částic velikosti menší než uvedená hranice (v μm) na celkové hmotnostní koncentraci stanovené manuální gravimetrickou metodou.

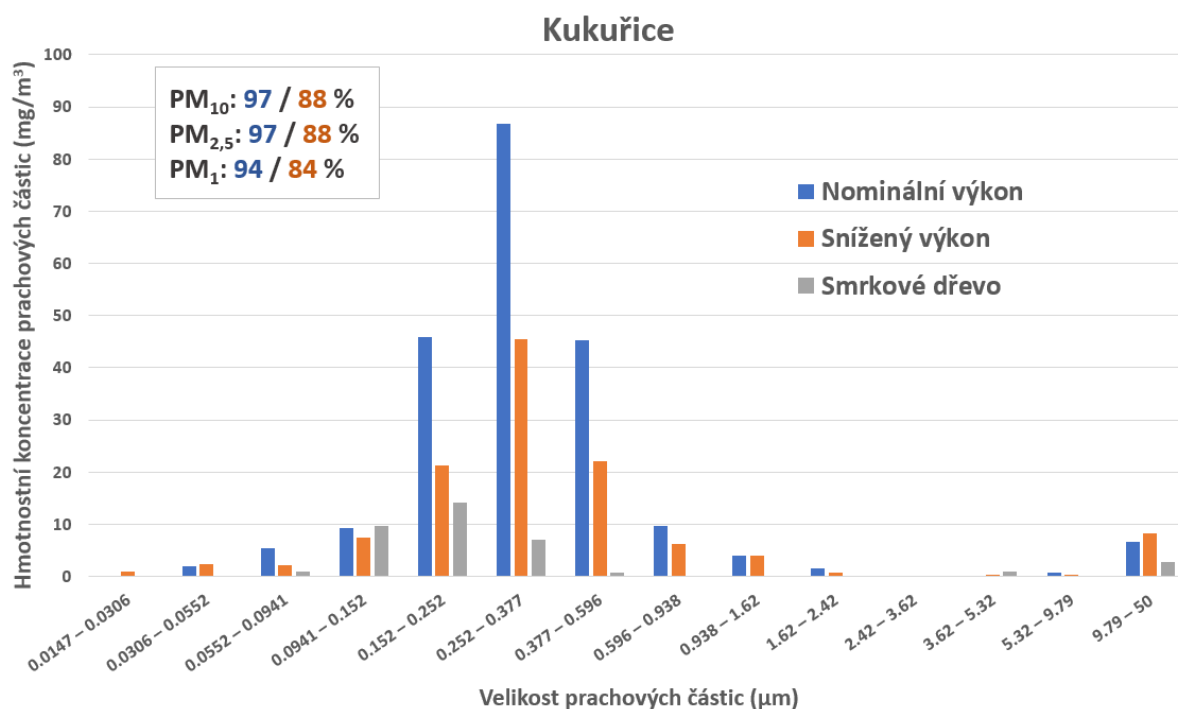
S výjimkou nominálního výkonu při spalování slunečnice a sníženého výkonu při spalování kukuřice bylo zastoupení prachových částic v jednotlivých velikostních kategoriích tvořeno 90 a více procenty. Samotný pík velikostní distribuce se napříč palivy lišil: u dřeva nabývala majoritní část prachových částic rozměru okolo 100 nm, u slunečnice okolo 300 nm, u kukuřice okolo 450 nm. Při sníženém výkonu byl u dřeva i slunečnice pozorován posun píku směrem doprava, tedy k vyšším aerodynamickým průměrům. Oproti tomu byla u kukuřice samotná velikostní distribuce jednotná, lišila se pouze hmotnostní koncentrace, která odpovídá pozorovaným výsledkům manuální gravimetrické metody.



Obr. 3 Velikostní distribuce prachových částic ze spalování dřevních pelet



Obr. 4 Velikostní distribuce prachových částic ze spalování slunečnicových pelet



Obr. 5 Velikostní distribuce prachových částic ze spalování kukuřičných pelet

4. ZÁVER

Cílem experimentu bylo sledování změn ve velikostní distribuci prachových částic, jejich celkových koncentrací a složení při spalování různých tuhých biopaliv za různých režimů. Z provozního hlediska byly zvoleny režimy nominálního a sníženého výkonu, neboť mezi nimi dochází k největším rozdílům v provozních podmínkách. Z praktického hlediska dále měření poskytují informace o emisních charakteristikách kotle z hlediska směrnice pro Ekodesign. Během experimentů bylo zjištěno, že oba režimy mají na velikostní distribuci částic významný vliv, obdobně jako složení paliva. Pro kompletní vyhodnocení vlivu popeloviny na složení částic bude v navazujícím řešení projektu proveden prvkový rozbor pomocí ICP-OES. Dále bude zkoumána morfologie pomocí elektronového mikroskopu.

Poděkování

Tato studie byla vypracována v rámci řešení projektu FCH/FSI-J-22-7919 „Emise a vlastnosti prachových částic ze spalování nedřevní biomasy“ VUT v Brně a dále podpořena z projektu OP VVV č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000753 „Centrum výzkumu nízkouhlíkových energetických technologií“.

Literatúra

- [1] BALA-LITWINIAK, Agnieszka a Monika ZAJEMSKA. Computational and experimental study of pine and sunflower husk pellet combustion and co-combustion with oats in domestic boiler. Renewable energy [online]. Elsevier, 2020, 162, 151-159 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2020.07.139
- [2] KŘŮMAL, Kamil, Pavel MIKUŠKA, Jiří HORÁK, František HOPAN a Lenka KUBOŇOVÁ. Influence of boiler output and type on gaseous and particulate emissions from the combustion of coal for residential heating. Chemosphere (Oxford) [online]. England:

- Elsevier, 2021, 278, 130402 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0045-6535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2021.130402
- [3] ZIMA, Wiesław, Jan TALER, Sławomir GRĄDZIEL, et al. Thermal calculations of a natural circulation power boiler operating under a wide range of loads. *Energy (Oxford)* [online]. Elsevier, 2022, 261 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2022.125357
- [4] HORÁK, Jiří, Vendula LACIOK, Kamil KRPEC, et al. Influence of the type and output of domestic hot-water boilers and wood moisture on the production of fine and ultrafine particulate matter. *Atmospheric environment (1994)* [online]. Elsevier, 2020, 229, 117437 [cit. 2022-12-15]. ISSN 1352-2310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117437
- [5] YANG, Wei, Youjian ZHU, Yu LI, Wei CHENG, Wennan ZHANG, Haiping YANG, Zhiwu TAN a Hanping CHEN. Mitigation of particulate matter emissions from co-combustion of rice husk with cotton stalk or cornstalk. *Renewable energy* [online]. Elsevier, 2022, 190, 893-902 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2022.03.157
- [6] HAN, Jingkun, Dunxi YU, Jianqun WU, Xin YU, Fangqi LIU a Minghou XU. Effects of torrefaction on ash-related issues during biomass combustion and co-combustion with coal. Part 1: Elemental partitioning and particulate matter emission. *Fuel (Guildford)* [online]. Elsevier, 2023, 334 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2022.126776
- [7] ELBL, Patrik, Tomáš SITEK, Jakub LACHMAN, Martin LISÝ, Marek BALÁŠ a Jiří POSPÍŠIL. Sewage sludge and wood sawdust co-firing: Gaseous emissions and particulate matter size distribution. *Energy (Oxford)* [online]. Elsevier, 2022, 256 [cit. 2022-12-15]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2022.124680
- [8] Elbl, P.; Baláš, M.; Vavříková, P.; Lisý, M.; Milčák, P. Gaseous Emissions and Solid Particles from the Combustion of Biomass Pellets in 25kW Automatic Boiler. In *Proceedings of the 27th European Biomass Conference and Exhibition, Lisbon, Portugal, 27–30 May 2019*; pp. 742–748.



WASTE-TO-ENERGY AS HEAT SOURCE – FCC EXPERIENCE

Kamil Szymik

*International Project Manager for
Waste to Energy Projects*

FCC Polska Sp. z o.o.

ul. Lecha 10

41-800 Zabrze, Polska

e-mail: kamil.szymik@fcc-group.pl

1. FCC GROUP

FCC Environment CEE is an **international waste management and citizen service group**, active in **7 countries** in Central and South-Eastern Europe.

We profit from **30 years of market experience**, where we gained **advanced technological background** and **know-how**. As part of FCC we are an important member of a world-wide active citizen service group.

We manage waste and recover resources from more than **52,400 industrial customers** and are providing services for over **4.6 million citizens** living in **1,401 municipalities**.

Our claim is our mission - „**Service for the Future**“. With our philosophy, proven service quality and investment into modern and clean technologies we secure the quality of life for present and future generations by minimizing environmental impacts.



FCC Environment CEE is also a part of a worldwide Group with 120 years of experience. FCC operates in over 30 countries, with over 59 000 employees and net sales of 6,158 million EUR in 2020.



2. FCC GROUP – EXPERIENCE IN WASTE-TO-ENERGY

FCC is the owner or operator of 10 WtE plants.

Locations:

- 3 in Spain
- 6 in the UK
- 1 in Austria

Technology:

- 9 are moving grate
- 1 is fluidized bed

Throughput:

- Combined 2,5 million tons per year
- All operating at full capacity

FCC was active as developer in 9 of its WtE plants.

Only Eastcroft plant in UK was bought already in operation.

FCC has commissioned four plants in the recent years.

2.1 New investment projects in the UK

FCC keeps developing new WtE projects.

Currently there are **two new plants under development**, which will **increase total capacity** of FCC's WtE plants **by app. 40%**.

LOSTOCK Sustainable Energy Plant

- | | |
|-----------------------|----------------------------|
| ✓ Location: | Lostock, Northwest England |
| ✓ Capacity: | 600.000 t/a |
| ✓ Electric output: | 60 MWe |
| ✓ Start of operation: | 2023 |

DRUMGRAY Energy Recovery Centre

- | | |
|--------------------|----------------------|
| ✓ Location: | Drumgray, Scotland |
| ✓ Capacity: | 300.000 t/a |
| ✓ Electric output: | 25,5 MWe |
| ✓ Project status: | Construction started |

2.2 New investment projects – Central Eastern Europe

Currently, **2 projects**, located in Poland and the Czech Republic, are most advanced ones in Central and Eastern Europe.

PECeN – Industrial Energy Center Neratovice

- ✓ Location: Neratovice, Czech Republic
- ✓ Waste treatment capacity: **160.000 t/a**
- ✓ Heat output: **50 MWt**
- ✓ Start of operation: 2029

Energia dla Tarnobrzega

- ✓ Location: Tarnobrzeg, Poland
- ✓ Waste treatment capacity: **120.000 t/a**
- ✓ Heat output: **29 MWt**
- ✓ Start of operation: 2027

2.3 „PECeN” – WtE project in the Czech Republic



Capacity: 160,000 t/a

Waste types: MSW

Average calorific value: 10,9 MJ/kg

Technology: stoker grate

Electric output: 12 MWe

Heat output: 50,08 MWt

Heat production: up to 800 000 GJ/a

Status: environmental decision procedure

Planned start of operation: 2029

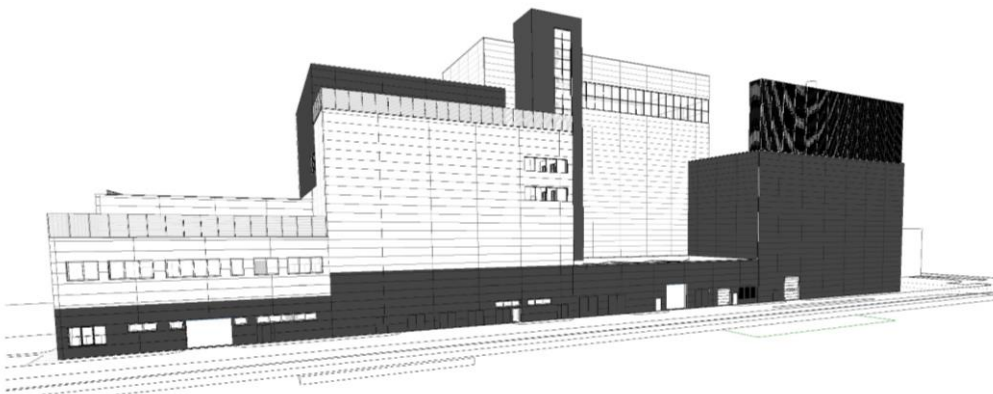


Main project drivers and assumptions on heat side:

- ☐ Project planned for industrial heat user
- ☐ WtE plant located directly next to industrial heat network
- ☐ Maximization of heat offtake with minimal power production
- ☐ Minimal connection costs
- ☐ Discounted heat prices
- ☐ No potential for municipal heat offtake

Project webpage: <https://www.pecen-neratovice.cz/>

2.4 „Energy for Tarnobrzeg” – WtE project in Poland



Capacity: 120,000 t/a

Waste types: MSW, pre-RDF, sewage sludge

Calorific value: 9-15 MJ/kg

Technology: stoker grate

Electric output: 10 MWe

Heat output: 29 MWt

Heat Production: approx. 400 000 GJ/a

Status: environmental decision procedure

Planned start of operation: 2027



Main project drivers and assumptions on heat side:

- ☐ Mainly municipal heat offtake
- ☐ WtE plant located remotely, in industrial zone outside of the city
- ☐ Heat production as demanded + maximization of power production
- ☐ 5 km heat connection necessary
- ☐ Heat prices without discount
- ☐ Potential for heat offtake in the industrial zone in the future (need to rebuild heating network)

Project webpage: <https://www.energiadlatarnobrzega.pl/>

4. WASTE-TO-ENERGY AS HEAT SOURCE – CONCLUSIONS

- **WtE plants** can be **fully functional heat sources** that support both waste and heating companies in
 - **tackling market (final treatment for MSW) and**
 - **regulatory challenges (decarbonization)**
- There are different potential **business models** to be implemented: from fully commercial to PPP (public-private partnership) or concessions with many hybrids in between.
- However:
 - There is a need for **close cooperation between waste and heating companies** in order to utilize **synergies**
 - **Each case needs to be analysed separately** in order to find the best „tailor-made” solution



MOŽNOSTI VYUŽITIA KOMUNÁLNEHO ODPADU PRE MATERIÁLOVÉ A TECHNICKÉ ZHODNOTENIE

Technologické systémy zhodnotenia odpadu z pohľadu praktických aplikácií

Ing. Róbert Procházka, PhD., MBA
VÚMZ SK, s.r.o. - návrh a výroba
recyklačných technológií pre
odpadové hospodárstvo

Anotácia

Komunálny odpad a jeho všetky súvisiace formy je fenomén, ktorý je potrebné riešiť nielen z hľadiska jeho hromadenia pri zvyšujúcej sa spotrebe a produkcii, ale aj z dôvodu dosahovania vyčerpanosti neobnoviteľných vstupných surovín, dnes využívaných či už priamo vo výrobnom procese alebo v energetike (palivo). V posledných rokoch evidujeme jeho stúpajúcu tendenciu a produkciu, čo súvisí nielen so stúpajúcou životnou úrovňou, ale hlavne so stále minimálnymi schopnosťami efektívne využiť všetky možnosti jeho využitia a spracovania pre zabezpečenie cieľov fungujúcej cirkulárnej ekonomiky. Najvýznamnejším druhom odpadu je komunálny odpad, pretože ho tvoríme všetci bez ohľadu na náš spoločenský status, bohatstvo či vzdelanie. Tvoríme ho pri bežných činnostiach, a to v domácnosti, v práci alebo v škole. A je to práve jeden z mála druhov odpadu, ktorého tvorbu môžeme obmedziť vlastným zodpovedným prístupom.

Cieľom príspevku je popísať súčasné možnosti aplikácie technologických postupov jeho zhodnocovania, ukázať hlavné trendy s popisom hlavných parametrov jednotlivých procesov z pohľadu technologických možností, ktorá je aktívna práve v praktických realizáciách na slovenskom a českom trhu, pohľad na legislatívu a výstupy pre spracovanie na R1 a R3 (energetické a mechanické spracovanie).

Kľúčové slová

Zhodnotenie odpadu, technologické spracovanie, komunálny odpad, triedenie, optické systémy triedenia, recyklácia, ochrana prírody

Key Words

Waste recovery, technological processing, municipal waste, sorting, optical sorting systems, recycling, nature protection.

1. ÚVOD

Cieľom každej krajiny je zníženie produkcie komunálneho odpadu a jeho maximálne využitie v iných formách tak, aby recyklačný proces vyústil do minimalizácie jeho uloženia na skládku. Jeho vrátenie do obehu v akejkoľvek forme znížením alebo úplnou elimináciou

neobnoviteľných vstupných surovín je úlohou cirkulárnej ekonomiky, ktorého základom je jeho zhodnotenie a spracovanie – strojnými, na trhu dostupnými technológiami. Legislatíva EÚ a s ňou prepojené legislatívy v rámci jednotlivých členských štátov jasne deklarujú potrebu zníženia množstva skládkovania KO a zvýšenia jeho recyklácie s opätovným využitím, či už ako vo forme druhotnej suroviny alebo paliva s jasne deklarovanými parametrami a minimálnym vplyvom na životné prostredie.

Prvým a najekonomickejšim krokom predprípravy vyprodukovaného komunálneho odpadu, je zníženie jeho produkcie v mieste spotreby, následne jeho dobré predtriedenie, mechanická recyklácia spracovaním na jeho využiteľné formy. Vo všeobecnosti je po vytriedení možné jeho opätovné využitie či ako druhotnej suroviny opätovne vo výrobe resp. v energetike ako palivo vo forme tuhého alternatívneho paliva (TAP) pre energetické zariadenia (výroba tepla, elektriny alebo chladu). Príprave predchádza dôkladné tepelné zhodnotenie jeho organickej zložky a eliminácia nevhodných anorganických prísad obsiahnutých v samotnom komunálnom odpade (napr. PVC).

2. FORMY KOMUNÁLNEHO ODPADU A JEHO TECHNOLOGICKÉ SPRACOVANIE

Komunálny odpad (KO) predstavuje veľmi rozmanitú zmes rôznych materiálov a líši sa svojim zložením v závislosti na druhu sídla a zástavbe (obec – rodinné domy, mesto – bytové domy). V súčasnosti sú známe a využívané formy jeho spracovania v nasledovnom rozdelení:

1) **Plastový odpad (PKO)** (zastúpenie 5% v KO).

Pre spracovanie PKO sa používajú mechanické a automatické systémy (Optické/rontgenové/laserové) pre mechanické vytriedenie plastov pre opätovné využitie v procese (R-recyklát / Regranulát) alebo pre prípravu TAP.

Pre získanie využiteľných produktov v energetike – syntézny plyn, oleje, tuhá zložka - sa v súčasnosti využívajú formy splyňovania a spaľovania plastového odpadu s čiastočným alebo obmedzeným, riadeným prístupom O₂ a regulovaným teplotným poľom molekulárneho štiepenia – katalytická depolymerizácia, pyrolýza, resp. termické spaľovanie.

2) **Elektro a kovový / nekovový odpad** (zastúpenie 1% v KO).

Pre spracovanie elektro odpadu alebo štandardného kovového/nekovového odpadu sa používajú Magnetické, nemagnetické, flotačné spôsoby vytriedenia, po jeho predošlom rozdrvení Využitie výstupov po zhodnotení ako druhotná surovina pre zlievarenský priemysel.

3) **Papierový odpad** (zastúpenie 3% v KO).

Papierový odpad sa spracúva predovšetkým ručným pretriedením a následným zlisovaním. V takejto forme sa posúva priamo ako druhotná surovina pre opätovné spracovanie v papierenských podnikoch .

4) **Sklo** (zastúpenie 2% v KO).

Spracúva sa prostredníctvom optických triediacich systémov na farebné a druhotné triedenie. Využitie výstupov ako recyklát pre opätovné spracovanie bez R-degradácie výsledného produktu.

5) **Textil** (zastúpenie 1% v KO).

Pre textilné odpady sa využíva mechanického predtriedenia, prečistenia a v technologicky čistých formách aj možného rozvláknenia, s prísadami a lisovaním výroba zhodnotiteľného produktu (napr. STERED – pojednané v ďalšom).

- 6) **Organický odpad** (zastúpenie 18% v KO).
Množstvo organického odpadu je na Slovensku od 1.7.2021 povinné pre kuchynský odpad oddeľovať od zmesového KO. Biologický rozložiteľný komunálny odpad (BRKO) je separovaný samostatne pri zdroji. Oba druhy odpadov sa spracovávajú drvením a buď kompostovaním v aeróbnom fermentore alebo v bioplynovej stanici. Pri kuchynskom odpade je v zmysle legislatívy dôležitá biologická stabilizácia pre AT4.
- 7) **Zmesový a veľkorozmerový komunálny odpad** (70% z KO).
Zmesový KO je najpočetnejšou časťou KO a jeho podiel je dominantný a najmenej spracovávaný, keďže končí prevažne na skládkach. To sa v súčasnosti legislatívne mení v časovom nastavení pre mílniky r.2023 / 2027 a r.2035, kedy má klesnúť podiel skládkovania na 10% a podiel jeho recyklovania až na 65%. Zvyšok bude využiteľný ako inak využiteľná forma napr. pre stavebný priemysel. Viac o formách spracovania ZKO v ďalšej časti.
- 8) **Ostatné časti KO a NO** (ca 1-2% z KO).
Zvyšné formy odpadu (dnes zatiaľ nezhodnotiteľné) a nebezpečný odpad sú spracovávané v autoklávoch) a následne sa umiestňujú na skládky odpadu.

Celkové možné využitie odpadu z hľadiska cirkulárnej ekonomiky resp. energetiky je možné až do výšky 95% z celkového produkovaného KO. Dnes sa pohybuje len v úrovni 45-50%.

3. LEGISLATÍVA TÝKAJÚCA SA POVINNOSTI SPRACOVANIA KO

Legislatívu ohľadom zhodnotenia komunálnych odpadov upravuje Zákon č. 79/2015 Z.z. o odpadoch / §13 písm. e). Pojednáva o zákaze zneškodňovať ten odpad skládkovaním, ktorý neprešiel úpravou, okrem inertného odpadu, ktorého úprava s cieľom zníženia množstva odpadu alebo jeho nebezpečenstva pre zdravie ľudí alebo pre životné prostredie nie je technicky možná a odpadu, u ktorého by úprava neviedla k zníženiu množstva odpadu ani nezabránila ohrozeniu zdravia ľudí alebo ohrozeniu životného prostredia.

Pôvodná účinnosť ustanovenia nastavená k 1.1.2021, prolongácia k 1.1. 2023.

Cieľom opatrenia je predovšetkým :

- *Minimalizácia skládkovaného odpadu*
- *Minimalizácia množstva recyklovateľných materiálov uložených na skládke*
- *Biostabilizácia uloženého odpadu na skládke*

Podrobnosti výstupných parametrov z tohto procesu úpravy pre BRO upravuje Vyhláška č. 382/2018 Z.z. o skládkovaní, ktorá pre BRO po stabilizácii požaduje splnenie nasledovných parametrov (uvedené sú v Prílohe č. 3a vyhlášky):

Parameter	Limitná hodnota	Jednotka
spotreba kyslíka po 4 dňoch (AT4)*	10	mg O ₂ /g sušiny
produkcia plynov po 21 dňoch (GS21)**	20	l/kg sušiny

Táto vyhláška zároveň upravila účinnosť platnosti tejto povinnosti na 1.1.2023

§6 ods. 5 písm. e) v znení „Na skládke odpadov na odpad, ktorý nie je nebezpečný, možno skládkovať výstup z úpravy zmesového odpadu, ktorý spĺňa parameter biologickej stability podľa prílohy č. 3a tabuľky č. 1.“

Od 1.1.2027 bude následne platiť prísnejšia úprava citovanej vyhlášky č. 382/2018 Z.z., ktorá §6 ods. 5 písm. e) určuje, že na skládke odpadu ktorý nie je nebezpečný, možno skládkovať výstup z úpravy zmesového odpadu a objemný odpad, ak jeho výhrevnosť v sušine neprekročí hodnotu 6,5 MJ/kg. Cieľom nastavenia legislatívy zhodnotenia KO je predovšetkým :

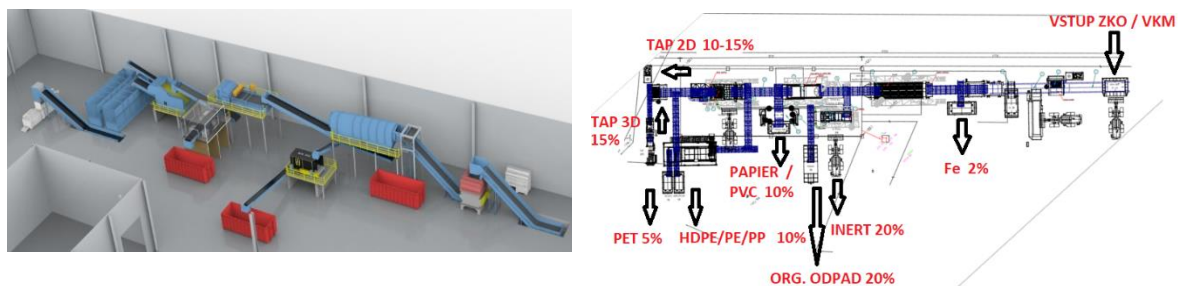
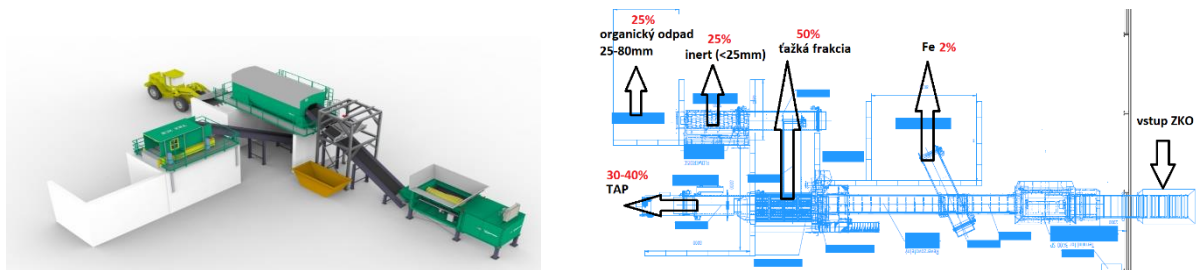
- **Zníženie množstva PET a Al** v ZKO (aplikácia od 1.1.2022)
- **Zníženie množstva kuchynského odpadu (KO)** (aplikácia od 1.1.2022) – v súčasnosti v aplikačnom systéme zberu
- Podpora výroby domáceho paliva (**TAP**) – motivácia k jeho výrobe
- Podpora **zhodnotenia** odpadu pred jeho uložením na skládku (míľniky r. 2027 a r.2035)
- Podpora **recyklácie polymérov** pred jeho doterajším spálením alebo skládkovaním – chemická recyklácia (katalytické depolymerizačné a pyrolytické systémy, výroba TDP, atď.)
- Investíciou do MBÚ očakávaná **podpora** pokrytia nákladov na spracovanie odpadu súvisiaca s investovaním do inovatívnych systémov jeho zhodnotenia / spracovania na jeho využiteľné zložky v rámci mechanickej a chemickej recyklácie, resp. skvalitnenie výstupného prúdu TAP z hľadiska jeho vyššej výhrevnosti a čistoty.

4. Hlavné parametre proces zhodnotenia zmesového komunálneho odpadu (ZKO)

4.1 Zmesový a veľkoobjemový KO – mechanicko biologická úprava (MBÚ)

Zmesový KO je najpočetnejšou formou KO. Jeho zhodnocovanie je obtiažne, keďže je morfológicky rozmanitý a nachádza sa v ňom veľa nezhodnotiteľných zložiek, vrátane biologickej časti, ktorú je potrebné pred zaskládkovaním stabilizovať v zmysle požiadaviek legislatívy. Prvá fáza mechanickej recyklácie je jeho podrvenie (vrátane veľkoobjemového odpadu) na jednotnú frakciu (zvyčajne do 350-400cm). Následne presitovanie na 2 základné frakcie- „ľahkú“ a „ťažkú“. V ťažkej sú zastúpené predovšetkým rozdrvené stavebné a biologické časti, v ľahkej zasa prevažne plastový a papierový odpad. Ťažkú frakciu ZKO je možné presitovať na jemnú so zrnitosťou < 25mm (tzv. „inert“) a túto ďalej nespracovávať. V súčasnosti je ju možné uložiť naspäť na skládku, v budúcnosti je možné jej použitie pre aplikácie zásypov alebo podsypov. Zvyšnú väčšiu frakciu (rozsah od ca 25mm do 80mm), je potrebné biologicky stabilizovať s cieľom dosiahnutia parametrov AT4 a GS21. Následne je možné aj túto uložiť na skládku. Od r. 2022 sa predpokladá jej zníženie zo súčasných 25% na 10-15% z hmotnosti vstupného ZKO, keďže sa vplyvom samostatného zberu kuchynského a zeleného odpadu (BRKO) predpokladá jej nižšie zastúpenie v ZKO. Z ľahkej frakcie je možné magneticky a opticky oddeliť zhodnotiteľné frakcie (napr. PET, HD-PE, PVC, PP, LDPE alebo papier), a tým zvýšiť množstvo spracovaných komodít alebo vyrobiť TAP a zároveň tým znížiť množstvo konečného odpadu na skládke. Na obrázkoch 5 a 6 nižšie je zakreslená jednoduchá mechanická linka na vytriedenie základných legislatívou určených frakcií zo ZKO s výrobou TAP. Komplexnejší systém (obr.7 a 8 nižšie), ponúka možnosť dotriedenia najmä ľahkej frakcie na ďalej zhodnotiteľné komodity (vybrané plasty) a PVC pre odstránenie nežiadúceho Cl z TAP. Biozložka v oboch variantoch linky musí byť tepelne stabilizovaná, aby dosiahla požadované parametre AT4 a GS21 a mohla byť umiestnená zatiaľ na skládku.

4.2 Technologické možnosti spracovania ZKO



4.3 Požiadavky na energetické využitie zhodnotenia ZKO

Hlavné parametre spracovania pre TAP :

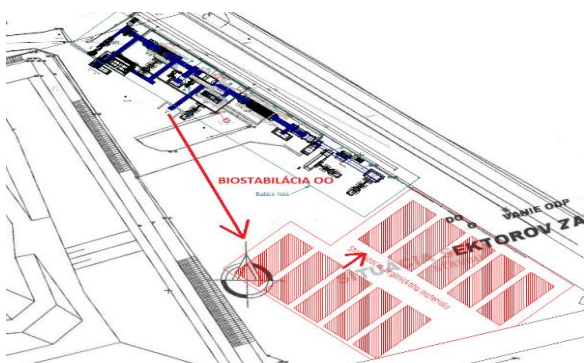
Tok spracovania >1t/hod, veľkosť vstupnej / výstupnej frakcie 350/40mm

Veľkosť pelety TAP : 25-35mm ; Výhrevnosť pelety TAP : 17-19MJ/kg ; Sušina : <5% H₂O



Obr. 9, 10 a 11 spracovaná TAP na výstupe a jej možné formy pre jej energetické zhodnotenie.

Pre splnenie legislatívou stanovených požiadaviek (Vyhláška 382/2018, platná od 1.1. 2023) je dosiahnutie AT4 (spotreba O₂ po 4 dňoch) a GS21 (produkcia plynov po 21 dňoch), je potrebné biofrakciu (hmotnostný podiel ca 25% z celkovej hmotnosti spracúvaného ZKO) stabilizovať. Od r. 2027 je navyše zakázané skládkať odpad, ktorý má výhrevnosť > 6.5MJ/kg. Pre účel biostabilizácie sa používajú v súčasnosti rôzne typy stabilizačných bunkrov resp. kontajnerov s núteným a riadeným prísunom vzduchu pre využívanie riadeného fermentačného procesu. Výstupom je stabilizovaná hmota, bohužiaľ zatiaľ kvalitou nesplňujúca požiadavky na kompostovanie, keďže obsahuje veľa kontaminantov, ktoré nie je možné aplikovať napr. do zeme. Príklady kompletného usporiadania linky na mechanické a bio-stabilizovanie ZKO („MBU“ linka) so stabilizáciou, sú znázornené na obr.12 a 13 nižšie.

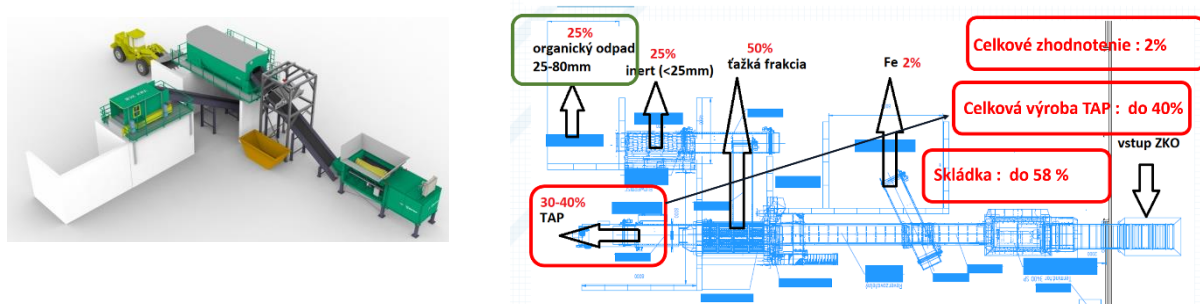


Obr. 12 a 13 Usporiadanie MBU v štandardnej zostave a príklad aeróbného fermentačného systému stabilizácie bio-zložky ZKO.

5. EKONOMICKÉ POSÚDENIE VYBRANÝCH VARIANTOV SPRACOVANIA ZKO

Vzhľadom k nastaveniu legislatívy súvisiacej s požiadavkou na uzavretie skládok od r. 2023 a zvýšenia úrovne jeho zhodnotenia a tým zníženia ukladania na skládky je už v súčasnosti poplatok za spracovanie ZKO na úrovni 45€/t s tendenciou jeho rastu (v ďalšom roku na úroveň 60-80€/t) s rastom v ďalších rokoch. Pre nastavenie porovnania ako by to s poplatkom vypadalo, ak by sa ZKO začas technologicky spracovávať a efekt z výstupov pretavil do možnosti zníženia poplatku, som nižšie porovnal 3 možnosti – jednoduchý (bez využitia optického magnetického alebo nemagnetického vytriedenia komodít na druhotnú recykláciu alebo výrobu TAP, komplexný systém s možnosťou prípravy mechanickej úpravy a TAP, no uložením inertného odpadu (frakcia <25mm) na skládku po jeho stabilizácii a posledný s tepelnou úpravou inerty a jeho využitím napr. v stavebnom priemysle. Výsledky sú uvedené nižšie. Nastavenie pre jednotlivé prípady bolo pri dosiahnutí rovnakej EBITDA pre všetky prípady, aby sa dal poplatok vyhodnotiť ako kritérium.

5.1 Jednoduchý systém spracovania ZKO

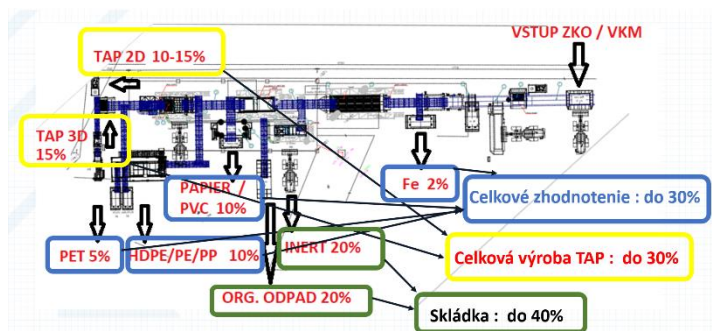


Obr. 14 Návrh jednoduchého systému spracovania ZKO a zachytiteľné výstupy z procesu

Cena za spracovanie 1 tony ZKO : 85.3 €

Poplatok pre občana pri produkcii 460 kg : 40 €/rok

5.2 Komplexný systém spracovania ZKO bez využitia inertnej zložky

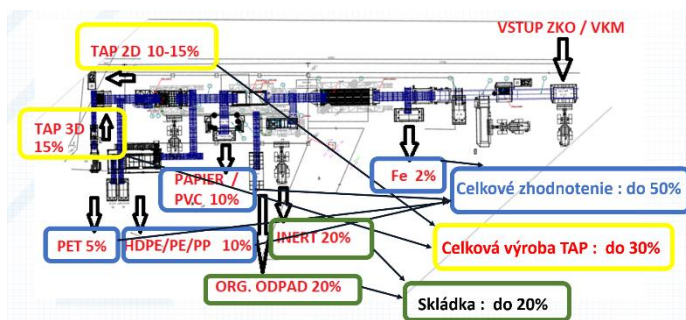
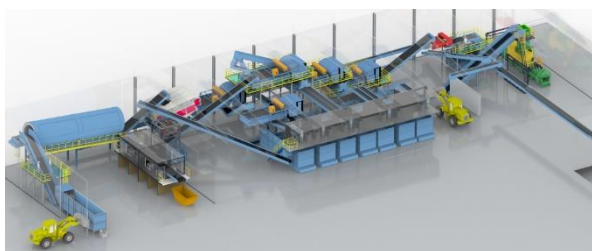


Obr. 15 Návrh komplexného systému spracovania ZKO a zachytiteľné výstupy z procesu

Cena za spracovanie 1 tony ZKO : 54.50 €

Poplatok pre občana pri produkcii 460 kg : 25 €/rok

5.3 Komplexný systém spracovania ZKO s využitím inertnej zložky



Obr. 16 Návrh komplexného systému spracovania ZKO s tepelným spracovaním inertu a zachytiteľné výstupy z procesu

Cena za spracovanie 1 tony ZKO : 25.20 €

Poplatok pre občana pri produkcii 460 kg : 12 €/rok

6. ZÁVER

Príspevok poskytuje komplexné informácie o súčasných možnostiach technologických foriem spracovania a zhodnotenia vybraných foriem komunálneho odpadu so zacielením na reálne aplikácie z hľadiska praktických ukážok vhodných technológií. Zároveň sa díva aj na aktuálnu legislatívu z pohľadu zhodnocovania odpadu. Cieľom zároveň bolo aj priblíženie foriem spracovania odpadu v praxi s prezentáciou dosiahnutých parametrov z procesov získaných výstupných komodít ako z hľadiska mechanických (druhotná surovina / R3) , tak aj energetických vlastností a možných výstupov (palivo vo forme TAP), predovšetkým pre zmesový komunálny odpad, ako najpočetnejšiu a najmenej riešenú časť KO. Možnosti spracovania ZKO z pohľadu ekonomických prínosov pre výšku spracovateľského poplatku pre občana je pojednávané v záverečnej časti práce a ukazuje, že sofistikovanejší systém

spracovania ZKO s možnosťou maximálneho vytriedenia komodít určených na recykláciu, tepelnej úpravy inertného materiálu napr. pre stavebné zmesi a výrobu TAP pre energetické využitie, vedie k najlepšej ceste udržateľnosti budúcich stredísk na zhodnotenie ZKO, ktoré dokážu minimálne stabilizovať poplatok samospráv za spracovanie odpadu.

Problematika možností zhodnotenia KO je široká a stále otvorená na rozvoj a aplikáciu riešení. Veľká miera rozšírenia technologických aplikácií a využitia spracovaných foriem odpadu závisí predovšetkým na nastavení legislatívy jednotlivých krajín EÚ s možnosťami využitia aj napr. systémom dotačných mechanizmov pre spracovateľov odpadu, aby sa spracovávanie odpadu vyplatilo aj z ekonomického hľadiska a tak sa dosiahol spoločenský cieľ cirkulárnej ekonomiky. Vtedy bude mať aj vývoj technológií súvisiacich s aplikáciami liniek, a s tým súvisiace aj samotné spracovávanie odpadu v akejkoľvek jeho forme šancu na dosiahnutie poklesu hromadenia odpadu na skládkach s postupným nahradením dočerpávaných neobnoviteľných zdrojov energie ako sú ropa, uhlie alebo zemný plyn.

Literatúra

- [1] Michaux J. (1980) Saving of Energy and Raw Materials by Recycling Plastic Waste Extracted from Urban Garbage. In: Strub A.S., Ehringer H. (eds) New Ways to Save Energy. Springer, Dordrecht; ISBN 978-94-009-8990-0; DOI https://doi.org/10.1007/978-94-009-8990-0_97.
- [2] Bonifazi G., Serranti S. (2012) Recycling Technologies. In: Meyers R.A. (eds) Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. Springer, New York, NY; ISBN 978-1-4419-0851-3; DOI <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3>
- [3] ŠMELKOVÁ, E. – TESLÍK P. 2009. Bilancia separovaného zberu komunálneho odpadu. In Enviromagazín, roč. 14, 2009, č. 1, s. 30-31.
- [4] Verejne dostupné informácie na odpadových portáloch : <https://www.odpady-portal.sk/> ; www.enviroportal.sk a europortal (www.europortal.sk)
- [5] Podnikové podklady z aplikácií od technologickej a výrobnej spoločnosti VÚMZ SK, s.r.o., Nitra (www.vumz.sk).



ENERGETICKÉ ZHODNOCOVANIE TUHÝCH ODPADOV V PODMIENKACH ŽILINSKÉHO KRAJA

Ing. Andrej Klačko
doc. Ing. Michal Holubčík, PhD.,
prof. Ing. Jozef Jandačka, PhD.
Strojnícka fakulta ŽU
Katedra energetickej techniky
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
e-mail: michal.holubcik@stroj.uniza.sk

Abstrakt

Znižovaním emisných limitov je potrebné riešiť problematiku tuhých zhodnocovaných palív, a to na národnej úrovni aj na úrovni Európskej únie. Výroba TAP zahŕňa spracovanie tuhého komunálneho odpadu (TKO) a iných odpadových materiálov, čím ponúka riešenie pre využitie odpadových materiálov udržateľným spôsobom a zníženie závislosti od neobnoviteľných zdrojov energie. Výsledky meraní ukázali, že TAP má vysoký energetický potenciál s výhrevnosťou nad 22 MJ/kg, vďaka čomu je vhodný na použitie v rôznych priemyselných aplikáciách, ako je výroba cementu, výroba elektriny a vykurovanie. Poskytuje nový pohľad na energetický potenciál TAP na Slovensku a poukazuje na jeho potenciál ako perspektívneho alternatívneho zdroja energie. Výsledky meraní taktiež podporujú potrebu ďalšieho výskumu rozvoja TAP ako zdroja energie a tvorby politik a infraštruktúry na podporu jeho rastu.

1. TUHÉ ALTERNATÍVNE PALIVO TAP

Tuhé alternatívne palivá sú typom obnoviteľného zdroja energie, ktorý možno použiť ako náhradu za fosílna palivá, ako je uhlie a zemný plyn. Tieto palivá sa zvyčajne získavajú z biomasy, čo je organická hmota, ktorú možno premeniť na využiteľnú formu energie. Niektoré bežné typy tuhých alternatívnych palív zahŕňajú drevené pelety, biouhlie a brikety. Jednou z hlavných výhod tuhých alternatívnych palív je, že sú obnoviteľné a udržateľné. Na rozdiel od fosílnych palív, ktoré sú obmedzené a ich vznik trvá milióny rokov, sa tuhé alternatívne palivá dajú pomerne rýchlo doplniť rastom novej biomasy. To znamená, že môžu poskytnúť konzistentný a spoľahlivý zdroj energie bez toho, aby prispievali k zmene klímy alebo iným environmentálnym problémom.

Ďalšou výhodou tuhých alternatívnych palív je, že sa dajú použiť v rôznych aplikáciách, od vykurovania a varenia až po výrobu elektriny. To z nich robí všestranný a flexibilný zdroj energie, ktorý možno ľahko integrovať do existujúcich energetických systémov. Okrem toho sú tuhé alternatívne palivá často lacnejšie ako fosílna palivá, čo z nich môže pre mnohých používateľov urobiť cenovo výhodnú možnosť. S používaním tuhých alternatívnych palív sú

však spojené aj určité výzvy. Jednou z najväčších výziev je, že môžu byť náročné na skladovanie a prepravu, pretože sú zvyčajne objemné a ťažké. To môže sťažiť presun tuhých alternatívnych palív z miesta výroby do miesta použitia, čo môže byť prekážkou ich širokého prijatia.

2. VÝHREVNOSŤ A SPALNÉ TEPLA TAP

Životný štýl a cestovný ruch sa rýchlo menia v dôsledku rastúcej urbanizácie a zvýšenej migrácie z miest. TKO má rôzne zloženie a vlastnosti podľa oblasti a sezóny. Táto zmes je rozhodujúca pre získanie vysoko kvalitného paliva. TKO je rozdelené do štyroch skupín podľa zloženia: recyklovateľný, kuchynský, nebezpečný a iný odpad. Odpad z plastov a gumy, kuchynský odpad, papier, textil, odpad z biomasy, keramika, sklo a kov tvoria väčšinu TKO.

Výhrevnosť tuhého alternatívneho paliva (TAP) sa vzťahuje na množstvo energie opätovne premenenej pri spaľovaní paliva. TAP sa skladá z odpadových materiálov, ktoré boli spracované a vytriedené, ako je papier, plasty a textil. Vysoká výhrevnosť TAP z neho robí atraktívnu alternatívu k tradičným fosílnym palivám, pretože poskytuje zdroj obnoviteľnej energie. Výhrevnosť SRF sa môže pohybovať približne od 18-24 MJ/kg, čo je výrazne vyššia hodnota ako výhrevnosť tuhého komunálneho odpadu (TKO). V Tabuľke 1 sú uvedené výhrevnosti a spálne teplo vybraných vzoriek TAP-u z rôznych odpadových spracovateľských závodov na Slovensku. Vykonané merania len potvrdzujú potrebu ďalej sa venovať problematike a zatriktívneniu TAP-u ako paliva budúcnosti.

Tab. 1 Výsledky merania vzoriek TAP

Vzorka	Spálne teplo (MJ/kg)	Výhrevnosť (MJ/kg)
Typ 1	26.95	24.99
Typ 2	24.00	22.42
Typ 3	24.22	22.32
Typ 4	24.25	22.53
Typ 5	22.68	21.10
Typ 6	22.27	20.76

3. ZHODNOCOVANIE ODPADU V ŽILINSKOM KRAJI

Pri spoluspaľovaní odpadov sa využívajú tri vlastnosti odpadov – energetický obsah odpadov, obsah kovov, ktoré vylepšujú vlastnosti koncového produktu a obsah popola, v dôsledku čoho dochádza k materiálovému zhodnocovaniu odpadov a k ochrane životného prostredia znížením ťažby prírodných surovín a znížením emisií skleníkových plynov CO₂. Spoluspaľovanie odpadov v cementárenských peciach je bezodpadová technológia, ktorá musí spĺňať prísne emisné limity z hľadiska ochrany ovzdušia. Spaľovňa komunálnych odpadov sa v Žilinskom kraji nenachádza.

Spoluspaľovanie odpadov v kraji je využívané v prevádzke:

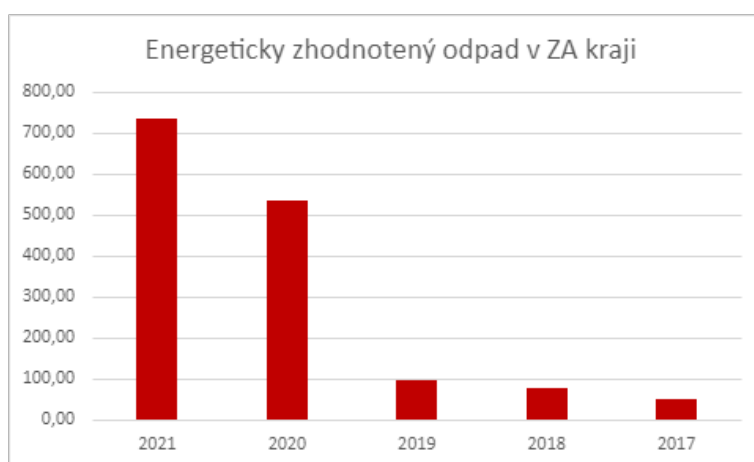
Ružomberok, Kotel na biomasu, kapacita zariadenia 28 501 t vzd.s./rok

V rámci Slovenskej republiky je spoluspaľovanie odpadov využívané v ďalších spoločnostiach:

- Rohožník – prevádzky Cementáreň Rohožník, Cementáreň Turňa nad Bodvou
- prevádzka Závod Vápenka Košice
- Horné Slnie
- Ladce

Nevyhnutným predpokladom využívania odpadov v procese spalovania je adekvátne infraštruktúra zariadení na výrobu tuhých alternatívnych palív, prednostne z odpadov vzniknutých na území Slovenskej republiky, ktoré budú určené na spalovanie v zmysle legislatívy EÚ.

Spalovanie odpadov je v Slovenskej republike využívané v ďalších štyroch spoločnostiach. Pri spalovaní sa využívajú tri vlastnosti odpadov – energetický obsah odpadov, obsah kovov, ktoré vylepšujú vlastnosti koncového produktu a obsah popola, v dôsledku čoho dochádza k materiálovému zhodnocovaniu odpadov a k ochrane životného prostredia znížením ťažby prírodných surovín a znížením emisií skleníkových plynov CO₂. Spalovanie odpadov v cementárenských peciach je bezodpadová technológia, ktorá musí spĺňať prísne emisné limity z hľadiska ochrany ovzdušia. Využívanie kapacitných možností zariadení na spalovanie odpadov je podmienené dostatočnou sieťou zariadení na mechanickú resp. mechanickobiologickú úpravu, ktoré musia byť schopné vyrábať vysokohodnotné horľavé palivo.



Obr. 1 Prehľad energeticky zhodnoteného odpadu v ZA kraji

V Žilinskom kraji má vyrásť technologické zariadenie na materiálové zhodnocovanie odpadov. Zariadenie má fungovať na báze autoklávovej technológie. Podľa spoločnosti zabezpečí v porovnaní s klasickými MBÚ vyššiu efektivitu triedenia aj vyššiu mieru hygieny. V Martine vyrastie nové technologické zariadenie na materiálové zhodnocovanie odpadov. Spoločnosť vyvinula vlastnú technológiu, ktorou je autoklávové (sterilizačné) zariadenie na mechanicko-tepelné spracovanie komunálneho odpadu, čím chce ponúkať riešenie na spracovanie a recykláciu s cieľom naplniť podstatu cirkulárnej ekonomiky.

V rámci procesu sa odpad najprv sterilizuje a následne sa sterilizovaný odpad automaticky triedi na použiteľné frakcie rozličných druhotných surovín, organickú frakciu a TAP, ktoré sú určené na ďalšie využitie. Podľa spoločnosti jej technológia umožňuje získať viac ako 90 % recyklovateľných frakcií a následne ich recyklovať do ďalších produktov, čím dokáže odkloniť viac ako 96 % odpadu od skládkovania. Predpokladaná doba prevádzky by mala byť minimálne 8-tisíc hodín za rok, pričom uvažovaná ročná kapacita navrhovaného zariadenia by mala byť 100-tisíc ton prijatého odpadu na spracovanie s možnosťou navýšenia kapacity do 150-tisíc ton.

Zariadenie podľa spoločnosti má spracovať široké spektrum nie nebezpečných odpadov, najmä však zmesových komunálnych odpadov, ale napríklad aj odpadov z poľnohospodárstva, odpadových obalov, absorbentov, stavebných odpadov, odpadov zo

zariadení na úpravu odpadov, z ČOV či komunálnych odpadov. Technologický proces spočíva v procese autoklárovania (autoclaving), v ktorom sa odpad najskôr sterilizuje pred jeho následným mechanickým triedením. Zariadenie je navrhnuté tak, aby väčšina odpadu bola premenená späť na druhotné suroviny.

Vďaka technológii by mal byť odpad suchý, dekontaminovaný, bezpečný a bez významných emisií zápachu. Fyzikálna sterilizácia má zabezpečiť eliminovanie všetkých patogénnych aj nepatogénnych mikroorganizmov vrátane vysokorezistentných spór a vírusov. Biologicky rozložiteľná organická frakcia má zase prechádzať transformáciou. Vzhľadom na to, že v autoklávoch dochádza pod vplyvom tepla a tlaku k fyzikálnej sterilizácii a zmene fyzikálnych vlastností organického odpadu (rozvlákňovaniu, granulácii) a nedochádza k chemickým procesom, ako je oxidácia či redukcia, ktoré by menili chemické vlastnosti látok obsiahnutých v odpade, táto technológia sa neklasifikuje ako tepelné spracovanie odpadu.

Zariadenie by malo ponechať len minimálnu časť odpadov na zneškodnenie skládkovaním, podľa spoločnosti ide maximálne o 10 percent, pričom na existujúcej prevádzke v Poľsku dosahuje zariadenie priemernú mieru odklonenia na úrovni 96 %.

4. ZÁVER

Tuhé alternatívne palivá môžu pri spaľovaní produkovať emisie, čo môže mať negatívny vplyv na zdravie a životné prostredie. To platí najmä pre palivá na báze dreva, ktoré môžu uvoľňovať znečisťujúce látky, ako sú pevné častice a oxid uhoľnatý. Na riešenie týchto obáv je dôležité používať tuhé alternatívne palivá spôsobom, ktorý minimalizuje emisie a maximalizuje ich prínos pre životné prostredie.

Celkovo sú tuhé alternatívne palivá sľubným zdrojom obnoviteľnej energie, ktorý môže pomôcť znížiť závislosť od fosílnych palív a bojovať proti zmene klímy. Aj keď sú s ich používaním spojené problémy, možno ich prekonať správnym plánovaním a riadením. Prijatím tuhých alternatívnych palív ako súčasti širšej energetickej stratégie je možné posunúť sa smerom k udržateľnejšej a bezpečnejšej energetickej budúcnosti.

Podakovanie

Táto práca vznikla za podpory projektov APVV-21-0452 Vplyv využitia malých elektrostatických odlučovačov na znižovanie produkcie tuhých znečisťujúcich látok pri spaľovaní palív v domácnostiach, KEGA 032ŽU-4/2022 Implementácia poznatkov o moderných spôsoboch znižovania záťaže životného prostredia pri energetickom využívaní tuhých palív a odpadov do pedagogického procesu a VEGA 1/0671/23 Výskum a vývoj SMART riešení na monitorovanie produkcie emisií z malých zdrojov tepla.

Literatúra

- [1] Lu, J.S.; Chang, Y.; Poon, C.S.; Lee, D.J. Slow pyrolysis of municipal solid waste (MSW): A review. *Bioresour. Technol.* 2020, 312, 123615
- [2] J. Piekutin Monitoring of Groundwater in the Area of a Reclaimed Municipal Waste Landfill *J. Ecol. Eng.*, 20 (2019), pp. 262-268
- [3] www.enviroportal.sk
- [4] UNIVENT, Progresívne technológie zhodnocovania odpadov v automobilovom priemysle, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM STU, ISBN: 978-80-553-3867-5, 2021



ZHODNOCOVÁNÍ ALTERNATIVNÍCH PALIV VYROBENÝCH Z ODPADŮ TERMOCHEMICKOU KONVERZÍ

Ing. Jaroslav Frantík, Ph.D.

Ing. Jan Najser, Ph.D.

Vysoká škola báňská - Technická
univerzita Ostrava

Centrum ENET

17. listopadu 2172/15

708 00 Ostrava -Poruba

e-mail: jaroslav.frantik@vsb.cz

Abstrakt

Příspěvek se zabývá energetickým zhodnocením alternativních paliv pomocí termochemické konverze. V úvodu příspěvku je nastíněna problematika nakládání s odpady a s jejich energetickým využitím. Pozornost byla zaměřena na tuhá alternativní paliva. Zmíněny jsou možnosti i jednotlivé technologie, které jsou pro zhodnocení alternativních paliv vhodné. Na Vysoké škole báňské – Technické univerzitě Ostrava, Technologickém centru Ostrava je možno energeticky zhodnocovat odpad hned na několika pyrolýzních technologiích. Tento příspěvek se zaměřil na testování dvou druhů materiálů v laboratorním standu kontinuální pyrolýzní jednotky. Výstupem jsou následně data z typových materiálů jako jsou analýza vstupní vsázky, produkty pyrolýzních procesů, jejich hmotnostní i energetické bilance, analýzy materiálu na výstupu. V závěru příspěvku jsou také zmíněny možnosti využití pyrolýzních produktů společnostmi z různých průmyslových sektorů.

1. ÚVOD

Neustále zvyšující se nároky na výrobu energie, nárůst obyvatelstva na planetě a s tím související významný nárůst vzniku odpadů neodbytně poukazuje na skutečnost, že dnes je více než nutné uvažovat o odpadech, potažmo alternativních palivech z nich vyrobených, jako o významném zdroji energie. Zhodnocení energetického potenciálu odpadů má také neoddiskutovatelný environmentální dopad v podobě snížení podílu fosilních paliv, snížení emisí CO₂ a redukci množství odpadů ukládaného na skládku [1].

Zde je třeba zmínit důležitou legislativní změnu v podobě nového odpadového zákona č. 541/2020 Sb. Zákon o odpadech (platný od 23.12.2020, účinný od 01.01.2021), který ošetřuje i otázku skládkování odpadů, a to v § 40, kde provozovatel skládky nesmí od 1. ledna 2030 na skládku ukládat odpady dle písmene a) jejichž výhřevnost v sušině je vyšší než 6,5 MJ/kg a dle písmene c) které je za stávajícího stavu vědeckého a technického pokroku možné účelně recyklovat [2].

V roce 2021 bylo v ČR vyprodukováno 39,2 mil. tun všech odpadů, z čehož 1,7 mil. tun tvořily nebezpečné odpady a 37,5 mil. tun odpady ostatní viz obr. č. 1.

Tonnes

ČR, kraj CZ, region	Celkem 2017 Total 2017	z toho:		Celkem 2018 Total 2018	z toho:		Celkem 2019 Total 2019	z toho:		Celkem 2020 Total 2020	z toho:		Celkem 2021 Total 2021	z toho:	
		nebezpečné Hazardous			nebezpečné Hazardous			nebezpečné Hazardous			nebezpečné Hazardous			nebezpečné Hazardous	
Česká republika Czech Republic	34 553 461	1 489 847		37 940 560	1 755 793		37 310 939	1 726 535		38 486 186	1 759 507		39 168 578	1 732 851	
v tom:															
Hl. m. Praha	4 550 253	71 082		5 172 846	110 130		5 030 625	128 696		4 724 583	107 923		5 216 317	262 232	
Středočeský kraj	4 523 923	224 034		4 976 060	266 068		5 067 151	264 621		5 019 263	268 518		5 019 282	270 894	
Jihočeský kraj	1 859 234	75 679		2 135 400	88 569		1 947 654	82 043		2 426 336	148 065		1 989 118	133 486	
Plzeňský kraj	2 499 902	58 341		1 921 092	67 505		2 031 727	56 177		2 190 989	55 987		2 590 849	76 678	
Karlovarský kraj	797 430	28 881		943 264	66 244		688 209	48 579		844 442	48 647		666 368	20 930	
Ústecký kraj	2 875 127	129 223		2 910 748	121 742		2 928 029	144 792		3 152 467	142 111		3 214 224	117 344	
Liberecký kraj	966 234	93 301		1 044 554	94 726		1 156 835	94 500		1 087 087	88 808		1 119 601	73 614	
Královéhradecký kraj	1 562 407	49 694		1 718 329	63 083		1 663 916	62 392		1 769 502	53 930		1 526 336	64 944	
Pardubický kraj	1 453 991	72 636		1 500 630	88 043		1 694 939	131 397		1 714 802	88 246		1 921 165	81 753	
Kraj Vysočina	1 528 918	69 034		1 689 232	74 865		1 528 718	69 996		1 727 584	93 325		1 870 388	75 291	
Jihomoravský kraj	4 233 691	125 373		5 233 868	177 137		4 990 792	176 425		4 749 302	198 039		4 986 455	164 420	
Olomoucký kraj	2 284 688	83 274		2 635 459	69 074		2 197 552	58 642		2 949 663	70 755		2 593 251	93 353	
Zlínský kraj	1 344 696	73 617		1 450 087	91 403		1 552 548	85 795		1 643 685	91 704		1 538 053	89 355	
Moravskoslezský kraj	4 072 967	335 677		4 608 990	377 204		4 832 243	322 482		4 486 480	303 448		4 917 170	208 556	

Obr. 1 Produkce odpadů podle krajů (v tunách) [3]

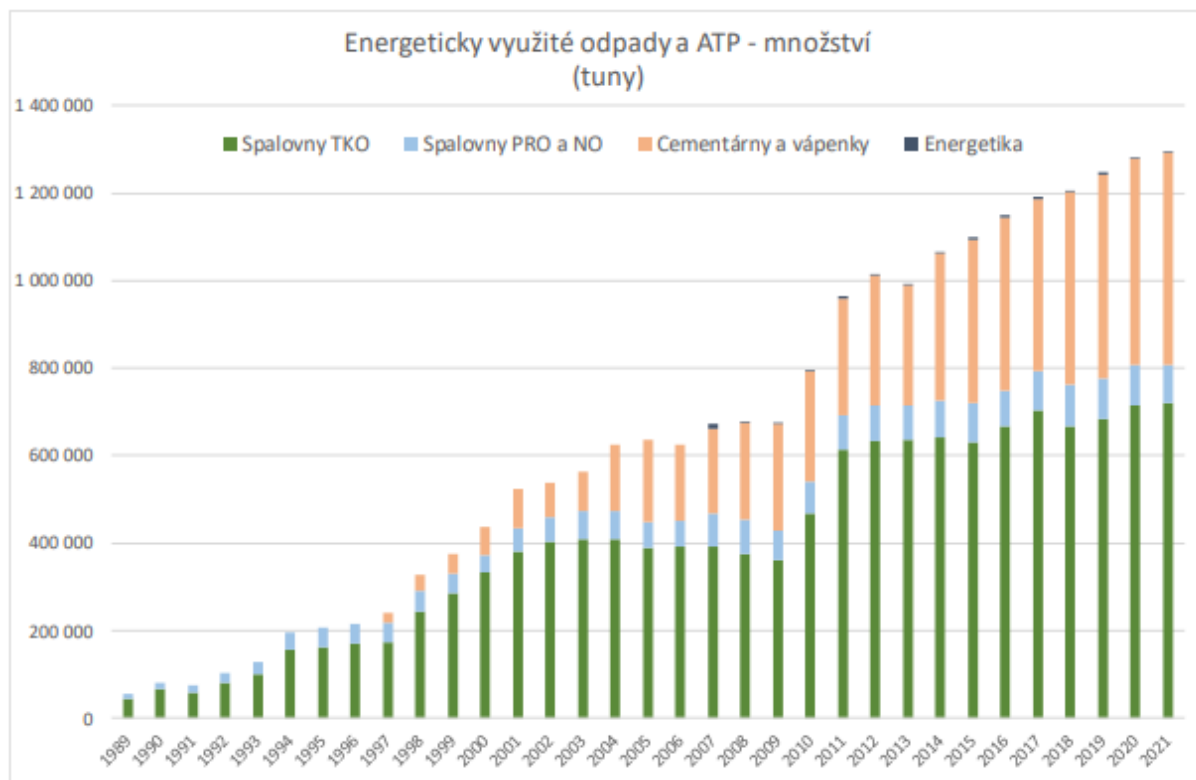
Odpady, které nejsou klasifikovány jako nebezpečné a které již nadále nelze materiálově využít, ať již z technických nebo ekonomických důvodů v souladu s hierarchií odpadového hospodářství, je možné zpracovat v tuhé alternativní palivo tzv. TAP, které je poté jako zdroj energie ve formě paliva nejčastěji využíván v cementárnách. Výrobci jsou především odpadářské společnosti, případně ty, které vyrábí pouze paliva. Jedná se tak o např. o společnost OZO Ostrava, s.r.o., jejíž produkt se jmenuje PALOZO a je tvořen z vyříděné složky komunálního odpadu ze 40% a dalších 60% zastupují průmyslové odpady. Dalšími společnostmi jsou např. SITA Ecotech, RUMPOLD s.r.o., FCC Česká republika, s.r.o. se značkou TAPu ASAPAL, Marius Pedersen a.s. a další [4].

K problematice TAP je nutno uvést skutečnost, že aktuálně je v legislativním procesu od předkladatele Ministerstva životního prostředí návrh vyhlášky, kterou se stanoví podmínky, při jejichž splnění přestává být palivo z odpadu odpadem. V této chvíli je ukončeno připomínkové řízení. Existují evropské technické normy k tuhým alternativním palivům z odpadu i Směrnice Evropského parlamentu a Rady o odpadech, nicméně v českém legislativním prostředí prováděcí právní předpis k vymezení podmínek, při jejichž splnění přestává být palivo vyrobené z odpadu a palivo vyrobené z odpadní biomasy odpadem, chybí. Touto vyhláškou dojde k jasnému legislativnímu vymezení a pro praxi se tak otevře cesta k energetickému využití energie ukryté v odpadech.

Jak již bylo uvedeno výše, současná právní úprava neumožňuje, aby paliva vyrobená z odpadu přestala být až do svého finálního zpracování odpadem, s výjimkou paliv vyrobených z biomasy. To výrazným způsobem ztěžuje výrobu a uplatnění takovýchto paliv. Zároveň větší energetické využívání odpadu právě ve formě paliv vyrobených z odpadu může přispět k odklonu odpadů od skládkování [5].

Ke zpracování odpadů termickou metodou se nejčastěji využívá spalování nebo procesů pyrolýzy a zplyňování [6]. Spalování je asi nejznámějším způsobem likvidace odpadu, při kterém dochází ke značnému snížení objemu vyprodukovaného opadu [7]. Ve spalovnách komunálního odpadu (ZEVO) bylo tak energeticky využito 720 391 tun odpadů a spalovnách průmyslového a nemocničního odpadu 86 795 tun odpadů. Velkou nevýhodou spaloven je tvorba řady emisních látek, které je nutné před vypuštěním spalin odstranit. Čištění spalin si žádá vysoké investice např. na redukci oxidu dusíku, zachycení popílku, katalytický rozklad

organických látek a čištění anorganických složek spalin. Odpad a alternativní paliva je také možno využívat také v cementárnách a vápenkách, kde působením vysokých teplot dochází k absolutnímu rozkladu vstupujícího odpadu. V roce 2021 bylo takto zhodnoceno 486 565 tun alternativních paliv a odpadů, z čehož 367 935 tun činily TAPy. V energetickém sektoru činila spotřeba alternativních paliv a odpadů 2 266 tun. Z následujícího grafu viz obr. 2 je jasné patrné, že lze zaznamenat růst energeticky využitého odpadu v ČR [8].



Obr. 2 Energeticky využitelné odpady a alternativní palivo – souhrnná data [8]

Za zmínku jistě stojí možnost využití TAPu i v teplárnách a elektrárnách. Jedním z příkladů, kde plánují spalovat tuhá alternativní paliva v multipalivovém kotli s minimálně 90% účinností za účelem výroby tepla, bude i teplárna Karviná [9].

Další termochemickým procesem, kterým lze zpracovávat odpady, je zplyňování. Jedná se o přeměnu pevného i kapalného uhlíkatého (tj. organického) materiálu (probíhající pomocí zplyňovacích médií a tepla) na výhřevný syntetický plyn, syngas. Ten obsahuje majoritně vodík a oxid uhelnatý, méně pak metan, oxid uhličitý, vodní páru a dusík a znečišťující složky sulfan, chlorovodík, amoniak, prach a dehet a další [10]. Technologie zplyňování se v České republice pro energetické využívání odpadů používá převážně v testovacích provozech.

Posledním zmíněným fyzikálně-chemickým dějem, který se řadí k termickým procesům, kdy dochází k rozkladu organického materiálu bez okysličovadla, což znamená, že v procesu není přítomen žádný kyslík, respektive vzduch, je pyrolýza. Pyrolýzní proces probíhá v rozmezí teplot od 150 °C až do 1000 °C. Výslednými produkty jsou pak tuhý zbytek, pyrolýzní olej (kapalina) a plyn. Průběh procesu je ovlivněn řadou faktorů např. druhem a vlastnostmi materiálu, jeho vlhkostí, reakční dobou a pyrolýzní teplotou. Podrobněji je pyrolýzní proces s konkrétními typy materiálu uveden v následujících kapitolách [11].

2. MATERIÁL A METODY

2.1 Materiál

Vstupní palivo bylo před experimenty upraveno na požadovanou granulometrii pomocí nožového mlýnu. Testovány byly dva vzorky. Jednalo se o směs polypropylenu s polyethylenem v hm. poměru 1:1 (PP + PE) a o akrylonitrilbutadienstyren (ABS) (obr. 3 a, b).



Obr. 3 Nadrcené vstupní materiály před experimentem, a) PP + PE, b) ABS

U provedených vzorků byla provedena TGA analýza pro určení požadovaných vstupních vlastností. Jedná se zejména o obsahy vlhkosti (W), popele (A), prchavé hořlaviny (V) a neprchavé hořlaviny (FC). Tyto výsledky jsou pro jednotlivé vzorky shrnuty v tab. 1. Měření bylo provedeno na přístroji LECO TGA701 dle metody ASTM D7582 MVA in Coal.

Tab. 1 Množství vlhkosti, popele, prchavé a neprchavé hořlaviny ve vstupních vzorcích

materiál	W ^r (hm. %)	A ^d (hm. %)	V ^d (hm. %)	FC ^d (hm. %)
PP + PE	0,1	10,3	86,2	3,4
ABS	0,2	0,9	96,1	3,0

kde ^r – značí vlhký vzorek a ^d – vzorek bezvodý.

Zároveň byly ve vstupních materiálech stanoveny základní stavební prvky organické hmoty, a to pomocí elementární analýzy na přístroji LECO CHNS628. V tab. 2 jsou uvedeny hodnoty hmotnostních procent jednotlivých prvků obsažených v palivech, kyslík byl stanoven výpočtem. Suma hořlaviny a popelu činí 100 %.

Tab. 2 Výsledky elementární analýzy vstupních paliv

materiál	C ^d (hm. %)	H ^d (hm. %)	N ^d (hm. %)	S ^d (hm. %)	O ^d (hm. %)
PP + PE	62,8	9,20	0,15	4,31	13,2
ABS	79,1	6,89	3,87	1,70	7,5

kde ^d – značí bezvodý vzorek

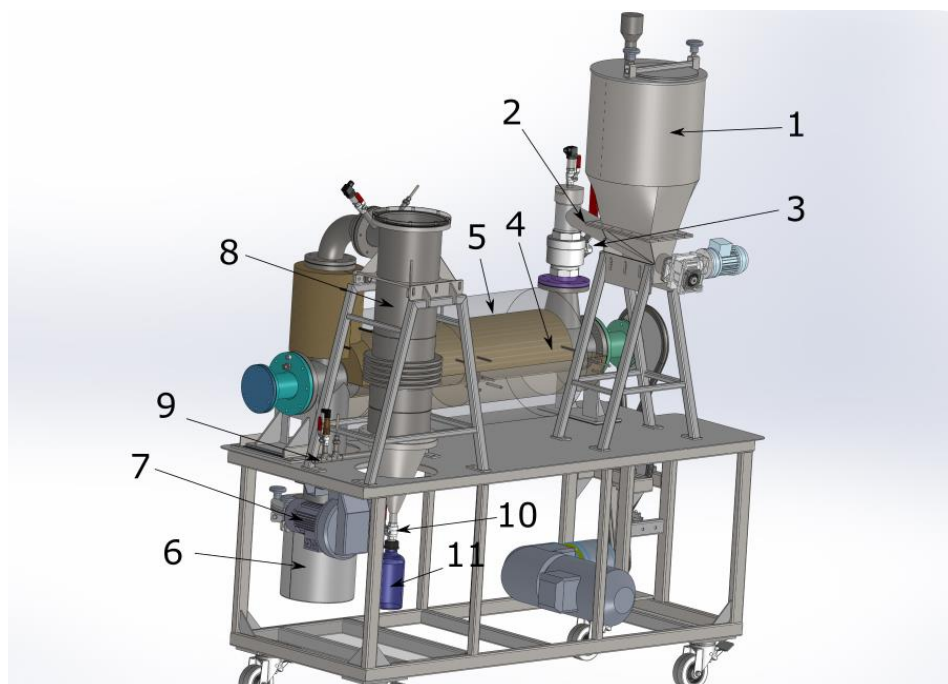
Pomocí kalorimetru LECO AC600 byly dále změřeny hodnoty spalného tepla obou vzorků, ze kterých byla následně vypočítána příslušná výhřevnost. Výsledné hodnoty jsou znázorněny v tab. 3.

Tab. 3 Výsledné hodnoty spalného tepla a výhřevnosti vstupních materiálů

materiál	spalné teplo ^d (kJ/kg)	výhřevnost ^d (kJ/kg)
PP + PE	35577	33523
ABS	37609	36002

2.2 Testovací pyrolýzní stand

Jednotka výzkumného pyrolýzního standu je schematicky znázorněna na obr. 4. Jednotka je otápěna elektrickými odporovými segmenty s celkovým instalovaným elektrickým výkonem 9 kW. Kapacita zpracování této jednotky činila v případě zvolených druhů paliva 8 kg/h. Další parametry jsou shrnuty v tab. 4. Měření teploty v průběhu procesu je realizováno sadou termočlánků a řízeno vestavěným PLC. Před samotným začátkem testu je palivo umístěno v hermeticky uzavřeném zásobníku, ve kterém dochází pomocí inertního plynu (dusíku) k jeho inertizaci. Dusík je do jednotky přiváděn z tlakové lahve po dobu nutnou k promytí celého zařízení. Po inertizaci standu a jeho nahřátí na provozní teplotu je palivo pomocí šnekového dopravníku řízeného frekvenčním měničem dopravováno přes kulový ventil do vodorovné válcové pyrolýzní retorty. Tato retorta disponuje elektrickými odporovými segmenty určenými k jejímu vytápění a šnekovým dopravníkem, jehož rychlost otáčení stanovuje dobu setrvání materiálu v retortě. Dochází zde k rozkladu vstupního materiálu na kapalně, plynně a tuhé pyrolýzní produkty. Plynné produkty jsou z pyrolýzy odváděny přes výstupní otápěné potrubí do protiproudého vodního chladiče, v jehož dolní části se shromažďuje kondenzující pyrolýzní kapalina (pyrolýzní olej). Ten se následně přes ventil vypouští do zásobní nádoby. Plyn je odsáván dmychadlem, které udržuje v celém zařízení mírný podtlak. Plynné pyrolýzní produkty lze energeticky využít, ovšem v tomto laboratorním provedení byl pyrolýzní plyn dopalován na fléře. Na plynové trase je zřízeno odběrové místo sloužící k online analýze vznikajícího plynu. Při diskontinuálním měření je možnost následné laboratorní analýzy plynu z odběrů určitého objemu vzorků do tedlarových vaků.



Obr. 4 Schematické znázornění pyrolýzní jednotky

Jak vyplývá z obr. 4, samotná jednotka sestává ze zásobníku surového paliva (1), šnekového dávkovače surovin (2), kulového ventilu (3), reaktoru, tj. retorty disponující šnekovým dopravníkem (4), otopných elektrických segmentů (5), zásobníku na tuhý zbytek (6), pohonné jednotky generátoru (7), chladiče plynu (8), potrubí k odvodu vznikajícího plynu (9), ventilu na odvod pyrolýzního oleje (10) a zachytné nádoby na tento olej (11).

Tab. 4 Parametry pyrolýzní jednotky

parametr	jednotka	hodnota
min. pracovní teplota	°C	200
max. pracovní teplota	°C	700
pracovní tlak	atm	0,8–0,9
kapacita zařízení	kg · h ⁻¹	8–10
váha zařízení	kg	480

2.3 Průběh procesu

Na základě rozboru vstupního materiálu a TGA analýzy byla zvolena teplota pyrolýzního procesu 600 °C, která se nachází nad bodem teplotního rozkladu obou materiálů. Doba zdržení byla nastavena na 1 h při pracovním tlaku 0,9 atm.

Palivo bylo před samotnou pyrolýzou umístěno do hermeticky uzavřeného zásobníku, následně došlo k inertizaci zásobníku i celého zařízení pomocí intenzivního promývání dusíkem z tlakové lahve. Po inertizaci bylo palivo dopraveno šnekovým dopravníkem (řízeným frekvenčním měničem) přes kulový ventil do pyrolýzní retorty. Ve válcové otápěné retortě bylo palivo rozkládáno při výše zmíněné teplotě po dobu 1 h.

Plynné produkty byly z pyrolýzy odváděny přes výstupní otápěné potrubí do protiproudého vodního chladiče, v jehož dolní části byla shromažďována kondenzující kapalina (pyrolýzní olej). Ten byl následně přes ventil vypouštěn do zásobní nádoby.

Plyn byl odsáván dmychadlem, které udržuje v celém zařízení mírný podtlak (0,9 atm). Přebytek plynu po jeho analýze byl dopalován na spalovacím hořáku, fléře. Na odběrném místě bylo stanovováno složení plynu pomocí on-line analyzátoru. Pro offline analýzy byl odebírán plyn do tedlarových vaků.

3. VÝSLEDKY A DISKUZE

3.1 Hmotnostní bilance

Charakter rozkladu materiálu popisuje jeho hmotnostní bilance, tj. poměr, v jakém vznikají jednotlivé produkty (plynné, kapalné a pevné). Na základě měření je možno stanovit hmotnostní bilanci. V Tab. 5. jsou uvedeny hmotnostní podíly jednotlivých produktů u paliv.

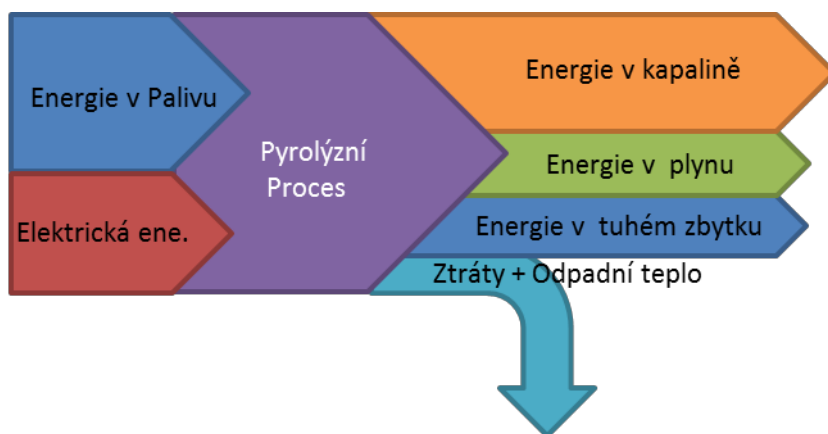
Tab. 5 Hmotnostní bilance vzorků (dopočteno)*

Vzorek	Plyn*	Kapalina-olej	Tuhý zbytek
PP+PE	17,4	61,3	21,3
ABS	2,4	73,62	23,98

Na základě hmotnostní bilance a složení jednotlivých produktů je možno sestavit energetickou bilanci a energetické toky během procesu pyrolýzy.

3.2 Energetická bilance

Energetická bilance (viz Obr. 5) ukazuje, jak jednotlivé energetické toky prochází celým procesem pyrolýzy. Na základě dat získaných během laboratorních testů a výsledků z analýz je sestavena tabulka pro jednotlivá paliva. V Tab. **Chyba! Nenašel sa žiaden zdroj odkazov..** jsou hodnoty přepočteny na procenta ze vstupní energie.



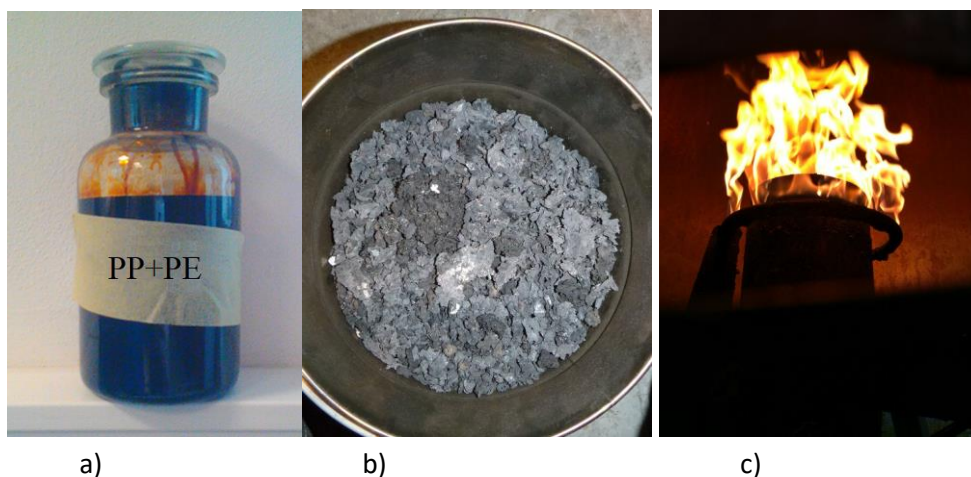
Obr. 5 Sankeyův diagram pyrolýzního procesu

Tab. 6 Energetické toky pro jednotlivá paliva (uvedeno v procentech vstupní energie)

Materiál vzorku	Vstupní energie		Výstupní energie				
	Palivo	Elektřina ohřev	Plyn	Kapalina	Tuhý zbytek	Odpadní teplo	Ztráty
PP+PE	83,7	16,3	49,8	14,9	0,0	1,2	34,1
ABS	84,5	15,5	1,9	61,7	19,6	0,1	16,6

3.3 Analýzy materiálu na výstupu

Stejně jako na vstupu byly analyzovány jednotlivé materiály, pyrolýzní produkty viz obr. 7 z nich vzniklé byly taktéž podrobeny pomocí TGA, kalorimetrické a elementární analýze.



Obr. 7 a) Pyrolýzní olej, b) Tuhý zbytek, c) Spálení vzniklého plynu

Tab. 7 Množství vlhkosti, popele, prchavé a neprchavé hořlaviny ve výstupních vzorcích

materiál	W ^r (hm. %)	A ^d (hm. %)	V ^d (hm. %)	FC ^d (hm. %)
PP + PE tuhý zbytek	0,1	67,7	6,7	25,7
ABS tuhý zbytek	1,2	19,0	16,4	64,6
PP + PE kapalina	0,2	0,0	99,0	1,0
ABS kapalina	0,8	0,0	98,7	1,3

kde ^r – značí vlhký vzorek a ^d – vzorek bezvodý.

Tab. 8 Výsledky elementární analýzy na výstupu

materiál	C ^d (hm. %)	H ^d (hm. %)	N ^d (hm. %)	S ^d (hm. %)	O ^d (hm. %)
PP + PE tuhý zbytek	18,6	0,50	0,00	0,00	13,2
ABS tuhý zbytek	73,7	3,59	3,18	0,00	0,6
PP + PE kapalina	73,3	10,26	0,29	1,00	15,2
ABS kapalina	77,3	6,89	3,16	0,14	12,5

kde ^d – značí bezvodý vzorek

Tab. 9 Výsledné hodnoty spalného tepla a výhřevnosti výstupních materiálů

materiál	spalné teplo ^d (kJ/kg)	výhřevnost ^d (kJ/kg)
PP + PE tuhý zbytek	-*	-*
ABS tuhý zbytek	36429	34776
PP + PE kapalina	36392	34351
ABS kapalina	37321	36203

*nebyla provedena kalorimetrická analýza, neboť nedošlo k zapálení vzorku z důvodu vysokého podílu popela,

kde ^d – značí bezvodý vzorek

3.4 Složení plynu

Koncentrace plynných složek v plynu byla měřena kontinuálním multikomponentním analyzátozem GAS 3100P SYNGAS. Průměrné složení plynu během měření jednotlivých paliv je uvedeno v Tab.

Tab. 10 Průměrné složení plynu (v objemových procentech)

materiál	CO	CO ₂	CH ₄	TOC	H ₂
PP + PE	1,8	9,8	25,0	62,5	0,6
ABS	5,9	14,5	35,2	30,6	13,8

3.5 Diskuze

Vstupní materiály obsahují vysoké množství prchavé hořlaviny a popela, a proto tuhé zbytky obsahují nižší obsah uhlíku a vysoké množství popelovin. Vzorky PP+PE a ABS byly bohaté na produkci pyrolýzního oleje, což vyplývá z hmotnostní bilance, menší množství materiálu se transformovalo do tuhého zbytku a docházelo k nízké produkci pyrolýzního plynu.

4. ZÁVĚR

Zhodnocování alternativních paliv termochemickou konverzí se jeví jako vhodný způsob, jak uskutečnit odklon od skládkování odpadů a dekarbonizovat energetiku nejen v České republice. Při pyrolýzním procesu dochází k transformaci vstupních materiálů na energeticky bohaté produkty: plyn, olej a tuhý zbytek, které lze po úpravách nadále využívat. O pyrolýzní kapalinu jeví zájem např. petrochemické společnosti, které by ji využily pro přimíchávání do fosilní ropy, společnosti zabývající se nakládáním s odpady ve spojení s místními municipalitami, chtějí vyrábět pyrolýzní kapalinu do zásob a v zimních měsících s ní částečně sanovat spotřeby zemního plynu k výrobě tepla. Papírenské a společnosti vyrábějící obalové a balicí materiály mají zájem o separaci hliníku, případně jiných kovů, které lze získat pyrolýzním procesem ve formě tuhého zbytku ze vstupních materiálů. Pyrolýzní plyn lze po jeho vyčištění využívat v režimu self-heating při samotném pyrolýzním procesu.

Literatura

- [1] Straka, P. Úvodem. Netradiční zdroje energie, čistá paliva a nové metody spalování 2016, 2–3.
- [2] Zákon o odpadech. SBÍRKA ZÁKONŮ ČESKÁ REPUBLIKA, Zákon č. 541/2020 Sb.
- [3] Produkce odpadů podle krajů (v tunách). [https://www.czso.cz. https://www.czso.cz/documents/10180/164986107/2800202204.pdf/987d3def-e83d-4843-aea0-cb712d32efdc?version=1.1](https://www.czso.cz/https://www.czso.cz/documents/10180/164986107/2800202204.pdf/987d3def-e83d-4843-aea0-cb712d32efdc?version=1.1) (accessed Feb 14, 2023).
- [4] Porovnání alternativních paliv. odpady-online.cz. <https://odpady-online.cz/porovnani-alternativnich-paliv/> (accessed Feb 14, 2023).
- [5] Návrh vyhlášky, kterou se stanoví podmínky, při jejichž splnění přestává být palivo z odpadu odpadem. [odok.cz/portal/. https://odok.cz/portal/veklep/material/ALBSCEX9BXBI/](https://odok.cz/portal/veklep/material/ALBSCEX9BXBI/) (accessed Feb 14, 2023).
- [6] Labaki, M., Jeguirim, M. Thermochemical conversion of waste tyres—a review. *Environ Sci Pollut Res* 24, 9962–9992 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7780-0>
- [7] Chang, Y.; Chen, W.; Chang, N. Comparative evaluation of RDF and MSW incineration. *Journal of Hazardous Materials* 1998, 58, 33–45. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(97\)00118-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(97)00118-0)
- [8] Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR Statistika energetického využívání odpadů a alternativních paliv 1989–2021; 2022.
- [9] Tuhá alternativní paliva hrají stěžejní roli v budoucnosti energetiky, 2022. <https://www.denik.cz/. https://pr.denik.cz/doporucujeme/tuha-alternativni-paliva-hraji-stezejni-rol-v-budoucnosti-energetiky-20220915.html> (accessed Feb 14, 2023).

- [10] Pohořelý, M.; Jeremiáš, M. Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění. biom.cz. <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni> (accessed Jan 14, 2023).
- [11] OBROUČKA, K. Termické odstraňování a energetické využívání odpadů. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2001 – 140 s. ISBN 80-248-0009-0



EVALUATION OF THE ESTABLISHMENT OF HUHA 2 WASTE INCINERATION PLANT IN THE DISTRICT HEATING SUPPLY OF BUDAPEST

**Kende Kocsis¹,
Balázs Bokor, PhD²**

1: MSc Student, 2: PhD, Assist. Prof.

Budapest University of Technology and
Economics, Faculty of Mechanical
Engineering, Department of Building
Service and Process Engineering,
Budapest, Hungary
kende.kocsis@gmail.com

Abstract

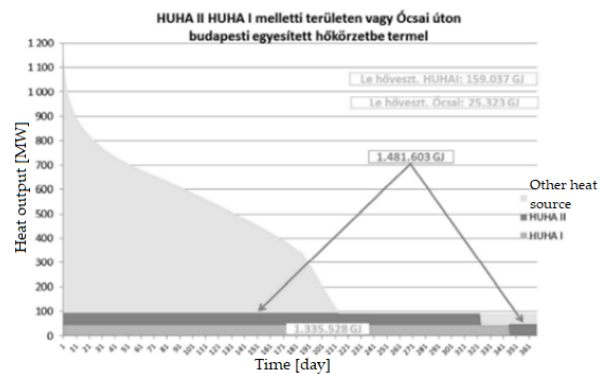
Globally, 1.3 trillion tonnes of municipal solid waste is generated each year, equivalent to 180 kg per person per year. This is expected to rise to 2.2 trillion tonnes by 2025. In developed countries such as the European Union and the USA, this figure is significantly higher. According to the EU regulatory framework, the most efficient waste management methods are prevention, recycling and energy recovery. The worst option is landfilling of municipal solid waste due to space requirements, aesthetic and environmental impacts, and the release of unused methane from decomposition into the atmosphere. The GWP of methane is twenty-five times that of CO₂, making it a significantly bigger problem for global warming. In addition to environmental impacts, reducing energy dependency has recently become a major concern for European countries due to the Russian-Ukrainian war, which has led to severe gas price increases and security of supply problems.

In the framework of this study, I have carried out an economic analysis of the establishment of a second incineration plant in Budapest, taking into account the evolution of international gas prices.

1. IMPORTANCE OF THE INSTALLATION

In the course of the study, I examined the establishment of the second waste-to-energy plant in Budapest, HUHA 2. Based on a previously prepared siting study by Főtv, I chose the site of HUHA 2 in South Pest, near Ócsai road. [1] The power plant to be installed was compared with the Kelenföld, Kispest and Csepel power plants, which currently supply the area of installation, from the point of view of economy and return on investment. These plants are all gas-fired plants and therefore the basis of comparison was also a gas-fired plant. Currently, in Hungary, most of the municipal solid waste (MSW) generated is landfilled, which raises environmental issues and goes against EU regulations, so the use of energy from MSW is a profitable activity. The plant has an annual waste capacity of 230 000 tonnes of MSW, which can be further increased by the installation of a pre-sorting plant. To achieve this separation, I have installed a pre-sorter in the plant, which converts the MSW into RDF (Refused Derived Fuel) or SRF

(Solid Recovered Fuel), greatly increasing its calorific value and thus its quality as a fuel. The calorific value of MSW ranges from 7.5 to 10.5 MJ/kg, while the calorific value of SRF/RDF ranges from 19 to 21 MJ/kg. [3] In the documentation prepared for Főtv, the operating parameters for connection to different heat districts are discussed, of which the connection to the whole Budapest district heating network is examined below. In this state, the plant operates as a base-load power plant for most of the year with a thermal output of 55 MW and a corresponding electrical output of 14.6 MW, which I will use in the following.



1. Figure: Time – Heat power output diagram of HUHA 2 [1]

2. ECONOMIC ANALYSIS

2.1. Investment Costs

As a first step, I determined the investment costs. Since the value assessment of the study since 2017 has not been carried out, and the cost of the elements to be included in the plant is determined by a personal bid, I determined the inflation rate at the time of the study since 2017, which was 25.5%. [4] I then multiplied the adjusted 2017 investment cost prices by the value of inflation to get the potential investment costs today.

2.2. Annuities

Once the investment costs have been determined, I have calculated an annuity for the investment, which allows me to determine the costs projected for each year of operation. For the annuity calculation, I set the inflation rate at 7%. The reason for this was that, although the current inflation rate will exceed 9% in May 2022, it is unrealistic to use this rate for the whole 20-year lifetime. I have taken the nominal interest rate to be 5%. I split the investment into an equity part and a debt part, which I then adjusted for inflation over the 20-year period. The annual return thus obtained, adjusted for inflation, was determined for each year of operation. I carried out the same steps for the own contribution to the investment (excluding, of course, the interest on the loan) and then summed the values obtained for each year to obtain the total annuity for each year. There is a HUF 2.5 billion co-payment for the investment, which would be provided by the investor. In addition, HUF 50 billion would be provided by the City of Budapest as an investment amount, with the remaining balance to be covered by borrowing or co-financing.

2.3. Fixed and Variable Costs

For the fixed costs, I followed a similar logic as for the investment costs, adjusting most of the costs for inflation, such as maintenance, labour, etc. For the variable costs, it was a step more complicated, as energy prices could not be determined on this basis.

For transport costs, I calculated the costs based on the change in fuel prices, for electricity revenues I used HUPX data for the current European market prices, which at the time of writing the study was €265, which at a currency exchange rate of 380 HUF/€ is 100,700 Ft/MWh. Based on CEEGEX data, I calculated the international gas price, which is 96 €/MWh, equivalent to 37 240 HUF/MWh.

2.4. Determining the cost of CO₂ quotes

CO₂ quota prices are calculated on the basis of the total energy produced.

$$C_{CO_2} = \frac{(E_{heat,sold} + E_{electricity,sold}) * \frac{\dot{m}_{MSW}}{10^6}}{\eta_{msw,cogeneration}} * p_{CO_2}$$

Where:

- C_{CO_2} = CO₂ quota price [Ft]
- $E_{heat,sold}$ = thermal energy sold per year [kWh/year]
- $E_{electricity,sold}$ = annual electricity sold [kWh/year]
- $\dot{m}_{MSW}$ = specific CO₂ emissions from TSZH combustion [g/kWh]
- $\eta_{msw,cogeneration}$ = Cogeneration efficiency of HUHA 2 [-]
- p_{CO_2} = price of the CO₂ quotas [Ft/t]

To determine the cost of the quota, we first need to know what the specific emissions of the MSW combustion are.

$$\dot{m}_{MSW} = \frac{(1 - \alpha) * f_{MSW,weight}}{F}$$

Where:

- α = climate neutrality ratio [-]
- $f_{MSW,weight}$ = specific CO₂ emissions of MSW by mass [tonnes(CO₂)/kg(MSW)]
- F = calorific value of MSW [MJ/kg]

The value of the climate neutrality ratio is $\alpha = 0.5$ according to the Hungarian regulations. The alpha indicates that the part of the energy produced by the power plant is considered to be renewable energy and thus exempt from CO₂ quota prices and emissions.

Specific mass CO₂ emissions based on the CEWEP report $f_{MSW,weight} = 0.9$ tonnes (CO₂)/kg(MSW). [5] If the calorific value of MSW is assumed to be 8 MJ/kg, the specific CO₂ emission value is $\dot{m}_{MSW} = 202.5$ g/kWh.

We can then give the quota costs we calculated earlier. The quota price is currently 19 760 HUF/tonne (CO₂), which is much higher than 5 years ago (5,000 HUF in 2017) and is currently increasing exponentially. The cost of quotas for the MSW has become HUF 2 806.86 million per year. The coupled efficiency of HUHA 2 is 80.9% based on the projected electrical and heat output performances, with 63.9% for heat extraction and 16.9% for electrical extraction.[6][7] The CO₂ quota cost of natural gas-fired power plants can be obtained using the same logic, and I have assumed a cogeneration efficiency of 0.8 for gas turbine power plants.

I calculated the specific CO₂ emissions of natural gas using a stoichiometric equation and specific heat. Based on these calculations, the specific emissions of gas are 198 g/kWh. The CO₂ emissions of HUHA 2 would be higher than those of gas turbine power plants, with a difference of more than 20 000 tonnes per year. In reality, the CO₂ emissions from the incineration of HCH would be reduced if the amount of landfill gas released during landfilling were included, but this is not addressed in this study.

2.5. Net Present Value and Payback Period

In the net present value calculation, I considered two cases: in the first case, the investment would be self-financed, and in the second case, the investment would be financed with HUF 50 billion in subsidies and loans in addition to the HUF 2.5 billion co-financing. The calculation method is as follows:

$$NPV = \sum_n \frac{I_{net}}{(1+r)^n} - C_{investment}$$

Where:

- NPV = net present value [Ft]
- I_{net} = yearly net income [Ft]
- r = inflation [-]
- $C_{investment}$ = cost of investment [Ft]

We can calculate the payback period by measuring where the NPV is zero ($NPV=0$). In the case of loans, the net present value of the annual repayments has to be subtracted from the profits, calculated as follows:

$$NPV_{loan} = \sum_n \frac{\frac{C_{loan}}{m} * (1 + THM)^n}{(1+r)^n}$$

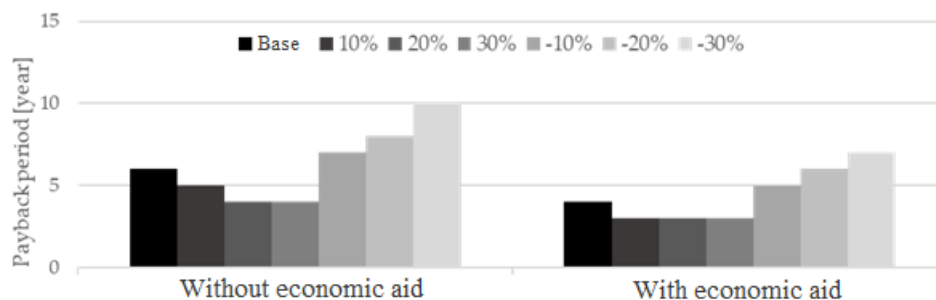
Where:

- NPV_{loan} = the present value of the loan repayments [Ft]
- C_{loan} = sum of the loan [Ft]
- THM = bank interest on the loan [-]
- m = duration of the loan in years [-]

From the credit adjusted subsidised NPV, the present value of the loan repayments over the life of the loan should also be deducted.

$$NPV = \sum_n \frac{I_{net}}{(1+r)^n} - C_{investment} - NPV_{loan}$$

I have assumed a loan term of 15 years and an APR of 0.053 based on the values at the time of writing the study. Since the investment cost I used is only an estimate and does not include the recent increase in raw material and labour costs, I also calculated the changes in the investment cost I calculated to a $\pm 30\%$ level and then used these to make the return calculations. The results are shown below on 2. Figure:



2. Figure: Evolution of payback periods with changes in investment cost

Several cases have the same payback period as shown in the graph. This can be explained by the sampling interval of the calculation, which measured the data in annual intervals, of course, measured in months, as gas prices rise each project would pay back sooner.

3. DETERMINING THE UNIT COSTS

One of the main indicators of the operation and economics of power plants is the unit cost, which is the amount of money invested to produce 1 kWh of energy. These indicators can be determined for both heat and electricity supply. The annuity values calculated earlier are used again here, because these subtotals will give us the annual cost of building the plant with the loans. After separating the fixed and variable costs, we can now calculate an aggregate unit cost, which does not yet take into account heat and electricity.

$$f = \frac{(A + C_{fix} + C_{variable})}{E_{heat,sold} + E_{electricity,sold}}$$

Where:

- f = specific cost [HUF/kWh]

The variable heat costs were determined by taking into account the impacts and power outputs as follows:

$$p_{heat} = p_{variable} * \left(1 - \frac{P_{electricity}}{P_{heat}}\right) * \left(1 - \frac{\eta_{electricity}}{\eta_{heat}}\right)$$

Where:

- p_{heat} = variable heat cost [Ft]
- $P_{electricity}$ = electrical power output [MW]
- P_{heat} = delivered thermal power [MW]
- $\eta_{electricity}$ = electrical partial efficiency [-]
- η_{heat} = heat input coefficient [-]

For the calculation of the variable electricity cost, only the difference between the variable cost and the previously calculated variable heat cost is needed.

$$p_{electricity} = p_{variable} - p_{heat}$$

To calculate the specific heat costs, I took into account the annuity costs, the fixed costs and the variable costs calculated above. For the accuracy of the calculation, I have allocated the investment costs in proportion to the energy produced, so that the actual cost of production is more apparent.

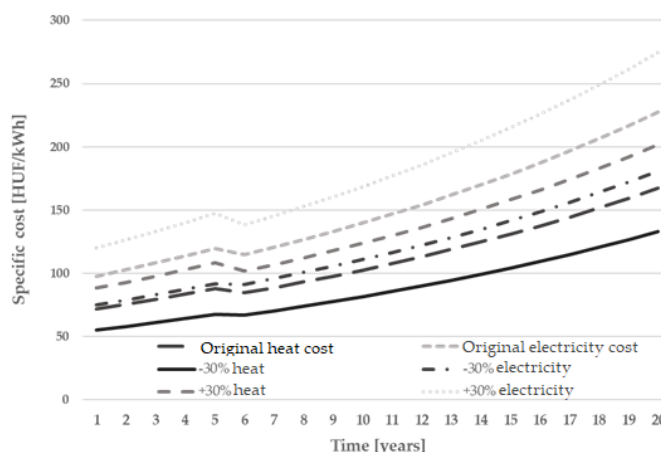
$$f_{heat} = \frac{(A + C_{fix}) * \left(1 - \frac{P_{electricity}}{P_{heat} + P_{electricity}}\right) + p_{heat}}{E_{heat,sold}}$$

Ahol:

- f_{heat} = specific heat cost [Ft/kWh]

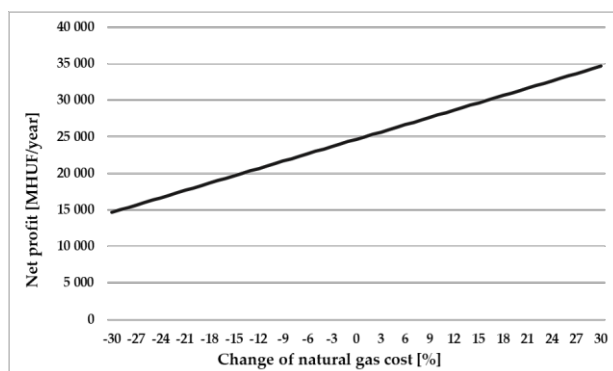
Specific electricity costs are determined using the same methodology. Due to the instability of the gas market, I have calculated gas prices here too to within $\pm 30\%$ of the current case.

Figure 3 illustrates for us the dependence of the specific heat and electricity costs on the gas price as a function of the life year. To avoid overcrowding the diagram, I have only shown the extreme values for the $\pm 30\%$ gas price change with the current 'baseline' costs. The diagram shows a break in the functions at year 5, because, taking into account the averaged installation time and the investment costs of the three gas plants over an assumed 20-year period, this depreciation period would end 5 years after the construction of HUHA 2, after which the investment costs would no longer increase the unit costs.



3. Figure: Evolution of specific heat and electricity costs with changes in gas prices

The net profit of HUHA 2 from the state's point of view is positively correlated with the gas price, and the diagram below illustrates how much profit the plant could make depending on the gas price.



4. Figure: Net profit realised by HUHA 2 as a function of gas prices

4. SUMMARY

In the light of the results presented, it can be concluded that although MSW combustion has its negative aspects, mainly in terms of the complexity of meeting the requirements, the use of poor quality fuel and the corrosion problems it causes, it has a huge economic advantage over gas-fired power plants and many environmental benefits, which are also reflected in the EU regulations. In conclusion, HUHA 2 would be an economically very fast-returning power generation unit, dynamically adapting to international prices, which could generate a net revenue of HUF 25 billion per year for the public administration at the gas prices prevailing at the time of the study.

Acknowledgements

Supported by the ÚNKP-22-2-I-BME-66 New National Excellence Program of the ministry of Culture and Innovation from the source of the National Research, Development and Innovation Fund.



„This research was funded by the National Research, Development, and Innovation Fund of Hungary under Grant TKP2021-EGA-02.”

References

- [1] HUHA II. Új Iszapégető és Hulladék-hasznosító Erőmű Műszaki Döntés Előkészítő Tanulmány Rev.1. (S-6 Mérnök Kft, koordinátor: Orbán Tibor, 2017. augusztus)
- [2] KSH TSZH kezelési adatok: https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0029.html (Utolsó letöltés: 2022. 05. 25.)
- [3] SRF-RDF különbség: http://www.combustioninstitute.hu/tdk_dij/2019/SebeEmese_TDK2018.pdf (Utolsó letöltés: 2022. 05. 25.)
- [4] Infláció alakulása: <https://www.mnb.hu/letoltes/hun-ir-digitalis-13.pdf> és https://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_qsf001.html (Utolsó letöltés: 2022. 05. 25.)
- [5] dr. Dieter O. Reimann: CWEWP Energy Report III. (status 2007-2010)
- [6] Földgáz fajlagos kibocsátása : http://energia.bme.hu/~kaszas/Energetika%20II/1_Energiahordozok-1.pdf (Utolsó letöltés: 2022. 05. 25.)
- [7] CO2 kvóta ára: <https://www.portfolio.hu/gazdasag/20210511/sohasem-volt-meg-ilyen-magas-a-szen-dioxid-kvotak-ara-es-ez-meg-csak-a-kezdet> (Utolsó letöltés: 2022. 05. 25.)
- [8] Gergely László Zsolt: Hulladékok energetikai hasznosítása- Új hulladékhasznosító mű létesítése (Budapest, 2018)
- [9] Takács, J. “Possibility of Geothermal Water’s Using in Geothermal Energy Systems”, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 61(4), pp. 272–275, 2017. <https://doi.org/10.3311/PPme.10546>
- [10] Takács, J., Straková, Z., Rácz, L. “Costs Analysis of Circulation Pumps for Heating of Residential Building”, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 62(1), pp. 10–15, 2018. <https://doi.org/10.3311/PPme.10606>

