

LCA vybraných technologií snižování emisí při spalování tuhých paliv

Life cycle assessment of selected emissions abatement technologies of the solid fuel plant

Eva-Žofie Hlinková¹; Monika Vitvarová²; Vladimír Kočí³



INFORMACE O ČLÁNKU

DOI 10.35933/ENTECHO.2023.002

HISTORIE

Datum doručení: 30. 11. 2022

Datum revize: 9. 4. 2024

Datum akceptace: 14. 4. 2024

AFILACE

VŠCHT Praha, Technická 5,
166 28 Praha 6

¹ +420 602 539 395; evza@volny.cz;

² Monika.Vitvarova@vscht.cz;

³ Vlad.Koci@vscht.cz;

ORCID ID 0000-0001-9428-8655

KLÍČOVÁ SLOVA

Posuzování životního cyklu; LCA; spalování tuhých fosilních paliv; BREF; BAT; snižování emisí; kyselé plyny; snižování emisí oxidů síry

KEYWORDS

Life Cycle Assessment; LCA; incineration of fossil fuels; BREF; BAT; Best Available Techniques; acid gases; reducing sulphur gases emissions

ABSTRAKT

Cílem této práce bylo s využitím metody LCA zhodnotit vlivy implementace vybraných technologií čištění spalin pro snižování emisí kyselých plynů (SO_x, HCl, HF) odpovídající BAT do typového zdroje spalujícího tuhá fosilní paliva (lignit). Za účelem posouzení implementace BAT bylo navrženo 6 scénářů technologií čištění spalin, které uvažovaly zařízení bez implementace odsiřovací jednotky, s SDA, s mokrou FGD a s implementací BAT pro její intenzifikaci. Data scénářů vycházela z provozní fáze reálného typového zdroje a byla dále aproximována dle literatury. Významným výstupem z práce bylo využití metody LCA jako nástroje k nalezení tzv. breakpointu, tedy hranice určující do jaké míry má snižování přímých emisí zdroje pozitivní přínos s ohledem na celkové environmentální dopady v rámci vymezených hranic životního cyklu.

ABSTRACT

This study aims to use the LCA method for a comprehensive assessment of the environmental impacts of acidic gases (SO_x, HCl, HF) emission abatement technologies corresponding to BAT for the selected large combustion plant burning solid fuel (lignite). In order to assess the implementation of BAT, six scenarios of abatement technologies were proposed – technology without the implementation of a desulphurisation unit, with SDA, with FGD and with the implementation of BAT for FGDs intensification. The scenario data were based on the operational phase of the real type source and were further approximated according to the literature. An important outcome of the study was the use of LCA method as a tool to find the breakpoint that determines the extent to which the reduction of direct emissions has a positive benefit with regard to the overall environmental impacts within the defined life cycle.

1 Úvod

V rámci monitorování antropogenních vlivů na složky životního prostředí jsou vytvářeny a používány různé nástroje ke sledování a predikci zdravotních rizik na lidskou populaci a nepříznivých dopadů na ekosystémy. Pro dosažení stanovovaných environmentálních cílů a omezení znečišťování životního prostředí jsou zaváděny právní a ekonomické nástroje. Na základě současných poznatků jsou pro dotčená průmyslová odvětví v rámci Evropské unie zveřejňovány závěry o nejlepších dostupných technikách (*Best Available Technique* – BAT), které jsou součástí referenčních dokumentů nejlepších dostupných technik (*Reference Document on Best Available Techniques* – BREF). Zveřejňované Závěry o BAT jsou pro příslušné orgány členských států vodítkem pro hodnocení úrovně antropogenního znečišťování životního prostředí.

Jedním z využívaných nástrojů snažících se o komplexní přístup k uvedené problematice je analytická metoda posuzování životního cyklu (*Life Cycle Assessment* – LCA), která slouží k posuzování environmentálních dopadů výrobků, technologií či služeb v rámci jejich celé-

ho životního cyklu. LCA umožňuje i posouzení tzv. nepřímých emisí, které vznikají v rámci životního cyklu posuzovaného produktu. Uvedená metodika byla využita k posouzení vlivu implementace vybraných technologií čištění spalin za účelem snižování emisí kyselých plynů (SO_x, HCl, HF) dle podmínek BAT do typového zdroje na spalování českého energetického uhlí (lignitu). Typovým zdrojem byla zvolena elektrárna na území ČR spalující lignit v práškovém (granulačním) kotli o tepelném jmenovitém výkonu 100 MWe. Provedená analýza byla zaměřena na posouzení provozní fáze zdroje (zařízení), jakožto nejvíce zatěžující fáze celkových environmentálních dopadů způsobovaných zařízením.

Předmětem posouzení implementace BAT v rámci zdroje bylo navrženo šest scénářů technologií pro čištění spalin. Byly posouzeny dopady zařízení bez implementace odsiřovací jednotky, s polosuchou vápencovou metodou (*Semi-Dry Absorption method of Flue Gas Desulphurization* – SDA), s mokrou vápencovou vypírkou (*Flue Gas Desulphurization* – FGD) a s implementací BAT pro její intenzifikaci. Data pro analýzu scénářů vycházela z reálného zařízení a byla pro potřeby posuzování aproximována podle dostupných informací z literatury.

Ke zpracování dat byl využit software OpenLCA verze 1.11.0. Environmentální dopady jednotlivých scénářů byly hodnoceny a vzájemně porovnány prostřednictvím charakterizačních modelů evropské metodiky *Product Environmental Footprint* verze 3.0. Vybrané majoritní kategorie dopadů a identifikované procesy, které přispívají k jejich významnosti, byly podrobně posouzeny a výsledná zjištění byla zhodnocena s posouzením míry, do jaké má snižování přímých emisí pozitivní přínos a v jakém případě by docházelo naopak vlivem intenzifikace technologií k navýšení celkových environmentálních dopadů zařízení.

1.1 Referenční dokumenty nejlepších dostupných technik – BREF

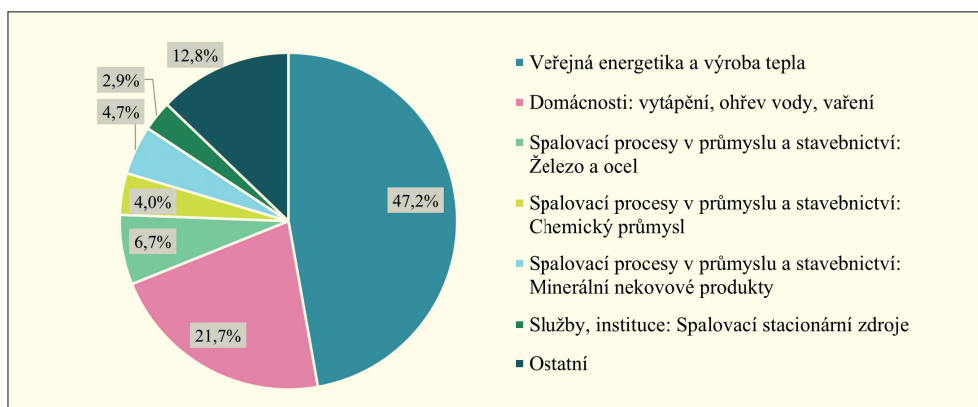
Referenční technické dokumenty BREF jsou výsledkem výměny informací na území Evropské unie a obsahují faktické technické a ekonomické informace pro vybrané průmyslové činnosti. Tyto dokumenty jsou členskými státy poskytovány na základě směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU o průmyslových emisích (integrování prevence a omezování znečištění) z angl. *Industrial Emissions Directive* (IED). Z uvedených přehledů nejlepších dostupných technik (*Best Available Technique – BAT*) jsou stanovovány Závěry o BAT, sloužící jako nástroj k dosažení environmentálních cílů u dotčených průmyslových oblastí. Tato práce byla na základě významnosti spalovacích procesů jako zdrojů emisí znečišťujících látek zaměřena na BREF velkých spalovacích zařízení (*Large Combustion Plants – LCP*), dané prováděcím rozhodnutím Komise (EU) 2017/1442/EU, které stanovuje závěry o BAT pro spalování paliv v zařízeních o celkovém jmenovitém tepelném příkonu 50 MW nebo více, pro zplyňování černého uhlí nebo jiných paliv v zařízeních o celkovém jmenovitém tepelném příkonu 20 MW a vyšším a pro odstranění nebo využití odpadu v zařízeních na spalování odpadu při kapacitě větší než 3 tuny za hodinu pro odpad neklasifikovaný jako nebezpečný a kapacitě větší než 10 tun za den pro nebezpečný odpad. V rámci prováděného posouzení bylo

čerpáno především z kapitoly 10 dotčeného dokumentu, týkající se velkých spalovacích zařízení na tuhá paliva a Závěrů o BAT pro spalování tuhých paliv, které kladou důraz především na předcházení uvolňování emisí do životního prostředí s prioritním řízením emisí do ovzduší. Uváděné Závěry o BAT se týkají vybrané úrovně zařízení např. úrovně energetické účinnosti spojené s BAT (BAT-AEEL) nebo úrovně emisí spojených s BAT (BAT-AEL) a dalších, které prostřednictvím základních jednotek stanovují jejich požadované hodnoty. (European Parliament and the Council, 2010; European Commission, 2017; Lecomte et al., 2017)

1.1.1 Techniky pro snižování/prevenci emisí kyselých plynů

Díky širokým znalostem o provozu technologií pro snižování emisí kyselých plynů a dostupnosti experimentálních dat vztahujících se k jejich provozu byly vybrány techniky pro snižování/prevenci kyselých plynů jako vhodný příklad posuzování environmentálních dopadů implementace BAT. Hlavními představiteli emisí kyselých plynů jsou oxidy síry (SO_x). Převážnou část emisí oxidů síry (95–99%) pak tvoří oxid siřičitý (SO₂). Primárním antropogenním zdrojem emisí oxidů síry je v současnosti spalování paliv obsahujících sloučeniny síry. V tuhých fosilních palivech je síra přítomna převážně ve formě organických sloučenin či anorganických sulfidů. V případě českých hnědých uhlí užívaných v energetickém průmyslu se obsah síry pohybuje mezi 1 až 3%. Dalšími významnými zdroji emisí SO₂ jsou petrochemický, metalurgický či chemický průmysl a také spalovací procesy v motorech dopravních prostředků. Na Obr. 1 je patrné rozložení zdrojů emisí oxidů síry v České republice. Převládající původ oxidů síry vychází ze sektoru veřejné energetiky a výroby tepla s nejvyššími koncentracemi v okolí velkých energetických výrobních celků.

Dalšími sledovanými kyselými plyny jsou sloučeniny chloru a fluoru. Uvedené prvky se vyskytují ve fosilních palivech ve stopových množstvích ve formě halogenidů. Při procesech spalování jsou uvolňovány do spalín ve formě ve vodě rozpustných plynů chlorovodíku (HCl) a fluorovodíku (HF).



Obrázek 1: Distribuce zdrojů emisí oxidů síry v České republice za rok 2019 (Český hydrometeorologický ústav, 2021)

Tabulka 1.1: Úrovně emisí spojené s BAT-AEL pro oxid siřičitý (Lecomte et al., 2017)

Celkový jmenovitý tepelný příkon spalovacího zařízení [MWt]	Roční průměr BAT-AEL [mg/Nm ³]		Denní průměr BAT-AEL [mg/Nm ³]	Denní průměr nebo průměr za interval odběru vzorků BAT-AEL [mg/Nm ³]
	nové zařízení	stávající zařízení	nové zařízení	stávající zařízení
<100	150–200	150–360	170–220	170–400
100–300	80–150	95–200	135–200	135–220
≥ 300, kotel s práškovým spalováním	10–75	10–130	25–110	25–165
≥ 300, kotel s fluidním ložem	20–75	20–180	25–110	50–220

Tabulka 1.2: Úrovně emisí spojené s BAT-AEL pro sledované halogenidy (Lecomte et al., 2017)

Znečišťující látka	Celkový jmenovitý tepelný příkon spalovacího zařízení [MWt]	Denní průměr nebo průměr za interval odběru vzorků BAT-AEL [mg/Nm ³]	
		nové zařízení	stávající zařízení
HCl	<100	1 – 6	2 – 10
	≥100	1 – 3	1 – 5
HF	<100	<1 – 3	<1 – 6
	≥100	<1 – 2	<1 – 3

Emise kyselých plynů a jejich následná kyselá depozice s sebou přináší zdravotní i environmentální rizika. Prostřednictvím BREF LCP a zveřejňovaných Závěrů o BAT jsou stanoveny úrovně emisí spojené s BAT-AEL pro oxid siřičitý ze spalování černého a/nebo hnědého uhlí do ovzduší. Jejich hodnoty jsou uvedeny v BAT 21 a shrnuty v **tabulce 1.1**.

Úrovně emisí spojené s BAT-AEL pro halogenidy ze spalování černého a/nebo hnědého uhlí do ovzduší jsou uvedeny rovněž v BAT 21 a shrnuty v **tabulce 1.2**.

Specifické emisní limity jsou v České republice stanoveny vyhláškou Ministerstva životního prostředí (MŽP) č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší (zákon č. 201/2012 Sb.). Níže v **Tab. 1.3** a **1.4** jsou pro možnost srovnání s hodnotami BAT (**Tab. 1.1** a **1.2**) uvedeny specifické emisní limity pro SO₂ pro spalovací stacionární zdroje o celkovém jmenovitém tepelném příkonu 50 MW a vyšším spalujících pevná paliva a obecné emisní limity pro halogenidy.

Z výše uvedených tabulek je patrné, že BAT-AEL stanovují přísnější hodnoty než národní právní předpisy.

Mezi techniky omezení emisí oxidů síry ze spalování patří: snížení spotřeby paliv zvýšením účinnosti zařízení, náhrada sirnatého uhlí nízkosírnými (0,5 hm. % síry) nebo bezsírnými palivy, odsíření uhlí před spalováním a odsíření spalin. Obecně je nejrozšířenějším nástrojem k omezování oxidů síry i dalších kyselých plynů ze spalovacích procesů neregenerativní čištění spalin. Metody čištění spalin lze dále rozdělit dle použité technologie a fáze, v níž proces probíhá, na suché, polosuché a mokré. Pro potřeby této práce byly z BREF LCP vybrány technologie pro redukcí kyselých plynů uvedené se základní charakteristikou v následující **tabulce 1.5**.

Navíc byla posuzována intenzifikace mokré vápencové vypírky využitím aditiv v podobě kyseliny adipové (optimalizace pH na 5–5,1, zlepšení chemismu procesu) a zavedením dávkování obohaceného vápence oxidem hořečnatým při 3–8 hm. % (zlepšení účinnosti odlučování, snížení spotřeby elektrické energie).

Tabulka 1.3: Specifické emisní limity SO₂ stacionárních zdrojů pro pevná paliva (Ministerstvo životního prostředí, 2012)

Specifické emisní limity pro SO ₂ [mg·m ⁻³]					
Uvedeny do provozu před 7. 1. 2014			Uvedeny do provozu po 7. 1. 2014		
50–100 MW	>100–300 MW	>300 MW	50–100 MW	>100–300 MW	>300 MW
400	250	200	400	200	150
	≥100	<1–2	<1–3		

Tabulka 1.4: Obecné emisní limity pro vybrané halogenidy (Ministerstvo životního prostředí, 2012)

Název znečišťující látky	Hmotnostní tok [g/h]	Hmotnostní koncentrace [mg/m ³]
chlor a jeho plynné anorganické sloučeniny vyjádřené jako HCl	>500	50
fluor a jeho plynné anorganické sloučeniny vyjádřené jako HF	<100	10

Tabulka 1.5: Charakteristika vybraných technologií BREF LCP (Modahl et al., 2012)

Technologie odsíření	Typ sorbentu	Spotřeba surové vody	Spotřeba energie (% z elektrického výkonu)	Vedlejší produkt
mokrý vápencový vypírka	vápenec, vápno, křída	220–250 L/ MWh	1–3 %	sádrovec
polosuchá metoda odsíření	vápno, hydroxid vápenatý	20–40 L/ 1000 m ³ spalin	0,5–1 %	popílek/CaSO ₃ /nezreagovaný sorbent

1.2 LCA

K posouzení environmentálních dopadů uvažovaných technologií byla v této práci použita metoda LCA z angl. *Life cycle assessment*, neboli metoda posuzování životního cyklu. LCA slouží ke komplexní analýze environmentálních dopadů výrobků, technologií nebo služeb v rámci jejich životního cyklu od fáze získávání surovin, výroby, dopravy, užívání až po materiálové využití a úplné odstranění. Studie LCA se provádějí dle mezinárodních standardů ČSN EN ISO 14040 a ČSN EN ISO 14044. Sledované kategorie dopadu, jejich charakterizační faktory a indikátory jsou stanoveny vybranou metodikou, kterou byla v tomto případě evropská metodika Environmentální stopa produktu neboli PEF z angl. *Product Environmental Footprint* ve verzi 3.0 s mid-pointovými indikátory. Environmentální dopady životního cyklu byly modelovány prostřednictvím softwaru OpenLCA 1.11.0.

1.3 LCA velkých spalovacích zařízení v souvislosti s BAT

Šerešová a spol. (Šerešová et al., 2020) provedli studii na LCA obnovitelných a neobnovitelných zdrojů elektrické energie v ČR. Při posuzování životního cyklu byly zahrnuty fáze výstavby, provozu i odstavení technologie dotčených zařízení. U zařízení spalujících lignit bylo zjištěno, že právě proces spalování v provozní fázi vykazuje zařízení nejvyšší environmentální dopady. Aplikovatelnost a benefity LCA pouze pro operační fázi zařízení navíc popisuje Klopffer (Klopffer and Grahl, 2014), který vyzdvihuje možnost detekovat a realizovat společný potenciál k optimalizaci např. dodavatelského řetězce. Papavasiliou a spol. (A et al., 2016) ve své studii posuzovali pomocí LCA zařízení na spalování lignitu s pokrytím všech fází životního cyklu a s detailním zaměřením na fáze těžby surovin. S využitím metodiky CML 2001 vyhodnotili nejvíce zatěžující kategorie dopadu, kterými byly globální oteplování s klimatickými změnami a acidifikace. Nejvyšší celkové environmentální dopady pak byly spojeny s procesem spalování lignitu. Studie závěrem doporučuje využívání technologií pro čištění spalin (SCR, FGD), zavedení systému CCS a výměnu naftových motorových vozidel za environmentálně přijatelnější varianty. Ve studii Silvestri a spol. (Silvestri et al., 2021) byla využívána komparativní analýza LCA při posuzování implementace BAT do stávající technologie výroby obkládových cihel. V závěrech studie autoři upozorňují, že environmentální dopady, které byly získány hodnocením životního cyklu produktu zahrnující BAT, byly obecně vyšší ve srovnání s informacemi v dostupných literárních pramenech a doporučují proto využití metody LCA jako nástroje při rozhodování o zahrnutí nejlepší dostupných technik.

1.4 Popis typového zdroje spalovacího zařízení

Typovým zdrojem byla pro potřeby této práce zvolena velké spalovací zařízení na tuhá (pevná) fosilní paliva, které odpovídá elektrárně s jmenovitým tepelným výkonem 100 MWe / 275 MWt spalující české energetické uhlí – lignit (výhřevnost 10–11 MJ/kg, vlhkost 30–40 % hm., popel 20–30 % hm., síra 1–3 % hm., rtuť 0,2–0,4 kg/kg_{SUS}) na území ČR (Kult, 2011; Skupina ČEZ, 2022). Spalování lignitu probíhá v práškovém (granulačním) kotli s technologií čištění spalin pomocí elektrostatického odlučovače, mokrého odsíření spalin vápencovou vypírkou a selektivní nekatalytické redukce. Roční provoz zařízení byl uvažován v intervalu 7 000 hodin. Typový zdroj odpovídá implementovaným BAT a splňuje požadavky na úroveň emisí BAT-AEL.

2 Studie LCA

Cílem této práce bylo vytvořit podklady pro komplexní hodnocení environmentálních dopadů vybraných technologií snižování emisí nad rámec BAT/BREF pro vybraný zdroj. Posuzovány byly dopady instalace technologie splňující BAT pro redukci emisí oxidů síry a kyselých plynů HCl a HF u zařízení na spalování lignitu v ČR. V rámci práce byly navrženy a posuzovány následující scénáře:

0. Varianta bez implementace odsiřovacího zařízení

Reflektuje přibližnou situaci před rokem 1990. Vyzovuje vstupní toky kyselých plynů do následujících technologií čištění spalin.

1. Srovnání dvou nejběžněji využívaných technologií v ČR

a. Mokrá vápencová vypírka

Odpovídá reálnému typovému zdroji, který splňuje podmínky BAT-AEL s emisním limitem SO₂ 110–120 mg/Nm³. Účinnost odloučení SO₂ ze spalin technologií FGD je 98 %. Představuje výchozí soubor provozních dat zařízení pro aproximaci všech dalších scénářů.

b. Polosuchá metoda odsíření

Aplikace SDA na výstupní data z nultého scénáře se splněním provozního profilu uváděného v BREF a odpovídající účinnosti odsíření spalin 85 %.

2. Intenzifikace existující technologie FGD splňující podmínky BAT

a. Dávkování kyseliny adipové

Navýšení účinnosti odloučení SO₂ ze spalin oproti scénáři 1a na 99 % dávkováním kyseliny adipové v množství 4 mmol/L vápenné suspenze. Technologie splňuje s emisním limitem SO₂ 60–70 mg/Nm³ podmínky BAT-AEL.

b. Obohacení vápence oxidem hořečnatým

Navýšení účinnosti odloučení SO₂ ze spalin oproti scénáři 1a na 99 % obohacením dávkovaného vápence z 6 hm. % oxidem hořečnatým. Technologie splňuje podmínky BAT-AEL s emisním limitem SO₂ 60–70 mg/Nm³.

3. Srovnání technologie FGD s nižší účinností odsíření

Snížení účinnosti odloučení SO₂ ze spalin oproti scénáři 1a na 96,6 % snížením molárního poměru Ca/S. Technologie splňuje emisní limit SO₂ 200 mg/Nm³, který odpovídá nejvyšší možné hodnotě BAT-AEL pro stávající zařízení o jmenovitém tepelném výkonu 100 až 300 MWe.

2.1 Funkce a funkční jednotka

Funkcí posuzovaného systému byla zvolena výroba elektrické energie. Funkční, respektive deklarovaná jednotka sloužící k porovnání produktových systémů byla definována jako produkce 1 MWh elektrické energie.

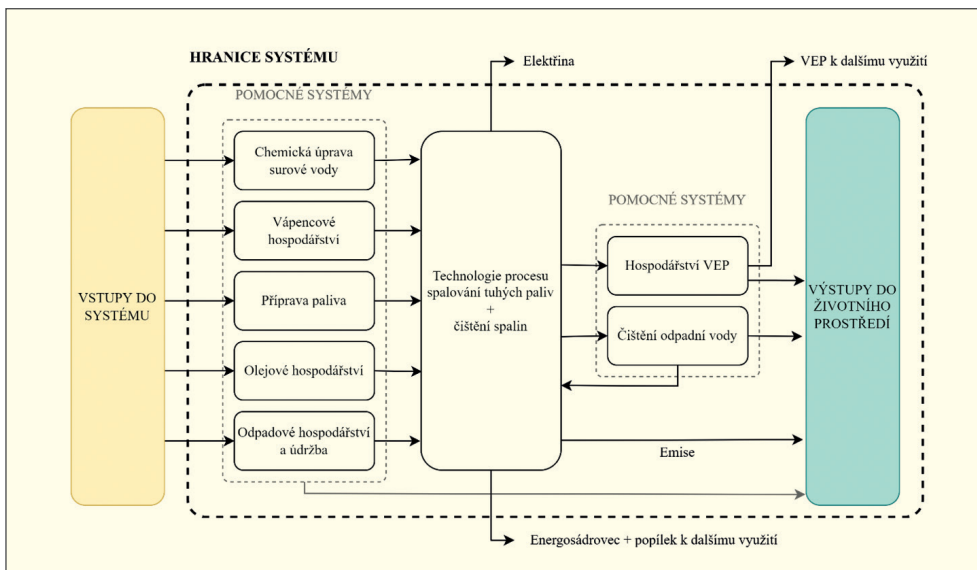
2.2 Hranice systému

Práce byla zaměřena na sledování provozní fáze zařízení, jakožto na fázi nejvíce zatěžující životní prostředí v rámci celého životního cyklu. Neobsahuje proto posouzení environmentálních dopadů výstavby či odstavení technologie. Hranice produktových systémů jsou vyznačeny na **Obr. 2** a zahrnují hlavní proces spalování lignitu a pomocné procesy vápencového hospodářství, chemické úpravy vody, přípravy paliva a dalších technologií pro čištění spalin či procesů údržby a odpadového hospodářství. Do systému jsou zahrnuty výrobní či těžební procesy hlavních surovin. Doprava surovin je zahrnuta v rámci předdefinovaných výrobních procesů, ale není uvažována pro dovoz surovin z výroby k velkému spalovacímu zařízení. Vedlejší energetické produkty a jejich benefity při dalším využití nebyly do systému a posouzení environmentálních dopadů zahrnuty. Vstupy do systému odpovídají časovému rozsahu jednoho provozního roku.

2.3 Přijaté předpoklady a datové zdroje

Pro řešení této studie byly přijaty následující předpoklady.

1. Pomocné procesy, které představují minimální podíl na celkových environmentálních dopadech (transport surovin z výroby do zařízení, olejové hospodářství a údržba zařízení) byly pro zjednodušení systému zanedbány. (Šerešová et al., 2020).



Obrázek 2:
Hranice systému

2. Bylo uvažováno celkové následné využití vedlejších energetických produktů (VEP) jako výrobků bez případných dopadů využití nebo uvážení jejich přínosu např. formou benefitů, které by mohly snižovat celkovou hodnotu environmentálních indikátorů pro primární produkt, tj. elektrickou energii.

3. Odpadní voda vznikající při procesech spalování byla dle nadefinovaného procesu vedena na městskou čistírnu odpadních vod s integrovaným dopadem likvidace kalů formou skládkování. Bylo předpokládáno, že mezi jednotlivými scénáři nedochází k významným rozdílům (<0,5%) v produkci odpadní vody, a proto nebylo upravováno její množství.

4. Protože se jedná o velice komplexní systém, bylo nutné přijmout předpoklady zjednodušené úpravy dat. Pro implementaci BAT, či dalších technologií byly upraveny pouze hlavní nejvíce zasažené toky udávané literaturou či přímo BREF. Bylo předpokládáno, že úpravou parametrů technologií pro odsíření nedochází ke změně účinností dalších technologií čištění spalin.

5. Při úpravách scénářů a výpočtech týkajících se emisí oxidů síry bylo uvažováno, že se jedná o oxid siřičitý, který je nejvíce zastoupenou složkou této skupiny.

6. U scénářů intenzifikace mokré FGD (2a, 2b) a technologie FGD s nižší účinností odsíření (3) byla zanedbána změna odloučení kyselých plynů HCl a HF, protože jak bylo zjištěno při citlivostní analýze, zaujímají v daném množství na celkových environmentálních dopadech účinek menší než 0,01%.

2.4 Datové zdroje

Data potřebná ke zpracování studie byla získávána přímo od provozovatele typového zdroje, z registru znečišťování ovzduší (MŽP et al., 2002), ze souhrnné provozní evidence ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav, 2019), z BREF LCP (Lecomte et al., 2017) a v případě absence i empiricky doložitelná či aproximována dle veřejně dostupných informací (Frandsen et al., 2001; Ibler, 2002; Buchardt et al., 2006; Pimenta, 2010; Del Valle-Zermeño et al., 2015; Bricl and Avsec, 2018; Energetický Regulační Úřad, 2019). Reálná data typového zdroje představovala základ pro scénář technologie mokré FGD odpovídající BAT (1a). Tato data byla pro potřeby dalších scénářů modifikována na základě informací z veřejně dostupných zdrojů zmíněných výše. Data potřebná pro modelování procesů těžby, výroby a dopravy látek v rámci výrobního procesu byla získána použitím již nadefinovaných procesů z databází GaBi, Ecoinvent a ILCD. Zkompletovaná data představovala průměrné hodnoty za provozní fázi zařízení ve třech letech

provozu a byla upravena, aby odpovídala typovému zdroji o 100 MWe na rok provozu.

3 Výsledky a diskuze

Potenciální environmentální dopady posuzovaných scénářů vztažené na funkční jednotku 1 MWh vyrobené elektrické energie jsou interpretovány prostřednictvím následujících **tabulek 2 a 3 a obrázku 3**. Normalizované a vážené výsledky pro všechny posuzované kategorie dopadu EF 3.0 jsou interpretovány prostřednictvím **Obr. 3**. Na základě normalizovaných a vážených výsledků LCA (**Obr. 3**) dosahovala z posuzovaných scénářů nejnižších celkových environmentálních dopadů technologie mokré FGD scénáře 1a. Nejvyšší zatížení životního prostředí jednoznačně zaujímal scénář 0 s absencí odsířovacího zařízení, u kterého bylo předpokládáno, že během procesu čištění spalin nedochází k žádnému zachytu oxidů síry, HCl a HF. Tím byla nejzatěžovanější kategorií dopadu acidifikace, která zaujímala více než polovinu celkového výsledku indikátoru tohoto scénáře. U scénáře 0 docházelo k částečnému snížení environmentálních dopadů v kategorii klimatických změn, vlivem absence uvolňovaného oxidu uhličitého z procesu mokré vápencové vypírky a ušetřením surovin dávkovaných do technologie. I přes zmíněné snížení dopadů však představoval celkový výsledek indikátoru EF 95% nárůst v porovnání se scénářem 1a reálné technologie FGD s BAT.

V případě porovnání scénářů 1a a 1b, dvou nejběžněji využívaných metod odsíření odpovídajících parametrů BAT, představovala nižší celkové environmentální dopady mokrá FGD (1a). Největším rozdílem byl pokles environmentálních dopadů v kategorii acidifikace, který byl zapříčiněn vyšší účinností odloučení SO_2 ze spalin u mokré FGD (98%) oproti odsíření polosuchou metodou (85%).

Metody intenzifikace mokré FGD dávkováním činidel (2a, 2b) vykazovaly vyšší celkové environmentální dopady než referenční mokrá FGD (1a), přestože docházelo v kategorii acidifikace ke snížení dopadů obou scénářů o 25 až 30%. Toto celkové navýšení bylo zapříčiněno environmentálními dopady výrobních procesů dávkovaných činidel, jak je podrobněji rozebráno níže.

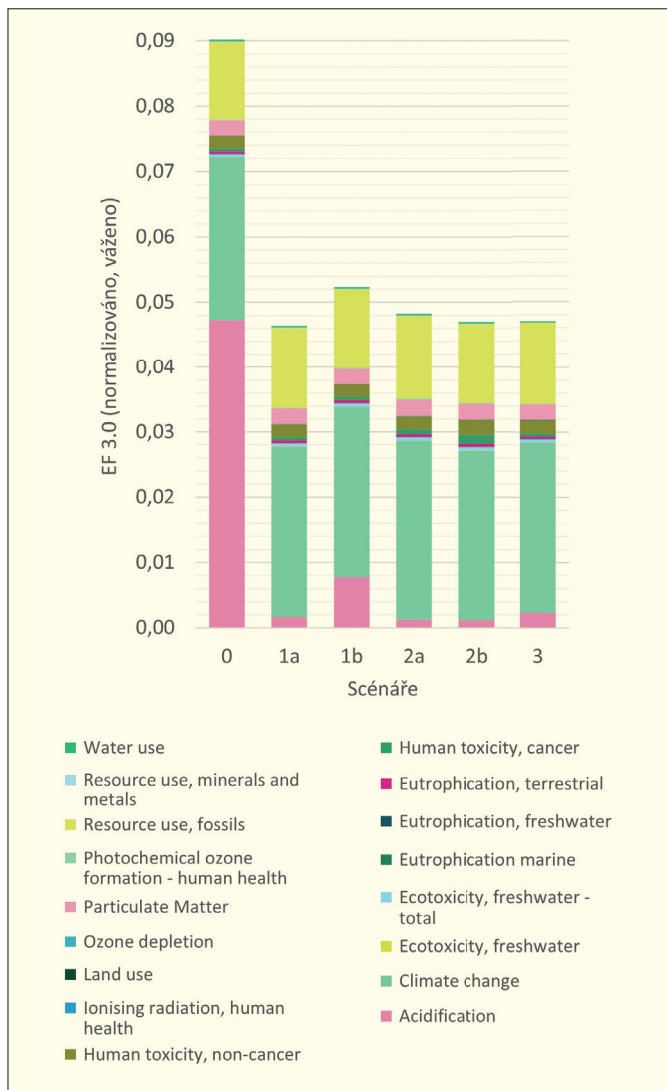
Scénář 2a s dávkováním kyseliny adipové 4 mmol/L suspenze (Pimenta, 2010), představoval v pěti nejzatíženějších kategoriích dopadu navýšení o 4 až 8%. Samotná výroba kyseliny zaujímala 5% celkového výsledku indikátoru scénáře 2a. Ze všech procesů výroby pomocných činidel měla nejvyšší dopady na kategorii klimatické změny právě výroba kyseliny adipové, kde byly nejvíce zatěžujícím tokem emise oxidu dusného do ovzduší. V rámci citlivostní analýzy bylo zjištěno,

Tabulka 2: Environmentální dopady vybraných kategorií dopadu pro scénáře 0, 1a, 1b

PEF 3.0 kategorie dopadu	Jednotky	0	1a	1b
Acidifikace	mol H ⁺	42,37	1,49	6,96
Klimatické změny	kg CO ₂ eq.	957,83	1003,85	1002,75
Sladkovodní ekotoxicita	kg CO ₂ eq.	0,15	0,16	0,16
Sladkovodní ekotoxicita celková	kg CO ₂ eq.	957,66	1003,67	1002,57
Eutrofizace, mořská	kg CO ₂ eq.	2,18E-02	2,35E-02	2,32E-02
Eutrofizace, sladkovodní	CTUe	20,36	18,98	19,11
Eutrofizace, terestriální	CTUe	1037,62	1075,45	1184,20
Humánní toxicita, karcinogenní	kg N eq.	2,29E-02	2,40E-02	2,78E-02
Humánní toxicita, nekarcinogenní	kg P eq.	9,28E-04	9,60E-04	9,50E-04
Ionizační záření	mol N eq.	1,82	1,89	1,89
Využívání krajiny	CTUh	3,47E-07	3,60E-07	3,88E-07
Úbytek ozonu	CTUh	2,44E-05	2,51E-05	2,48E-05
Částice / respirační anorganické látky	kBq U-235 eq.	1,72	1,89	2,15
Fotochemická produkce ozonu	Pt	161,41	170,30	168,82
Úbytek surovin, fosilní	kg CFC11 eq.	3,35E-09	3,47E-09	3,89E-09
Úbytek surovin, nerostné	disease inc.	1,53E-05	1,58E-05	1,55E-05
Úbytek surovin, voda	kg NMVOC eq.	0,08	0,09	0,10

Tabulka 3: Environmentální dopady vybraných kategorií dopadu pro scénáře 2a, 2b 3

PEF 3.0 kategorie dopadu	Jednotky	2a	2b	3
Acidifikace	mol H ⁺	1,12	1,05	2,07
Klimatické změny	kg CO ₂ eq.	1052,36	997,95	1003,65
Sladkovodní ekotoxicita	kg CO ₂ eq.	0,17	0,16	0,16
Sladkovodní ekotoxicita celková	kg CO ₂ eq.	1052,17	997,77	1003,46
Eutrofizace, mořská	kg CO ₂ eq.	2,52E-02	2,35E-02	2,35E-02
Eutrofizace, sladkovodní	CTUe	23,53	71,42	18,98
Eutrofizace, terestriální	CTUe	1162,67	1205,72	1075,41
Humánní toxicita, karcinogenní	kg N eq.	3,61E-02	2,49E-02	2,40E-02
Humánní toxicita, nekarcinogenní	kg P eq.	1,65E-03	9,58E-04	9,60E-04
Ionizační záření	mol N eq.	2,05	1,88	1,89
Využívání krajiny	CTUh	5,31E-07	1,12E-06	3,60E-07
Úbytek ozonu	CTUh	2,58E-05	2,87E-05	2,51E-05
Částice / respirační anorganické látky	kBq U-235 eq.	2,14	2,00	1,88
Fotochemická produkce ozonu	Pt	187,03	170,59	170,27
Úbytek surovin, fosilní	kg CFC11 eq.	3,15E-07	3,64E-09	3,47E-09
Úbytek surovin, nerostné	disease inc.	1,65E-05	1,60E-05	1,58E-05
Úbytek surovin, voda	kg NMVOC eq.	0,14	0,09	0,09



Obrázek 3: Výsledky indikátorů EF 3.0 normalizováno, váženo

že v případě snížení množství kyseliny adipové na 3 mmol/L suspenze, jak ve svém experimentu užívá Frandsen (Frandsen et al., 2001), by docházelo ke snížení celkových environmentálních dopadů scénáře 2a oproti scénáři 1a o téměř 3%.

Dávkováním obohaceného vápence o oxid hořečnatý (2b) docházelo k mírnému snížení (1%) environmentálních dopadů v nejzatíženějších kategoriích klimatické změny a úbytek fosilních surovin, protože byla část vápence ušetřena a docházelo k uvolňování menšího množství oxidu uhličitého v systému. Výrobními procesy oxidu hořečnatého docházelo ke zvýšení dopadů v kategoriích sladkovodní ekotoxicita o 12% a humánní toxicita – nekarcinogenní efekt o 15% oproti scénáři 1a. Součástí citlivostní analýzy bylo ověření možnosti sníženého dávkování ze 6 hm. % na 3% hm. MgO (Del Valle-Zermeño et al., 2015; Bricl and Avsec, 2018) s předpokladem, že by bylo dosaženo stejných výsledků odloučení oxidů síry. V tomto případě by docházelo ke snížení environmentálních dopadů téměř ve všech kategoriích dopadu, nejvíce u sladkovodní ekotoxicity (36,8%) a karcinogenní humánní toxicity (34%). Tím by zároveň došlo ke snížení celkových dopadů o 0,05% vůči referenčnímu scénáři 1a a tedy k úspěšné intenzifikaci se snížením dopadů. Zde je patrné, že už se výsledek snižování emisí čištěním spalin blíží k tzv. breakpointu, nad kterým má ještě smysl přímé emise oxidů síry ze spalin snižovat přidávanými technologiemi či aditiv, však pouze s ohledem na dávkované množství a výrobní proces aditiv.

Z uvedeného vyplývá, že v případě intenzifikace systému může mít dávkované množství i výrobní proces aditiv vliv na celkové environ-

mentální dopady procesu a i v případě snížení sledovaných přímých emisí na výstupu ze zdroje, může dojít k vyššímu zatížení životního prostředí v rámci celého životního cyklu. Proto je nutné zhodnotit při intenzifikaci specifického zdroje, do jaké míry ještě ke snižování celkových environmentálních dopadů dochází. Možnost optimalizovat operační fázi spalovacího zařízení prostřednictvím LCA ve své studii vyzdvihuje taktéž Klopffer (Klopffer and Grahl, 2014). Silvestri a spol. (Silvestri et al., 2021) ve své studii komparativní analýzy LCA upozorňují, že environmentální dopady produktu splňující BAT jsou obecně vyšší ve srovnání s dostupnými informacemi z literatury. Závěrem studie doporučují využití analýzy LCA jako nástroje při rozhodování o zahrnutí BAT, jak souhlasně vychází z výsledků této práce.

Technologie mokré FGD (scénář 3) splňující emisní limit horní hranice BAT-AEL o SO_2 200 mg/Nm^3 s účinností odsíření 96,6% a sníženým molárním poměrem Ca/S vykazovala o 1,4% vyšší celkové environmentální dopady než scénář 1a. Přestože došlo k mírnému snížení dávkování vápence, surové vody a snížení části spotřeby elektrické energie byly vyšší celkové dopady zapříčiněny nárůstem v kategorii acidifikace, tedy zvýšením množství emisí oxidů síry ze zdroje.

Jak je také patrné z obrázku 3 nejvíce zatěžující kategorií dopadu v celkovém výsledku indikátoru po normalizování a vážení pro scénáře 1a až 3 byly klimatické změny následované úbytkem fosilních surovin, tvorbou částic (PM), humánní toxicitou s nekarcinogenním efektem, acidifikací a sladkovodní ekotoxicitou. Nejvíce zatěžujícím procesem systému v rámci modelovaného životního cyklu bylo pro všechny scénáře samotné spalování. Hlavní tok, který toto zatížení způsoboval byly emise oxidu uhličitého ve spalinách vznikající při spalování paliva v kotli. Papavasilioua a spol. (A et al., 2016) ve své studii zabývající se posouzením spalování lignitu představoval jako nejvíce zatěžovanou kategorií dopadu taktéž klimatické změny. Nejvíce zatěžujícím procesem celkových environmentálních dopadů bylo dle autora též samotné spalování lignitu.

V rámci citlivostní analýzy byl také zkoumán vliv emisí HCl a HF na celkové environmentální dopady a kategorie dopadu. Pro srovnání byla modelována situace, ve které by docházelo k úplnému zachytu HCl a HF u scénáře 0, ovšem bez změny dalších parametrů. Bylo zjištěno, že celkové environmentální dopady po normalizaci a vážení jsou při posuzování množství vyvinutých plynů sníženy pouze o 0,1%. Z uvedeného vyplývá, že odloučení kyselých plynů HCl a HF nepředstavuje významný vliv na snížení celkových environmentálních dopadů velkého spalovacího zařízení.

4 Závěr

V prezentované práci byl metodou LCA posuzován vliv implementace vybraných BAT do typového zdroje na spalování energetického uhlí (lignit) na území ČR. Cílem práce bylo vytvořit podklady pro komplexní hodnocení environmentálních dopadů vybraných technologií snižování emisí splňující BAT pro vybraný typový zdroj. Za tímto účelem bylo posuzováno snížení emisí kyselých plynů (SO_x , HCl, HF) do ovzduší pomocí technologií čištění spalin v provozní fázi velkého spalovacího zařízení prostřednictvím šesti navržených scénářů. Referenční scénář (1a) vycházel z reálného typového zdroje s čištěním spalin technologií mokré vápencové vypírky splňující BAT-AEL emisní limit SO_2 110–120 mg/Nm^3 .

Výsledná zjištění ověřily přínos implementace technologií čištění spalin odpovídající BAT s cílem snížení emisí kyselých plynů. Bylo zjištěno, že důležitým prvkem pro budoucí snížení přímých emisí zařízení, by mělo být specifické posouzení možné intenzifikace technologií čištění spalin se zaměřením na optimalizaci dávkování a výrobní procesy aditiv. Do jaké míry má snižování přímých emisí pozitivní přínos lze posoudit prostřednictvím metody LCA, nalezením tzv. breakpointů, které udávají pomyslnou hranici, nad kterou ještě dochází ke snižování celkových environmentálních dopadů zařízení a má smysl technologie intenzifikovat.

LITERATURA

- A. P.; Roumpos, C.; Voulgarakis, A.; Michalakopoulos, T., 2016. *LIFE CYCLE ANALYSIS OF A LIGNITE-FIRED ELECTRICITY GENERATION SYSTEM*.
- Bricl, M.; Avsec, J., 2018. *A MAGNESIUM-ENHANCED LIME CLEANING PROCESS OF FLUE GASES*. Journal of Energy Technology 11(3), 37–46.
- Buchardt, C. N.; Johnsson, J. E.; Kiil, S., 2006. *Experimental investigation of the degradation rate of adipic acid in wet flue gas desulphurisation plants*. Fuel 85(5), 725–735, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.08.021>.
- Český hydrometeorologický ústav, Č., 2019. *Údaje o provozovných a emisích ohlášených v souhrnné provozní evidenci Česká republika*.
- Český hydrometeorologický ústav, Č., 2021. *Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2020*. Praha.
- Del Valle-Zermeño, R.; Formosa, J.; Chimenos, J., 2015. *Wet flue gas desulfurization using alkaline agents*. Reviews in Chemical Engineering, doi:10.1515/revce-2015-0002.
- Energetický regulační úřad, E., 2019. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR 2018*. Praha.
- European Commission, E., 2017. *PROVÁDĚCÍ ROZHONUTÍ KOMISE (EU) č. 2017/1442 ze dne 31. července 2017, kterým se stanoví závěry o nejlepších dostupných technikách (BAT) podle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU pro velká spalovací zařízení*. Úřední věstník; L 212/1.
- European Parliament and the Council, E., 2010. *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích*. Úřední věstník; L 334/17.
- Frandsen, J. B. W.; Kiil, S.; Johnsson, J. E., 2001. *Optimisation of a wet FGD pilot plant using fine limestone and organic acids*. Chemical Engineering Science 56(10), 3275–3287, [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00010-0).
- Ibler, Z., 2002. *Technický průvodce energetika*. BEN, Praha.
- Klöpffer, W.; Grahl, B., 2014. *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice*. Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice, 1–396, doi:10.1002/9783527655625.
- Kult, R., 2011. *Lignit v trojmezí – česko-německo-polském*. Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická. Technická univerzita v Liberci, 67.
- Lecomte, T.; Fuente, J. F. F. d. l.; Neuwahl, F.; Canova, M.; Pinasseau, A.; Jankov, I.; Brinkmann, T.; Roudier, S.; Sancho, L. D., 2017. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*.
- Ministerstvo životního prostředí, M., 2012. *Vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečištění a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší*. in: MŽP (Ed.).
- Modahl, I. S.; Askham, C.; Lyng, K.-A.; Brekke, A., 2012. *Weighting of environmental trade-offs in CCS—an LCA case study of electricity from a fossil gas power plant with post-combustion CO₂ capture, transport and storage*. The International Journal of Life Cycle Assessment 17(7), 932–943, doi:10.1007/s11367-012-0421-z.
- MŽP; ČIŽP; CENIA, 2002. *Integrovaný registr znečišťování*.
- Pimenta, M. F., 2010. *Flue gas desulphurization through wet limestone process – adding acids and bases to the limestone suspension*. Department of Chemical Engineering. UCT Prague.
- Silvestri, L.; Palumbo, E.; Traverso, M.; Forcina, A., 2021. *A comparative LCA as a tool for evaluating existing best available techniques (BATs) in facing brick manufacturing and more eco-sustainable coating solutions*. The International Journal of Life Cycle Assessment 26(4), 673–691, doi:10.1007/s11367-021-01877-2.
- Skupina ČEZ, 2022. *Elektrárny Tušimice*. Uhelne elektrárny a teplárny ČEZ v ČR.
- Šerešová, M.; Štefanica, J.; Vitvarová, M.; Zakuciová, K.; Wolf, P.; Kočí, V., 2020. *Life Cycle Performance of Various Energy Sources Used in the Czech Republic*. Energies 13(21), doi:10.3390/en13215833.