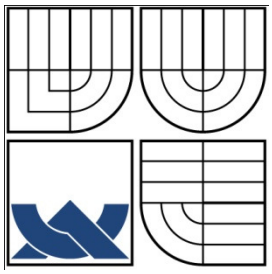
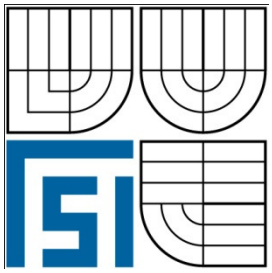


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF PRCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

HODNOCENÍ EFEKTIVITY VYUŽITÍ ODPADŮ K VÝROBĚ ENERGIE

EFFECTIVENESS EVALUATION OF WASTE-TO-ENERGY PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR KLIMEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN PAVLAS, Ph.D

BRNO 2010

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou hodnocení efektivity využití komunálních odpadů k výrobě energie. Na základě legislativy platné v EU je shrnuta metodika hodnocení zařízení jako energetické využívání odpadů. V práci je dále vytvořen výpočtový potup pro stanovení rozhodných koeficientů legislativně podloženého kritéria. Tento je aplikován na případové studii. Práce slouží jako základ návrhu softwarové aplikace.

KLÍČOVÁ SLOVA

odpad, hodnocení, využití, energie, spalovna

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on the evaluation of the effectiveness of using municipal waste to produce energy. On the basis of legislation applicable in the EU methodology is summarized evaluation of the facility as an energy recovery of waste. In the thesis is also created a consecution to determine decisive coefficients of legislatively-based criteria. The consecution is applied to the case study. Thesis serves as the basis for a software application.

KLÍČOVÁ SLOVA

waste, evaluation, utilization, energy, incinerator

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KLIMEK, P. Hodnocení efektivity využití odpadů k výrobě energie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 56 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma hodnocení efektivity využití odpadů k výrobě energie vypracoval samostatně a použil jsem literárních pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

V Brně dne 20.5.2009 …..……

podpis

PODĚKOVÁNÍ

Velmi děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytl v průběhu vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a všem blízkým, kteří mě podporovali během psaní diplomové práce.

1 ÚVOD 10

1.1 PRIMÁRNÍ ZDROJE ENERGIE 10
1.2 SPOTŘEBA PRIMÁRNÍCH ENERGETICKÝCH ZDROJŮ A EMISE CO_2 10
1.3 ENERGIE Z ODPADU 11

2 LEGISLATIVNÍ REŠERŠE 13

2.1 ZÁKLADNÍ CÍLE ODPADOVÉ POLITIKY 13
2.2 SOBĚSTAČNOST V ODPADOVÉM HOSPODÁŘSTVÍ 14
2.3 SKLÁDKOVÁNÍ ODPADU 15
2.4 ENERGETICKÉ VYUŽÍVÁNÍ ODPADŮ 17
2.5 LEGISLATIVNÍ PODMÍNKY PROCESU 18

3 KRITÉRIA HODNOCENÍ JEDNOTEK EVO 19

3.1 EKVIVALENTNÍ JEDNOTKY Z HLEDISKA SPOTŘEBY PEZ 19
3.2 KOGENERAČNÍ SYSTÉMY 20
3.2.1 ÚSPORA PRIMÁRNÍCH ENERGETICKÝCH ZDROJŮ 22
3.3 KRITÉRIA NAVRŽENÁ ORGANIZACÍ CEWEP 24
3.4 KRITÉRIUM UVEDENÉ V DOKUMENTU BREF 25
3.5 KRITÉRIUM UVEDENÉ VE SMĚRNICI 98/2008/EC O ODPADECH 26

4 METODIKA STANOVENÍ ROZHODNÝCH PARAMETRŮ 27

4.1 ENERGIE DODANÁ ODPADEM, E_W 28
4.2 IMPORTOVANÁ ENERGIE PALIVA PODÍLEJÍCÍ SE NA VÝROBĚ PÁRY, E_F 29
4.3 IMPORTOVANÁ TEPELNÁ ENERGIE BEZ PODÍLU NA VÝROBĚ PÁRY, $I_{IMP,TH}$ 30
4.4 IMPORTOVANÁ ELEKTRICKÁ ENERGIE, $I_{IMP,EL}$ 31
4.5 CELKOVÉ MNOŽSTVÍ VYROBENÉHO TEPLA, $Q_{PROD,TH}$ 31
4.5.1 EXPORTOVANÁ TEPELNÁ ENERGIE, $Q_{EXP,TH}$ 31
4.5.2 CIRKULOVANÁ TEPELNÁ ENERGIE, $I_{CIRC,TH}$ 32
4.6 CELKOVÉ MNOŽSTVÍ VYROBENÉ ELEKTŘINY, $Q_{PROD,EL}$ 35
4.6.1 CIRKULOVANÁ ELEKTRICKÁ ENERGIE, $I_{CIRC,EL}$ 35
4.6.2 EXPORTOVANÁ ELEKTRICKÁ ENERGIE, $Q_{EXP,EL}$ 35
4.7 VÝPOČTOVÝ MODEL V TABULKOVÉM PROCESORU MS EXCEL 36
4.8 BILANČNÍ MODEL V PROGRAMU W2E 39

5 PŘÍPADOVÁ STUDIE 45

5.1.1 SPECIFIKACE ÚDAJŮ PRO NASTAVENÍ BILANČNÍHO MODELU 46
5.1.2 VÝSLEDKY VÝPOČTU 49

6 ZÁVĚR 52

7 SEZNAM CITACÍ 53

8 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ 55

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK 56

10 SEZNAM PŘÍLOH 56

1 ÚVOD

1.1 Primární zdroje energie

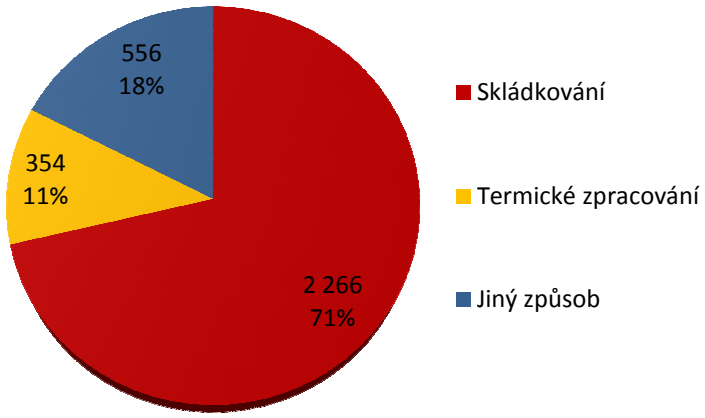
Civilizace se dnes potýká s celou řadou problémů. Mezi ty nejpalčivější patří ovlivňování životního prostředí lidskou činností. Vědecko-technická revoluce, započatá v 18. století vynálezem parního stroje, s sebou přinesla nový typ společenské závislosti - závislost na primárních zdrojích energie, mezi které patří zejména fosilní paliva. Energie fosilních paliv má svůj původ v radiační energii Slunce, která byla před 22 až 350 miliony let fotosyntézou transformována do potenciální energie biomasy. Vysoká koncentrace CO_2 v atmosféře a následný skleníkový efekt byl jednou z příčin velmi intenzivní fotosyntézy a masivního nárůstu biomasy. Vysoké teploty a nerovnoměrnosti v ohřívání povrchu Země způsobovaly v této době nepředstavitelné změny počasí, které opakovaně ničily a obnovovaly porosty. Na trouchnivějících zbytcích se hojně rozrůstala nová vegetace. Část živé i mrtvé hmoty byla zavalena horninami, které zamezily přístupu kyslíku, biomasa se tedy nemohla biologicky rozložit, došlo k jejímu zuhelnatění a tvorbě dalších fosilních paliv, jako je ropa a zemní plyn. Skleníkové plyny, které se stovky milionů let ukládaly ve zdrojích fosilních paliv, jsou nyní za nesrovnatelně kratší období v řádech pouhých stovek let emitovány zpět do atmosféry. [1] Podle názoru mnoha současných odborníků stojí za pozorovanými globálními změnami klimatu právě výše zmíněná činnost člověka. Dosud však nebyly objeveny a popsány všechny přírodní mechanizmy, které se na těchto změnách podílejí.

1.2 Spotřeba primárních energetických zdrojů a emise CO_2

Fosilní paliva se ukázala jako nejvhodnější paliva parních kotlů a tepelných motorů, které odstartovaly nebývalý rozvoj lidské společnosti. Jakýkoliv další rozvoj, jakož i udržení současné společenské úrovně, jsou přímo závislé na dodávkách energie. Zdroj [1] uvádí, že při současných trendech vývoje spotřeby primárních energetických zdrojů (PEZ), by se měla spotřeba v letech 1990-2020 vyrovnat spotřebě PEZ od počátku průmyslové éry do roku 1990. V letech 2020-2050 by se spotřeba PEZ mohla dokonce zdvojnásobit. Jak se ukázalo zejména v posledních dvaceti letech, s nárůstem spotřeby fosilních paliv nepříjemně koreluje nárůst emisí CO_2 v atmosféře a zmíněné globální změny klimatu. Trvalou snahou Organizace spojených národů a Evropské unie je snižování podílu fosilních paliv na primárních energetických zdrojích. Tuto snahu dokumentuje kvantifikovaný závazek 39 průmyslově vyspělých zemí na snížení emisí CO_2 minimálně o 5% mezi léty 2008 a 2012, který je zakotvený v Kjótském protokolu k rámcové úmluvě OSN o změně klimatu [2]. Přímým nástrojem k dodržení závazku je obchod s povolenkami pro vypouštění CO_2 v rámci zemí, které se na snížení emisí dohodly. Množství obchodovaných povolenek je trvale snižováno, což motivuje zúčastněné státy k podpoře investic do modernizace a zavádění potřebných technologií. Nutno podotknout, že pro období od roku 2012 nebyl žádný kvantifikovaný závazek dosud přijat.

1.3 Energie z odpadu

Další problém představuje tvorba vedlejších a již dále nepotřebných produktů lidské činnosti – odpadů. Odpady představují hygienická a ekologická rizika. Proto je nutné zacházet s nimi uvážlivě. Zároveň v nich je chemicky vázána nezanedbatelná část energie, kterou je možno termicky využít v zařízení pro tento účel speciálně navrženém. Energetické využívání odpadů tedy řeší hned dva problémy. Jedním je ekologicky šetrný způsob minimalizace odpadu určeného k uložení. Druhým úspora primárních energetických zdrojů, především fosilních paliv. V případě redukce množství odpadu se jedná o úsporu přibližně 1/3 hmotnostní a 1/10 objemovou. Díky solidifikačním postupům, může být tato redukce odpadu dále navýšena. Solidifikace je technologický proces úpravy odpadů, spočívající v jejich stabilizaci vhodnými přísadami, které sníží možnost vyluhování nebezpečných prvků a sloučenin. Popeloviny vzniklé v procesu termického zpracování odpadů a upravené solidifikačním procesem se běžně užívají například při stavbách pozemních komunikací. Soldifikačním postupem je běžně využíváno až 97% popelovin [3]. Jak uvádí Graf 1.1 produkce komunálních odpadů v ČR je přibližně 305 kg/obyvatele. 71% odpadu je uloženo na skládky, kde dochází k biologickému rozkladu a tvorbě skleníkových plynů, zejména metanu [1]. Tvorba metanu je jeden z hlavních důvodů omezování skládkování, jak bude dále popsáno. Pouhých 11% odpadu produkovaného na území ČR představuje termické zpracování, které zahrnuje jak termické zneškodnění, tak využívání odpadu k výrobě energie [4].



Graf 1.1 Nakládání s komunálními odpady v ČR, v roce 2008 [tis.t]

V ČR jsou v současné době připravovány nové projekty, zaměřené na energetické využívání odpadů. Do budoucna je možno očekávat projekty další. Důraz je kladen zejména na koncepční návrhy s cílem maximalizovat využití energie. Pro usnadnění, zpřesnění a urychlení koncepčních návrhů byl na Ústavu procesního a ekologického inženýrství (FSI VUT Brno) navržen bilanční software, s pracovním názvem W2E (waste-to-energy). Ten je schopen na základě hmotnostně - energetických bilancí porovnávat a optimalizovat různá technologická řešení procesu recyklace energie z odpadu.

[1] Metan je skleníkový plyn s přibližně dvacetkrát větším klimatickým vlivem, než CO_2, které je uvolňováno spalováním.

V Evropě dnes existuje celá řada norem a předpisů, které formulují podobu odpadového hospodářství. Důraz je kladen zejména na zásady hierarchie nakládání s odpady. Stěžejní je především přednost materiálového či energetického využívání před pouhým zneškodněním. V provozu je více než 400 zařízení pro termické zpracování tuhého komunálního odpadu [5]. V české republice jsou taková zařízení tři, s celkovým projektovaným výkonem 646 tisíc tun spáleného odpadu za rok. Přehled uvádí tab. 1.1. Tento výkon není v současné době plně využíván.

Název zařízení	**Rok dokončení**	**Projektovaný výkon [kt/rok]**	**Využití výkonu (2008) [%]**
Sako Brno	1989	240	33,3
Zevo Praha	1998	310	67,1
Termizo Liberec	1999	96	95,8

Tab. 1.1 Dostupná zařízení pro termické využívání odpadů v ČR [6]

Důvody jsou především technologické. Spalovny Zevo Malešice a Sako Brno jsou navrženy především pro dodávku tepla. Bez výroby tepla nemohou tyto spalovny z technických důvodů spalovat odpad. Problém nastává zejména mimo topnou sezónu, kdy výrazně klesá poptávka po užitném teple. Z tohoto důvodu byly v nedávné době v obou zařízeních instalovány kondenzační turbiny, které mohou využít nízkopotenciální páru (poměrně nízké parametry páry - 1,1MPa 230°C), která je jinak užívána k vytápění.

Spalovna Zevo Malešice sestává ze 4 samostatných parních kotlů, z nichž jeden je vždy záložní. Proto nemůže dosáhnout projektovaného výkonu ani v ideálních podmínkách poptávky po vyrobené energii.

Spalovna Sako Brno je v současné době v rekonstrukci. Po dokončení rekonstrukce bude spalovna dosahovat předpokládaného výkonu 220tis.t odpadu za rok. [7]

Rámcová směrnice Evropské unie 98/2008/EC uvádí pro hodnocení termického zpracování odpadů jako energetické využívání kritérium „*Energy efficiency*“. V souvislosti s instalací kondenzačních turbin je možno očekávat výrazné zhoršení tohoto kritéria pro daná zařízení, což je dáno zejména nutností maření tepla za kondenzační turbinou, jak bude dále popsáno v případové studii.

2 LEGISLATIVNÍ REŠERŠE

2.1 Základní cíle odpadové politiky

Cíle odpadové politiky EU uvádí rámcová novela 2008/98/ES [8], která nahrazuje starší, opakovaně přepracovanou směrnici 75/442/EEC. Základní cíle jsou:

Důsledné dodržování hierarchie nakládání s odpady

1) Předcházení vzniku odpadů
2) Opětovné použití
3) Materiálové využití
4) Jiné využití (např. energetické)
5) Odstranění dopadů

Z hlediska nakládání s odpady je stěžejní přednost energetického využívání odpadů, před jejich pouhým odstraňováním, jak bude dále upřesněno.

Předcházení vzniku odpadů
Do konce roku 2011 si dala Evropská komise za cíl předložit Evropskému parlamentu a Radě průběžnou zprávu o vývoji tvorby odpadů a formulovat politiku pro ekodesign nových výrobků, která se bude zabývat především návrhem trvanlivých, opětovně použitelných a recyklovatelných výrobků, s ohledem na nebezpečné látky, které jsou v těchto výrobcích obsaženy.

Rozšířená odpovědnost výrobce
K dosažení cílů přecházení vzniku odpadů je nutno zahrnout do procesu především výrobce, kterému může být udělena povinnost zpětného odběru výrobků, povinnost informovat o recyklovatelnosti, povinnost nakládání s odpadem i povinnosti finanční odpovědnosti za tyto činnosti.

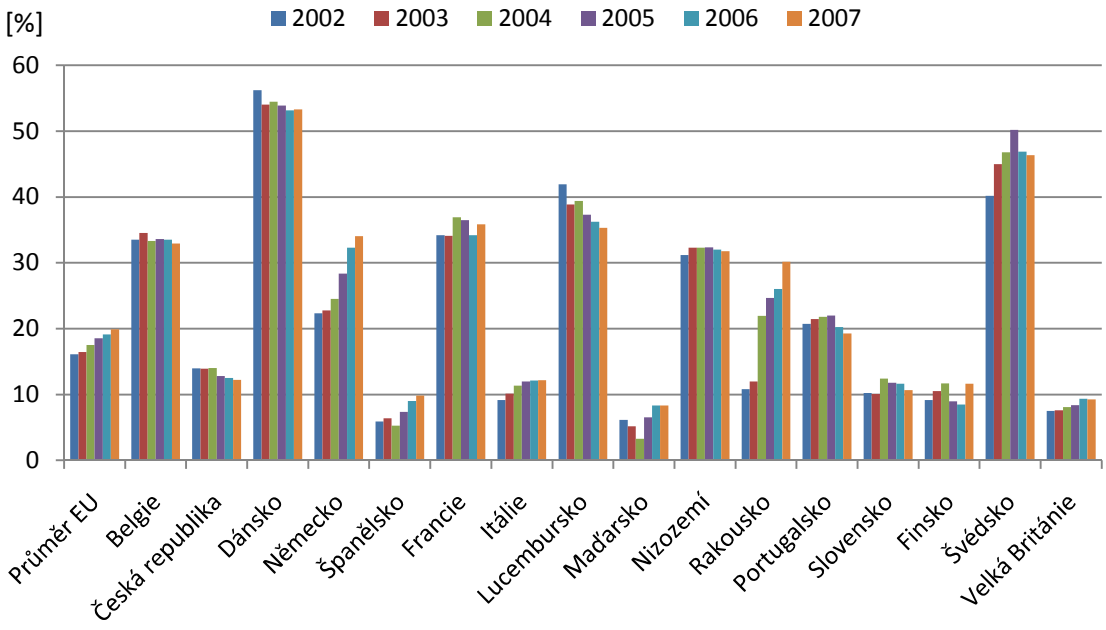
Přiblížení k „recyklační společnosti“
Směrnice uvádí konkrétní recyklační cíle. Do roku 2020 recyklovat 50% odpadů z domácností a 70% odpadů ze stavebnictví a demoličních prací. Do konce roku roku 2015 by měl každý členský stát zavést přinejmenším třídění skla, papíru, kovů a plastů.

Vydání povolení
Směrnice vyžaduje, aby všechna zařízení, která plánují provádět zpracování odpadů, získala povolení od příslušného orgánu. Podmínkou pro vydání povolení ke spalování nebo spoluspalování s energetickým využitím je, že energetické využití probíhá s vysokým stupněm energetické účinnosti (kritérium R1, viz dále).

Národní plány odpadového hospodářství
Členské státy mají povinnost zajistit plány odpadového hospodářství pro dané území nebo menší zeměpisné jednotky, které pokryjí celé území daného státu. Plány odpadového hospodářství stanoví analýzu stávající situace nakládání s odpady, stanoví příslušná opatření s cílem environmentálního zlepšení všech procesů nakládání s odpady.

2.2 Soběstačnost v odpadovém hospodářství

Členské státy Evropské unie jsou povinny vytvořit odpovídající síť zařízení pro odstraňování a využívání směsných komunálních odpadů. Tam, kde je to rozumné, mohou být takové sítě vytvořeny ve spolupráci s více státy. Členské státy EU mohou zakázat dovoz odpadů do spaloven na svém území za účelem energetického využívání, pokud je tento například v rozporu s národními plány odpadového hospodářství a měl by za následek zvýšení potřeby odstranění vlastních odpadů v cílové zemi. Podíl termického zpracování ve vybraných zemích EU je znázorněn v grafu 1.2.



Graf 2.1 Podíl termického zpracování odpadu ve vybraných zemích EU [9]

Vyspělé státy Evropy odpady na skládky téměř neukládají. V řadě z nich je to dokonce zákonem zakázáno (Rakousko, Německo, Francie, Švýcarsko, Nizozemí). V žádné zemi toho však nebylo možné dosáhnout okamžitě. Ukládání bylo nejdříve nutné omezit, vytvořit příslušnou infrastrukturu pro materiálové, či energetické využívání. [10]

Všechny státy, které takovýmto způsobem mohly omezit ukládání odpadů, toho dosáhly především díky navýšení kapacit termického zpracování, jak můžeme v posledních letech vidět na příkladu Rakouska a Německa. Jak můžeme vidět v levé části grafu, podíl termického zpracování narůstá také v rámci celé EU.

2.3 Skládkování odpadu

Skládky zatěžují životní prostředí na velmi dlouhou dobu. Rozkladem biologicky rozložitelných složek přispívají k tvorbě nebezpečných skleníkových plynů, zejména metanu. Biologicky rozložitelným odpadem se zde myslí především odpady ze zahrad a parků, domácností, kuchyňských a potravinářských provozů [8]. Z hlediska ochrany životního prostředí, je termické zpracování vhodnější variantou, než alternativní skládkování.

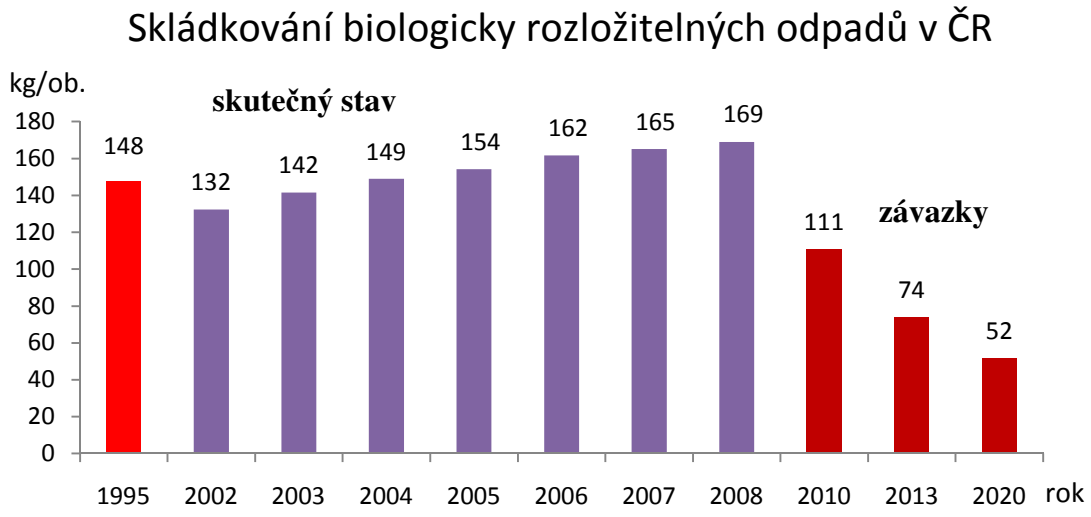
Směrnice evropského společenství **1999/31/EC** o skládkách odpadů [11] stanoví potřebu minimalizovat odpad ukládaný na skládky. Pro tento účel stanovuje termíny, závazné pro nové členské státy, včetně ČR:

- Do roku 2010 musí ČR prokázat, že ukládá o 25 % méně biologicky rozložitelných komunálních odpadů (BRKO), než v roce 1995.

- Do roku 2013 o 50 % méně ukládaných odpadů BRKO, než v roce 1995.

- Do roku 2020 o 65 % méně ukládaných odpadů BRKO, než v roce 1995.

Jak uvádí následující graf 2.1, Česká republika tyto závazky dlouhodobě neplní, za což hrozí vysoké sankce ze strany Evropské Unie. Údaje uvedené v grafu 2.1 byly vypočteny z celkového množství ukládaných odpadů, které tvoří ve skladbě odpadu ČR BRKO. Tyto údaje byly vyčísleny z informačního systém odpadového hospodářství (ISOH [12]). Dle přepočtových koeficientů Ministerstva životního prostředí ČR byly dále vypočteny čisté hmotnosti ukládaných BRKO. Podělením celkové hmotnosti BRKO celkovou populací v jednotlivých letech [4] byly získány hodnoty grafu 2.1(skutečný stav). Hodnotu roku 1995 udává plán odpadového hospodářství ČR [13], na jejím základě byly vyčísleny závazky na omezení skládkování v dalších letech.



Graf 2.2 Skládkování biologicky rozložitelných odpadů

Jak ukazuje graf 2.1, bylo v roce 1995 v ČR skládkováno 148 kg biologicky rozložitelných komunálních odpadů na jednoho obyvatele. To je zároveň hodnota, o

kterou se opírá výše uvedená směrnice [11]. Hodnoty v dalším sledovaném období od roku 2002 trvale narůstají.

Pokud by měla ČR směrnici dostát (v době psaní práce nejsou v informačním systému odpadového hospodářství zveřejněna data za rok 2009), musí při uvažování produkce odpadu shodné s rokem 2008 a stejné populace snížit ukládání biologicky rozložitelných odpadů o přibližně 600 kt/rok do konce roku 2010. Zde ovšem hovoříme o odpadu biologicky rozložitelném, který je pouze složkou celkového objemu odpadu. Pokud použijeme přepočtový podíl sledovaných odpadů na BRKO ve sledovaném roce 2008, získáme celkové množství odpadů, které je nutno zpracovat jiným způsobem než skládkováním. V našem případě se jedná přibližně o 1130 kt/rok.

Je třeba připomenout, že projektovaný spalovací výkon současných zařízení v ČR je 646kt odpadu za rok. Tento výkon nebyl ve sledovaném roce 2008 z důvodu probíhajících rekonstrukcí plně využit. Je tedy možné počítat s rezervou přibližně 220kt ve stávajících zařízeních, jak je možné dovodit z údajů v tabulce 1.1.

Celkový odhad potřeby navýšení spalovacího výkonu v ČR uvádí tabulka 2.1. Odhad nebere v úvahu budoucí změny populace, produkce odpadu a skladby odpadu.

Období	**Navýšení spalovacího výkonu** [kt/rok]
2008 - 2010	910
2010 - 2013	386
2013 - 2020	230
Celkem	1526

Tab. 2.1 Odhad potřeby navýšení výkonu spalování komunálních opadů v ČR

Uvažujeme-li typický výkon zařízení 100 – 200kt spáleného odpadu za rok, bylo by k zajištění plnění směrnice EU termickým zpracováním třeba v ČR vystavět přibližně 8 jednotek pro termické zpracování o výkonu 200 kt/rok, nebo 16 jednotek o výkonu 100kt odpadu za rok.

2.4 Energetické využívání odpadů

Termické využívání odpadů je určitou formou recyklace tepelné energie, obsažené v odpadech. Tento proces může být uskutečněn různou technologií a s různou efektivitou využití získané tepelné energie. Z tohoto důvodu jsou v terminologii týkající se termického zpracování odpadů zaváděny pojmy „odstraňování odpadů“ a „energetické využívání odpadů“. [14] Pro společnost a životní prostředí je výhodnější energetické využívání, které stejně jako odstraňování snižuje množství odpadu na minimum, navíc využívá podstatným způsobem uvolněnou energii. Tím šetří primární zdroje, především uhlí a zemní plyn.

Původní a dnes již nahrazená směrnice 75/442/EEC stanovila, že odstraňováním odpadu se rozumí činnosti, uvedené v příloze II.A této směrnice, přičemž konkrétnímu případu odpovídal kód D10 – *spalování na pevnině.* Za využití odpadu se považovaly činnosti uvedené v příloze II.B, konkrétnímu případu odpovídal kód R1 – *využití odpadu způsobem obdobným jako paliva, nebo jiným způsobem k výrobě energie*. Jinou upřesňující definici, nebo kritérium směrnice nenabídla. V tomto směru měly členské státy volnou ruku ve svých vnitrostátních úpravách.

Dosud platný **zákon o odpadech 185/2001 Sb**. [15], upřesňuje v § 23, že aby při spalování odpadů docházelo k jejich energetickému využívání, musí být splněny následující podmínky:

a) *Použitý odpad nepotřebuje po vlastním zapálení ke spalování podpůrné palivo a vznikající teplo se použije pro potřebu vlastní, nebo dalších osob,* nebo

b) odpad se použije jako palivo, nebo přídavné palivo v zařízení na výrobu energie nebo materiálů za podmínek stanovených právními předpisy zákona o ochraně ovzduší.

Dále zákon definuje, že pokud zařízení nesplňuje výše uvedené předpoklady, jedná se o zařízení pro odstraňování odpadu.

Legislativní hodnocení energetického využívání má vliv na případný pohyb odpadu v rámci EU [16]. V některých státech i na případné dotace, či daňové úlevy. Otázkami posuzování pohybu odpadů mezi členskými státy se zabývá Nařízení Rady č. 259/93, které se v definicích odkazuje na výše zmíněnou směrnici 75/442/EEC. Z hlediska pohybu odpadů mezi jednotlivými státy EU je rozlišováno, zda jde o pohyb odpadu určeného k odstranění či využití. U odpadu určeného k odstranění, mohou členské státy zakázat jeho dovoz i vývoz, avšak zmíněné nařízení neumožňuje podobným způsobem omezovat pohyb odpadů za účelem jeho energetického využití. Toto nařízení za určitých podmínek mění směrnice 98/2008/EC, jak již bylo uvedeno.

Vzhledem k termínu implementace směrnice 98/2008/EC je možné očekávat novelizaci zákona 185/2001 Sb. do 12.12.2010 [8].

2.5 Legislativní podmínky procesu

Termické zpracování odpadu (TZO) s sebou přináší, stejně jako každé jiné nakládání s odpady, emise znečišťujících látek. Prvořadým cílem při realizaci TZO tedy musí být ochrana životního prostředí a zdraví společnosti. Maximální množství znečišťujících látek, které dané zařízení může vypouštět do okolí, stanovují příslušné právní předpisy z oblasti ochrany ovzduší, vod a půdy. Aktuální emisní limity znečišťujících látek pro spalování odpadů je možné nalézt v nařízení vlády číslo 354/2002 Sb. Tato norma obsahuje odpovídající ustanovení Směrnice Rady 89/369/EHS, o předcházení znečišťování ovzduší z nových spaloven komunálního odpadu. Emisní limity znečišťujících látek, které uvádí platná legislativa, nejsou z dlouhodobého hlediska konstantními hodnotami. Snahou je limity neustále zpřísňovat, v závislosti na nejlepších technologiích, které jsou spalovnám v daný okamžik dostupné.

Náročné emisní limity, které jsou na jednotky termického zpracování odpadů kladeny, mohou být splněny pouze za určitých (legislativně stanovených) podmínek vedení spalovacího procesu. Tyto podmínky mají zaručit co možná nejdokonalejší tepelný rozklad nebezpečných látek již v termickém stupni, což podstatně snižuje nároky na následné čištění spalin. Mezi tyto podmínky patří například dodržení minimální teploty spalin za posledním přívodem spalovacího vzduchu, ve všech místech profilu, na hodnotě 850°C, po dobu minimálně 2 sekund. Pokud se spaluje nebezpečný odpad s obsahem halogenovaných organických sloučenin (PCB, nebo Cl) vyšším než 1%, je nutné výše zmíněnou minimální teplotu spalin zvýšit na 1100°C, po dobu minimálně 2 sekund. Tyto podmínky musejí být dodrženy ve všech provozních stavech, včetně najíždění a odstávky zařízení. Podmínkou je, že pokud se ve spalovací komoře spaluje jakékoliv množství odpadu, musejí být dodrženy legislativní požadavky. Toho se dociluje spalováním přídavných paliv. Dalším důležitým legislativně upraveným aspektem je doba setrvání odpadu ve spalovacím prostoru a s tím související stupeň termického rozkladu. Ten je dán požadavkem na obsah organického uhlíku ve škváře a popelu menší než 3% hm. celkového organického uhlíku, nebo ztráty žíháním menší než 5 % hmotnosti suchého materiálu. [17]

Posledně zmiňované kritérium nahradilo požadavek dřívějších právních úprav na minimální objemovou koncentraci O_2 ve spalinách za posledním přívodem spalovacího vzduchu ve výši 6%. Z hlediska vedení spalovacího procesu se toto kritérium dá i nadále považovat za doporučené. Měření obsahu organického uhlíku ve škváře a popelu stejně tak ztrát žíháním je spojeno s poměrně velkou časovou prodlevou, která na rozdíl od podmínky objemové koncentrace O_2 ve spalinách, neumožňuje dostatečně pružné vedení spalovacího procesu. [18]

Splnění legislativních podmínek je spojeno s poměrně rozsáhlými investičními a provozními náklady. Významně je ovlivněna i energetická bilance jednotky, na které závisí hodnocení efektivity využívání odpadů k výrobě energie. Ovlivnění je dáno zejména nutností dodržení předepsaných teplot spalováním přídavných paliv. Náklady na systém čištění spalin se pohybují v rozmezí 15-35% celkových nákladů spalování [5].

3 KRITÉRIA HODNOCENÍ JEDNOTEK EVO

Jednotky pro energetické využívání odpadů (EVO) jsou zařízení, na která jsou kladeny vysoké nároky z hlediska ochrany životního prostředí a účinnosti recyklace energie chemicky vázané v odpadu. Na základě již popsaného vývoje bylo navrženo několik kritérií, které se dnes v rámci Evropské Unie k hodnocení a srovnávání spaloven užívají. Přestože si jsou některá kritéria navzájem velmi podobná, hodnotí každé účinnost z jiného úhlu pohledu.

3.1 Ekvivalentní jednotky z hlediska spotřeby PEZ

Ve výpočtu jednotlivých faktorů a kritérií je nutno zohlednit rozdílný původ a formu energetických toků tak, abychom obdrželi skutečně ekvivalentní jednotky z hlediska spotřeby primárních energetických zdrojů. Z tohoto důvodu se některé typy energetických proudů považují za hodnotnější a upravují se příslušnými koeficienty. Koeficienty jsou převrácenými hodnotami účinností výroby energie v konvenčním zdroji (tepelná elektrárna nebo výtopna). V jednotlivých zemích se mohou lišit v závislosti na technické úrovni (účinnosti) lokálních konvenčních zdrojů.

V podmínkách České republiky jsou za doporučené považovány hodnoty účinnosti pro tepelné elektrárny a výtopny uvedené v tabulce 2.1 [19] Rozdíl použití ekvivalentních a absolutních jednotek je patrný například při bilančních výpočtech, kdy je naopak nutné počítat s jednotkami absolutními.

Konvenční zdroj	Účinnost [-]	Převrácená hodnota účinnosti [-]
Tepelná elektrárna	0,38	2,6361
Výtopna	0,91	1,0989
Spalování přímo v zařízení	1	1

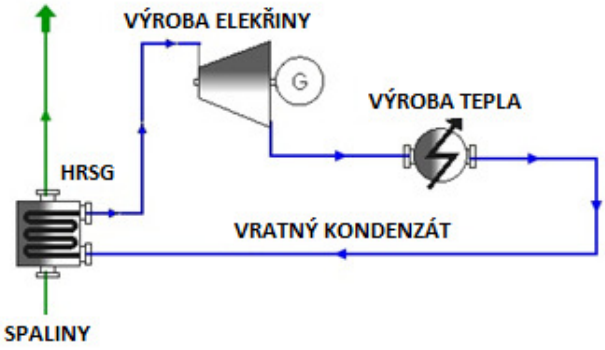
Tab. 3.1 Charakteristické koeficienty výroby energie v referenčních zdrojích

Užití ekvivalentních jednotek uvádí metodika dle BREF. Ekvivalentní jednotky energie dodané například spalováním zemního plynu ve vlastním procesu jsou totožné s jednotkami absolutními [5], jelikož při spalování ve vlastním procesu nedochází k předchozí konverzi energie v jiném (referenčním) zdroji. Ze stejného důvodu jsou shodné ekvivalentní a absolutní jednotky výhřevnosti odpadu. Jinými slovy, koeficient přepočtu těchto jednotek z absolutních jednotek na ekvivalentní je roven jedné (jak bude dále ukázáno v metodice výpočtu a případových studiích).

3.2 Kogenerační systémy

Jednotky pro energetické využívání odpadů jsou velmi často řešeny jako účinné kogenerační systémy. Kogenerací se rozumí současná výroba dvou užitečných forem energie, nejčastěji tepla a elektřiny, z jednoho palivového zdroje v jednom procesu [20]. Primární je přitom výroba tepelné energie, jak bude dále ukázáno na případových studiích.

Moderní elektrárenské bloky spalující fosilní paliva dosahují účinnosti kolem 40%. Zvýšením parametrů páry (nadkritické hodnoty) je možné dosáhnout hodnoty účinnosti kolem 50%. [20]



Obr. 3.1 Kogenerační systém výroby energie

Účinnost kogeneračních systémů výroby tepla a elektřiny běžně dosahuje 90%, což je porovnatelné s účinností běžných výtopen, které tuto hodnotu často překračují. Zde je však zmařena schopnost vykonat pomocí uvolněného tepla technickou práci (práce na hřídeli rotačního stroje). Technická práce je v generátoru přeměněna na elektřinu, která je považována za hodnotnější formu energie.

K hodnocení kogeneračních systémů se užívají různá kritéria, mezi často užívaná patří zejména [20]:

CELKOVÁ TERMICKÁ ÚČINNOST (účinnost využití paliva) představuje součet účinností kogenerační výroby elektřiny a tepla:

$$\eta_{tot}^{CHP} = \eta_{el}^{CHP} + \eta_{th}^{CHP} = \frac{Q_{exp,el}}{PE^{CHP}} + \frac{Q_{exp,th}}{PE^{CHP}} = \frac{Q_{exp,el}+Q_{exp,th}}{PE^{CHP}} \quad [-] \qquad (1)$$

Význam jednotlivých symbolů je následující:

$Q_{exp,el}$	*exportovaná elektrická energie [MWh]*
$Q_{exp,th}$	*exportované teplo [MWh]*
PE^{CHP}	*energie obsažená v palivu [MWh]*
η_{el}^{CHP}	*účinnost kogenerační výroby elektřiny [-]*
η_{th}^{CHP}	*účinnost kogenerační výroby tepla [-]*

Ve spalovnách se obvykle uplatňují systémy kogenerace založené na parní turbině v protitlakém, nebo kondenzačním uspořádání. Protitlaký režim má nejvyšší účinnost, kondenzační režim účinnost snižuje. Celková termická účinnost je například důležitá pro možnost získání dotací za kogenerační výrobu energie.

Pokud je celková termická účinnost kogenerační výroby energie (s parní kondenzační turbinou) vyšší než 75%, je možno zahrnout do výpočtu energie pocházející z kogenerace všechen elektrický i tepelný výkon. Elektrická energie pocházející z kombinované výroby je pokládána za hodnotnější formu výroby elektřiny, její cena je regulována dotacemi ve prospěch výrobce. [21]

Je-li celková účinnost menší než 75%, je nutno rozdělit výrobu na dva virtuální systémy, z nichž jeden bude splňovat podmínku. Pouze tento virtuální subsystém je možno považovat za kogenerační výrobu energie. Spotřebu paliva, které se nepodílí na kogenerační výrobě, je možno určit z oddělené části elektřiny, podělené účinností specifické výroby elektřiny v daném zdroji. Elektřina vyrobená bez výroby tepla se tedy nepovažuje za kogenerační. [21]

TEPLÁRENSKÝ MODUL (power to heat ratio) je definován poměrem exportované elektřiny a tepla:

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{Q_{prod,el}}{Q_{prod,th}}} \ \textbf{[-]} \qquad \textbf{(2)}$$

Jednoduchou úpravou vztahu (4) je možno dosáhnou vztahu pro výpočet elektrické energie, která byla získána účinnou kogenerační výrobou:

$$\boldsymbol{Q_{prod,el} = \sigma \cdot Q_{prod,th}} \ \text{[MWh]} \qquad \textbf{(3)}$$

Teplárenský modul představuje důležitý parametr z hlediska navrhování a provozu kogeneračních systémů. Pro některé systémy je určen implicitně technologickým uspořádáním. U jiných systémů jej můžeme za provozu měnit v závislosti na aktuální poptávce po konkrétním druhu energie, například řízeným odběrem z kondenzační turbiny.

Prosazováním kogeneračních systémů ve všech procesech využívající jak klasická fosilní paliva, tak obnovitelné zdroje (například biomasu) dochází k nárůstu účinnosti, úspoře těchto paliv i úspoře emisí znečišťujících a skleníkových plynů. Kogenerace dále přispívá k zajištění bezpečných dodávek energie, diverzifikaci energetických zdrojů a snížení závislosti EU na externích dodávkách energie.

3.2.1 Úspora primárních energetických zdrojů

Jak již bylo uvedeno, kogenerační systémy šetří primární zdroje energie (primary energy savings - PES), které by jinak bylo třeba k získání stejného množství energie použít. Pro kvantifikaci úspor uvádí směrnice 2004/8/ES [22] následující vztah pro výpočet **měrných úspor primárních energetických zdrojů:**

$$\boldsymbol{pes = \frac{PE_{el}^{ref} + PE_{th}^{ref} - PE^{CHP}}{PE_{el}^{ref} + PE_{th}^{ref}} \cdot 100 = 1 - \frac{1}{\left(\frac{\eta_{th}^{CHP}}{\eta_{th}^{ref}} + \frac{\eta_{el}^{CHP}}{\eta_{el}^{ref}}\right)} \cdot 100 \quad [\%]} \qquad \textbf{(4)}$$

kde:

$\boldsymbol{\eta_{th}^{CHP}, \eta_{el}^{CHP}}$ je *účinnost kogenerační výroby tepelné a elektrické energie [-]*
$\boldsymbol{\eta_{th}^{ref}, \eta_{el}^{ref}}$ *je účinnost výroby v referenčních zdrojích (teplárny, výtopny) [-]*

Vztah (4) definuje, jaké poměrné množství primárních energetických zdrojů je ušetřeno, pokud je užit kogenerační princip. Podmínkou pro přiznání dotací za vysoce účinnou kogenerační výrobu, kterou uvádí zdroj [22], je úspora minimálně 10% pes. Výpočet je zcela obecný, je možné jej užít pro všechny typy kogeneračních systémů, využívající různých typů běžně užívaných paliv (biomasa, uhlí, zemní plyn).

Primární energii, kterou je třeba využít k získání stejného množství elektrické energie, v referenčním zdroji (tepelná elektrárna), je možno stanovit užitím vztahu (5):

$$\boldsymbol{PE_{el}^{ref} = \frac{Q_{exp,el}}{\eta_{el}^{Ref}} \quad [MWh]} \qquad \textbf{(5)}$$

Analogicky je možno určit primární energii, která je třeba k výrobě stejného množství tepla v referenčním zdroji, jaké bylo vyrobeno kogenerací:

$$\boldsymbol{PE_{th}^{ref} = \frac{Q_{exp,th}}{\eta_{th}^{Ref}} \quad [MWh]} \qquad \textbf{(6)}$$

Užitím vztahů (5) a (6) je možno odvodit relaci mezi oběma tvary vztahu (6), jak uvádí například zdroj [20].

V souladu se vztahem (4) lze odvodit vztah pro **výpočet pes v systémech EVO**. [20]

$$\boldsymbol{pes = \frac{PE^{Ref} - PE^{CHP}}{PE^{Ref}} = \frac{Q_{exp} - (E_f + I_{imp})}{Q_{exp}} \ [-]} \qquad \textbf{(7)}$$

kde:

$\boldsymbol{Q_{exp}}$ *je exportovaná energie [MWh]*
$\boldsymbol{E_f}$ *je importovaná energie, podílející se na výrobě páry [MWh]*
$\boldsymbol{E_{imp}}$ *je importovaná energie, nepodílející se na výrobě páry [MWh]*

Vztah (7) zohledňuje fakt, že veškerá energie vyrobená pouze z odpadu a exportovaná k dalšímu využití, je považována za úsporu primárních energetických zdrojů. Měrná úspora je vztažena na jednotku exportované energie.

Výpočet měrných úspor primární energie jednotek EVO, je možné vztáhnout na různé základy, jako je například importovaná energie, nebo celkový energetický vstup [20]:

Měrné úspory pes vztažené na importovanou energii se určí ze vztahu:

$$\boldsymbol{pes = \frac{Q_{exp} - (E_f + I_{imp})}{E_f + I_{imp}}} \qquad \textbf{[-]} \tag{8}$$

Měrné úspory pes vztažené na celkový energetický vstup se určí ze vztahu:

$$\boldsymbol{pes = \frac{Q_{exp} - (E_f + I_{imp})}{E_w + E_f + I_{imp}}} \qquad \textbf{[-]} \tag{9}$$

kde:

E_w *je energie dodaná odpadem (výhřevnost) [MWh]*

Měrné úspory pes vztažené na exportovanou energii se určí ze vztahu:

$$\boldsymbol{pes = 1 - \frac{(E_f + I_{imp})}{Q_{exp}}} \qquad \textbf{[-]} \tag{10}$$

Měrná úspora primárních energetických zdrojů vztah (10) uvádí, jakou část z daného základu je možno považovat za úsporu. Jednotlivé koeficienty jsou dosazovány v ekvivalentních jednotkách, které zohledňují odlišný původ energií z hlediska spotřeby primárních zdrojů v referenčním systému výroby.

Je-li hodnota pes rovna 1, je všechna energie vyrobena pouze z odpadu a přispívá k úspoře primárních zdrojů. Je-li hodnota pes rovna 0, v důsledku provozu jednotky nedochází k úspoře primární energie. [20]

Absolutní úspora primárních energetických zdrojů definuje, jaké množství energie bylo spálením paliva (odpadu) ušetřeno:

$$\boldsymbol{PES = (Q_{exp}) - (E_f + I_{imp})} \qquad \textbf{[-]} \tag{11}$$

Pro výpočet (13) se použijí ekvivalentní jednotky. [20]

Stupeň využití paliva uvádí, jaká část energie podílející se na výrobě páry je exportována:

$$\boldsymbol{FUR = \frac{(Q_{exp,th} - I_{imp,th}) + (Q_{exp,el} - I_{imp,el})}{E_w + E_f}} \quad \textbf{[-]} \tag{12}$$

Pro výpočet (12) se použijí absolutní hodnoty z energetických bilancí. [20]

3.3 Kritéria navržená organizací CEWEP

Organizace CEWEP (Confederation of European Waste-to-Energy Plants) sdružuje asi 380 zařízení pro termické využívání odpadů, což představuje 88% těchto zařízení v Evropě [23]. Společnou snahou všech členů organizace je snižování skládkování a navyšování podílu energetického využívání odpadů. Na podkladě rozsudku Evropského soudního dvora C-228/00 [24] byla touto organizací navržena dvě bezrozměrná kritéria pro hodnocení energetického využívání odpadů [25]. Jsou to kritéria „Plant efficiency factor" a „Energy utilization rate". Všechny členy obou kritérií jsou dosazovány v ekvivalentních jednotkách, v závislosti na výrobě energie v referenčních zdrojích (kapitola 3.1).

Plant efficiency factor byl vypracován na základě následující části rozsudku Evropského soudního dvora (C-228/00):

Jak energie vyrobená, tak energie získaná spalováním odpadu musí být větší, než množství energie, které je třeba pro vlastní průběh spalování. Část přebytku energie musí být využita ve formě tepla, nebo elektřiny.

Matematickou formulaci výše uvedené slovní definice uvádí následující vztah:

$$\boldsymbol{Pl_{ef}} = \frac{\boldsymbol{Q_{prod}} - (\boldsymbol{E_f} + \boldsymbol{I_{ipm}})}{\boldsymbol{E_f} + \boldsymbol{I_{imp}} + \boldsymbol{I_{circ}}} > 1 \quad [-] \tag{13}$$

kde:

$\boldsymbol{Q_{prod}}$	*je celková vyrobená energie (tepelná i elektrická) [MWh]*
$\boldsymbol{E_f}$	*je energie podpůrného paliva pro výrobu tepla [MWh]*
$\boldsymbol{I_{imp}}$	*je importovaná energie nepodílející se na výrobě tepla [MWh]*
$\boldsymbol{I_{circ}}$	*je cirkulovaná energie (tepelná i elektrická) v procesu [MWh]*

Vlastní definice Pl_{ef} kritéria říká, že termické zpracování odpadu bude hodnoceno jako energetické využívání (rekuperace energie), pokud bude kritérium umožňovat dodávku energie třetím stranám. [25] Kritérium tuto podmínku splňuje, pokud je jeho hodnota větší než jedna. Podpůrné energie (nejčastěji z fosilních zdrojů) jsou z produkované energie odečteny. Na straně výstupu tedy máme pouze energii pocházející ze spalování odpadu (včetně cirkulované). Na straně vstupu pak všechny podpůrné energie, opět včetně cirkulované. Máme tedy relaci produkce energie vyrobené pouze z odpadu, a podpůrných energií. Kritérium, jeho absolutní hodnota, v širším pohledu odpovídá na dotaz kolikrát je produkovaná energie z odpadu větší, nebo menší, než potřebné energie podpůrné. Jednotlivé členy kritéria je nutné dosazovat v tzv. ekvivalentních jednotkách, které lépe charakterizují odlišnou účinnost systémů výroby (přeměny) těchto energií. Tomuto problému bude věnována pozornost v kapitole týkající se metodiky bilančního výpočtu. Podle údajů uvedených v práci [19], která se zabývá hodnocením 44 evropských spaloven s kogenerační výrobou, je vážený průměr Pl_{ef} kriteria 4,08. Minimum je 0,04, maximum 21,08. Při dolní hranici je vliv podpůrných energií dominantní a spíše lze hovořit o spoluspalování odpadu ($Pl_{ef}<1$), při horní hranici je naopak téměř zanedbatelná, tvoří 1/21 produkované energie.

Energy utilization rate bylo definováno vztahem:

$$\eta = \frac{Q_{prod} - (E_f + I_{imp})}{f_B * (E_w + E_f)} > 0.5 \quad \textbf{(14)}$$

kde:

Q_{prod}	*je celková vyrobená energie (tepelná i elektrická) [MWh]*
E_f	*je energie podpůrného paliva pro výrobu tepla [MWh]*
I_{imp}	*je importovaná energie nepodílející se na výrobě tepla [MWh]*
f_B	*je koeficient zohledňující tepelné ztráty (doporučeno: 97 []) [MWh]*
E_w	*je cirkulovaná energie (tepelná i eletrická) v procesu [MWh]*

Kritérium říká, že více než 50% tepelné energie, podílející se na výrobě páry, po odečtení importovaných energií E_f a I_{imp}, musí být využito (například ve formě páry, elektřiny, nebo tepla). [25] Tím je splněna druhá část rozsudku C-228/00. Opět je tedy posuzováno odpadem produkované teplo, pouze je vztaženo k jinému základu. Jmenovatel obsahuje energie paliv, podílející se na výrobě tepla, zmenšené o tepelné ztráty termického stupně. Absolutní hodnota kritéria definuje podíl využití této energie. V důsledku specifického způsobu dosazování a užití ekvivalentních jednotek, z hlediska výroby energie v referenčním zdroji, může být hodnota kritéria větší než jedna.

3.4 Kritérium uvedené v dokumentu BREF

Referenční dokument BAT (Best Available Techiques) pro spalování odpadu [5], je vydáván na podkladě článku 16 směrnice rady 96/61/ES, Evropskou komisí. Dokument je vydáván za účelem výměny informací mezi členskými státy EU tak, aby bylo zajištěno použití nejlepších dostupných technologií pro řešení důležitých problémů na úrovni společenství. Tento dokument uvádí pro hodnocení energetického využití odpadu kritérium Plant Efficiency, které je velmi podobné kritériu **Plant Efficiency Factor**:

$$Pl_{ef} = \frac{Q_{exp} - (E_f + I_{ipm})}{E_f + I_{imp} + I_{circ}} \quad [-] \quad \textbf{(15)}$$

Kritérium nezahrnuje na výstupu cirkulovanou energii. Za užitečnou považuje pouze energii, která je exportována z vlastního procesu. Kritérium dále není vybaveno implicitní podmínkou energetického využívání. Všechny členy kritéria jsou dosazovány v ekvivalentních energetických jednotkách, dle kapitoly 3.1.

3.5 Kritérium uvedené ve směrnici 98/2008/EC o odpadech

Výše uvedená směrnice [8] definuje využití odpadů jako *jakoukoliv činnost uvedenou v příloze II,* přičemž energetickému využívání odpovídá položka R1 - *použití především jako paliva, nebo jiným způsobem k výrobě energie.* Definici upřesňuje kritérium **Energy efficiency**:

$$\eta_e = \frac{Q_{prod} - (E_f + I_{imp})}{f_{B^*}(E_w + E_f)} > 0.65^* \qquad \textbf{(16)}$$

* pro zařízení uvedená do provozu před 31. Prosincem 2008 je mezní hodnota pro energetické využívání snížena na 0,60.

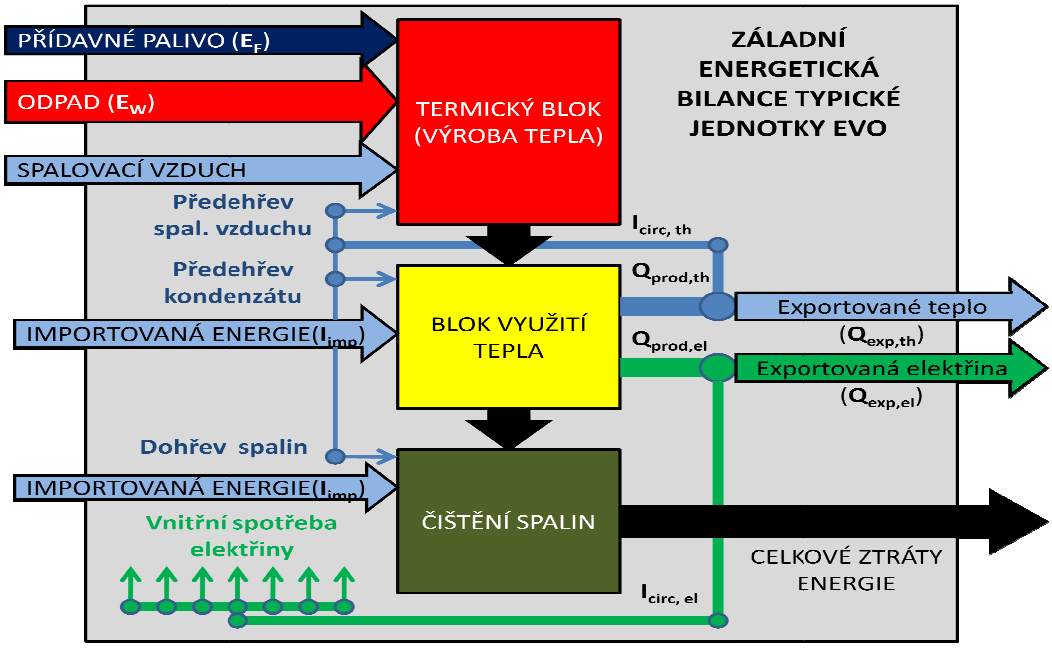
Kritérium je možno použít pouze pro hodnocení zařízení, která spalují pevný komunální odpad. Z pohledu evropské legislativy je toto kritérium závazné. Ze všech předchozích kritérií je pouze Energy efficiency zakotveno v platné právní úpravě.

Energy efficiency je ve své podstatě shodné s kritériem Energy utilization rate, navržené organizací CEWEP. Podmínka kritéria pro hodnocení zařízení jako energetické využívání byla navýšena z 0,5 na 0,65 resp. 0,60.

4 METODIKA STANOVENÍ ROZHODNÝCH PARAMETRŮ

Protože v současnosti je legislativně zakotveno pouze kritérium Energy efficiency, bude dále věnována pozornost pouze tomuto kritériu. Směrnice 98/2008/EC [8] uvádí pouze výše zmíněný vztah. Neexistuje detailnější návod pro jeho použití. Směrnice se pouze odkazuje na dokument o nejlepších dostupných technologiích pro spalování odpadu [5].

Cílem této kapitoly je vypracovat metodiku, která vysvětlí použití kritéria. Tepelné bilance, potřebné pro výpočet jsou prováděny za období jednoho roku. Vztahy jsou přizpůsobeny tak, aby výsledné hodnoty byly přímo v ekvivalentních jednotkách z hlediska spotřeby primárních energetických zdrojů.



Obr. 4.1 Základní bilanční schéma s uvedením hlavních energetických toků

Při výpočtu kritéria je nutno zohlednit spotřebu primárních energetických zdrojů v referenčním zařízení pro konkrétní energetické toky podle tabulky 4.1.

Parametr	Přepočtový koeficient k
Energie dodaná odpadem, $\mathbf{E_w}$	1,0
Importovaná energie paliva podílející se na výrobě páry, $\mathbf{E_f}$	1,0
Importovaná energie paliva bez podílu na výrobě páry, $\mathbf{I_{imp,\,th}}$	1,0
Importovaná tepelná energie bez podílu na výrobě páry, $\mathbf{I_{imp,th}}$	1,1
Importovaná elektrická energie, $\mathbf{I_{imp,\,el}}$	2,6
Celkové množství vyrobeného tepla, $\mathbf{Q_{prod,th}}$	-
z toho exportováno, $\mathbf{Q_{exp,th}}$	1,1
z toho spotřebováno v procesu, $\mathbf{I_{circ,th}}$	1,1
Celkové množství vyrobené elektřiny, $\mathbf{Q_{prod,el}}$	-
z toho exportované, $\mathbf{Q_{exp,el}}$	2,6
z toho spotřebováno v procesu, $\mathbf{I_{circ,el}}$	2,6

Tab. 4.1 Koeficienty přepočtu na ekvivalentní jednotky

Přepočet na ekvivalentní jednotky v obecném tvaru je možné vyjádřit takto:

$$E_{ek} = k \cdot E_{abs} \quad \textbf{(17)}$$

kde:

$\boldsymbol{E_{abs}}$ *jsou absolutní jednotky, získané z energetické bilance systému [MWh, GJ]*
k *je přepočtový koeficient [-]*

V dalším postupu budou výsledné hodnoty uvedeny přímo v ekvivalentních jednotkách, se zdůvodněním hodnot přepočtových koeficientů, pro konkrétní energetické toky.

4.1 Energie dodaná odpadem, $\mathbf{E_w}$

Tuhý komunální odpad je obecně nehomogenní, hodnoty výhřevnosti (lower heating value – LHV) jsou velmi proměnné, v závislosti na aktuální skladbě odpadu. Následující výpočet (užívaný energetickou podskupinou, podílející se na tvorbě BREF) umožňuje určit výhřevnost na základě ukazatelů stávajícího provozu:

$$\boldsymbol{LHV = \frac{1{,}133 \cdot \frac{m_{st\,w}}{m} \cdot c_{st\,x} + 0{,}008 \cdot T_b}{1{,}085}} \quad \text{[GJ/t]} \quad \textbf{(18)}$$

Množství páry vyrobené pouze z odpadu je možno vypočíst na základě vztahu:

$$\boldsymbol{m_{st\,w} = m_{st\,x} - (m_f \cdot \frac{c_f}{c_{st\,x}}) \cdot \eta_b} \quad \text{[t/rok]} \quad \textbf{(19)}$$

kde:

$\boldsymbol{m_{st\,x}}$	*celkové množství vyrobené páry*	*[t/rok]*
$\boldsymbol{m_f}$	*množství přídavného paliva pro výrobu páry*	*[t/rok]*
$\boldsymbol{m}$	*množství spáleného odpadu*	*[t/rok]*
$\boldsymbol{c_{st\,x}}$	*čistá entalpie páry (entalpie páry – entalpie napájecí vody)*	*[GJ/t]*
$\boldsymbol{c_f}$	*výhřevnost přídavného paliva pro výrobu páry*	*[GJ/t]*
$\boldsymbol{\eta_B}$	*účinnost tepelné výměny (přibližná hodnota 0,8)*	*[-]*
$\boldsymbol{T_b}$	*teplota spalin za kotlem (při 4-12% O_2 ve spalinách)*	*[°C]*
0,008	*specifický energetický obsah spalin*	$[\frac{GJ}{t \cdot °C}]$

Je uvedeno, že výpočet je možno použít pouze u současných zařízení, nikoliv k účelům navrhování rozměrů nových zařízení. Dále je zdůrazněna podmínka 4-12% O_2 ve spalinách. Při jiných koncentracích je nutné upravit konstanty regresních rovnic, aby bylo dosaženo potřebné přesnosti.

Koeficient přepočtu na ekvivalentní jednotky (E_w):

Všechny koeficienty kritéria musejí být dosazeny v ekvivalentních jednotkách. V případě přepočtu E_w z výhřevnosti paliva nedochází k předchozí konverzi energie, výhřevnost sama je primárním zdrojem. Z tohoto důvodu je hodnota přepočtového koeficientu rovna jedné, jak uvádí následující vztah:

$$\boldsymbol{E_w = k \cdot LHV \cdot m = 1 \cdot LHV \cdot m} \quad \text{[GJ]} \qquad \textbf{(20)}$$

kde:

$\boldsymbol{m}$	*je hmotnost spáleného odpadu [t]*

4.2 Importovaná energie paliva podílející se na výrobě páry, $\mathbf{E_f}$

Podpůrná tepelná energie termického bloku, v běžném provozu je závislá na schopnosti odpadu samovolně hořet a dodávat potřebnou energii do systému výměny tepla. *Dolní hranice výhřevnosti TKO pro samovolné hoření je přibližně 3,6 GJ/t. Tato minimální výhřevnost je dosažitelná i při poměrně vysokém obsahu balastních látek (až 75%).* [26] Takto nízké hodnotě musí být zařízení přizpůsobeno, běžně se výhřevnost odpadu pohybuje kolem 10GJ/t.

Přídavné palivo může být ve skupenství plynném, nebo kapalném, jak uvádí následující vztahy.

Jednoduchý výpočet pro plynné palivo (např. zemní plyn):

$$\boldsymbol{E_f = \frac{V_p \cdot R_{sp} \cdot k}{1000}} \quad \text{[GJ]} \qquad \textbf{(21)}$$

kde:

$\boldsymbol{V_p}$	*je výhřevnost plynného paliva [MJ/m_N^3]*
$\boldsymbol{R_{sp}}$	*je roční spotřeba plynného paliva [m_N^3]*
$\boldsymbol{k}$	*= 1 [-]*

Při výpočtu importované energie kapalného paliva se užije analogický postup:

$$\boldsymbol{E_f = \frac{V_k \cdot R_{sk} \cdot k}{1000}} \quad \text{[GJ]} \qquad \textbf{(22)}$$

kde:

$\boldsymbol{V_k}$	*je výhřevnost kapalného paliva*	*[MJ/kg]*
$\boldsymbol{R_{sk}}$	*je roční spotřeba kapalného paliva*	*[kg]*
$\boldsymbol{k}$	*= 1 [-]*	

Koeficient přepočtu na ekvivalentní energii je roven jedné, podobně jako v případě spalování odpadu, ani zde nedochází k předchozí konverzi energie.

4.3 Importovaná tepelná energie bez podílu na výrobě páry, $\mathbf{I_{imp,th}}$

Zahrnuje energie importované pro potřeby spalovacího procesu. Jedná se o palivo pro opětovné zahřátí spalin, případně import páry do procesu. Pro velmi přesnou bilanci je možné zahrnout teplo potřebné k otopu budov spalovny.

Pro výpočet energie dodané palivem je možno použít obdobných vztahů jako v případě paliv podílejících se na výrobě páry vztah (21) a (22), včetně koeficientů přepočtu na ekvivalentní jednotky.

$$\boldsymbol{I_{imp,th} = \frac{V_p \cdot R_{sp} \cdot k}{1000}} \quad [\text{GJ}] \tag{23}$$

$$\boldsymbol{I_{imp,th} = \frac{V_k \cdot R_{sk} \cdot k}{1000}} \quad [\text{GJ}] \tag{24}$$

kde:

$\boldsymbol{k}$ = 1,0 *[-]*

Výpočet tepelné energie dodané teplonosným médiem (párou)

V případě, že se pára vrací zpět do zdroje, použije se pro výpočet rozdílu entalpií páry na vstupu do jednotky ($\boldsymbol{H_{h\,in}}$) a entalpie odchozího kondenzátu ($\boldsymbol{H_{c\,out}}$):

$$\boldsymbol{I_{imp,th} = (H_{h\,in} - H_{c\,out}) \cdot k} \quad [\text{GJ}] \tag{25}$$

kde:

$\boldsymbol{H_{h\,in}}$ *je absolutní hodnota entalpie horkého proudu na vstupu [MJ/m_N^3]*
$\boldsymbol{H_{c\,out}}$ *je absolutní hodnota entalpie horkého proudu na výstupu [MJ/m_N^3]*
$\boldsymbol{k}$ *= 1,0989 [-]*

V případě, že kondenzát spalovnu neopouští, ale je použit ve vlastním procesu výroby páry ve spalovně, je nutné zahrnout celý takto importovaný energetický tok:

$$\boldsymbol{I_{imp,th} = H_{h\,in} \cdot k} \quad [\text{GJ}] \tag{26}$$

V případě dodávky tepla horkou vodou je postup analogický, odečtou se entalpie vstupních a výstupních proudů:

$$\boldsymbol{I_{imp,th} = (H_{h\,in} - H_{c\,out}) \cdot k} \quad [\text{GJ}] \tag{27}$$

Koeficient přepočtu na ekvivalentní jednotky je roven 1,0989, což představuje převrácenou hodnotu účinnosti výroby tepla v referenčním zdroji (v teplárně).

4.4 Importovaná elektrická energie, $\mathbf{I_{imp,el}}$

Jedná se o elektrickou energii, která je potřebná pro vlastní proces. U stávajícího zařízení je užíváno přímého měření vztah (28). Pro modelové (simulační) případy nejsou data k dispozici, je možno použít typické hodnoty měrné spotřeby elektrické energie (pokud již není zahrnuta ve formě energie cirkulované), pro srovnatelný typ zařízení vztah (29).

$$\boldsymbol{I_{imp,el} = I_{imp,el\,m} \cdot k} \quad [\text{GJ}] \tag{28}$$

kde:

$\boldsymbol{I_{imp,el\,m}}$ *je naměřená hodnota u stávajícího zařízení [GJ]*

$$\boldsymbol{I_{imp,el} = i_{imp,el} \cdot m \cdot k} \quad [\text{GJ}] \tag{29}$$

kde:

$\boldsymbol{i_{imp,el}}$ *je měrná referenční spotřeba elektrické energie [GJ/kg]*
$\boldsymbol{m}$ *je hmotnost zpracovaného odpadu za dané období [kg]*

Koeficient přepočtu na ekvivalentní jednotky je roven 2,6316, což představuje převrácenou hodnotu účinnosti výroby energie v referenčním zdroji (elektrárně).

4.5 Celkové množství vyrobeného tepla, $\mathbf{Q_{prod,th}}$

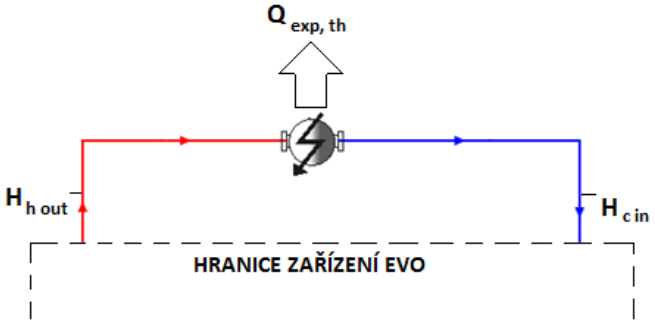
Vyrobené teplo sestává z tepla určeného k exportu mimo spalovnu ($Q_{exp,th}$) a tepla určeného pro pokrytí tepelných ztrát systému ($I_{circ,th}$).

$$\boldsymbol{Q_{prod,th} = Q_{exp,th} + I_{circ,th}} \quad [\text{GJ}] \tag{30}$$

Do vztahu (31) je možno dosadit jak jednotky absolutní, tak ekvivalentní, vždy však stejného typu. Jednotka výsledné hodnoty bude odpovídat této volbě.

4.5.1 Exportovaná tepelná energie, $\mathbf{Q_{exp,th}}$

Zahrnuto může být pouze skutečné množství exportované tepelné energie, tedy v případě exportu páry se jedná o rozdíl entalpie odchozí páry a vratného kondenzátu na hranici spalovny. V případě exportu teplé vody analogicky rozdíl mezi entalpií odchozího a vratného proudu teplonosného média (vody).



Obr. 4.2 Schéma výpočtu exportovaného tepla

Exportovaná tepelná energie se určí ze vztahu:

$$\boldsymbol{Q_{exp,th}} = (\boldsymbol{H_{h\,out}} - \boldsymbol{H_{c\,in}}) \cdot \boldsymbol{k} \quad [\text{GJ}] \qquad \textbf{(31)}$$

$\boldsymbol{H_{h\,out}}$ *je absolutní hodnota entalpie horkého proudu na výstupu [GJ]*
$\boldsymbol{H_{c\,in}}$ *je absolutní hodnota entalpie chladného proudu na vstupu [GJ]*
$\boldsymbol{k}$ *= 1,09891 [-]*

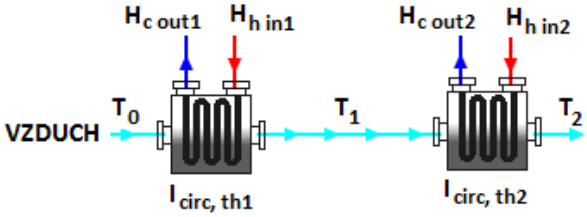
Koeficient přepočtu na ekvivalentní jednotky je roven převrácené hodnotě účinnosti výroby tepla v referenčním zdroji k = 1,0989.

4.5.2 Cirkulovaná tepelná energie, $\mathbf{I_{circ,th}}$

Jedná se o energii vyrobenou v procesu, která se dále užívá k pokrytí vlastních tepelných ztrát systému. Může se jednat například o energii potřebnou k předehřevu spalovacího vzduchu, ohřevu spalin, nebo dohřevu kondenzátu na teplotu napájecí vody kotle, pokud není tato energie dodána ve formě importu.

Výpočet cirkulované energie bude ukázán na několika typických příkladech míst technologie, kde se cirkulovaná energie spotřebovává.

Dvoustupňový předehřev spalovacího vzduchu je zajištěn odběrem ostré páry, která má vyšší parametry a zajistí dohřátí na vyšší teploty, než jaké je možno dosáhnout v prvním stupni.



Obr. 4.3 Dvoustupňový předehřev spalovacího vzduchu

Výpočet v absolutních jednotkách:

$$\boldsymbol{I_{circ,thA}} = \boldsymbol{I_{circ,th\,1}} + \boldsymbol{I_{circ,th\,2}} = (\boldsymbol{H_{h\,in1}} - \boldsymbol{H_{c\,out1}}) + (\boldsymbol{H_{h\,in2}} - \boldsymbol{H_{c\,out2}}) \quad [\text{GJ}] \qquad \textbf{(32)}$$

Přepočet na jednotky ekvivalentní:

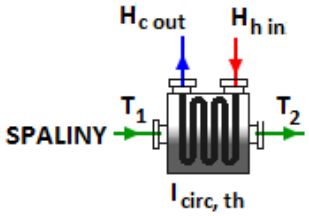
$$\boldsymbol{I_{circ,th}} = \boldsymbol{I_{circ,thA}} \cdot \boldsymbol{k} \qquad [\text{GJ}] \qquad \textbf{(33)}$$

$\boldsymbol{k}$ = 1,0989 *[-]*

Opětovný ohřev spalin

Používá se v případě, že provozní teplota aparátů pro snižování emisí (např. De NO_x) klesne pod provozní teplotu následného zařízení. Spaliny je pak nutno opětovně ohřát.

Může být realizován například cirkulovanou tepelnou energií, bypassem části spalin (není považováno za cirkulovanou energii), popřípadě přídavným spalováním paliva (energií importovanou). Na obrázku 4.4 je znázorněn případ opětovného ohřevu spalin cirkulovanou tepelnou energií (párou).



Obr. 4.4 Tepelný výměník pro opětovný ohřev spalin

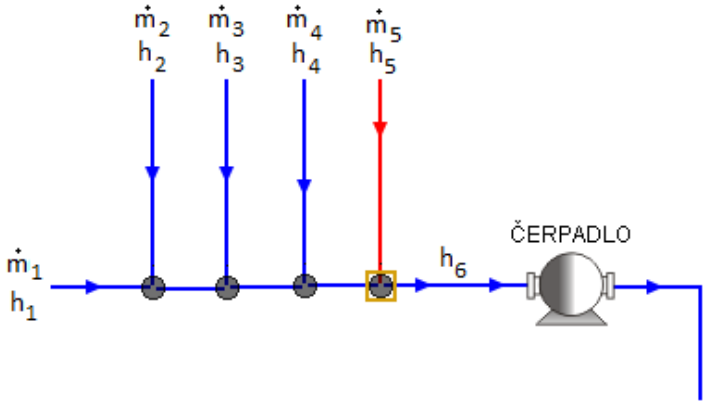
Předané teplo je možné vypočíst ze vztahu:

$$\boldsymbol{I_{circ,th}} = (\boldsymbol{H_{h\,in}} - \boldsymbol{H_{c\,out}}) \cdot \boldsymbol{k} \qquad \text{[GJ]} \qquad \textbf{(34)}$$

$$\boldsymbol{k} = 1{,}0989\ [-]$$

Ohřev kondenzátu na teplotu napájecí vody

Dalším místem, kde se spotřebovává cirkulovaná energie je ohřev kondenzátu na teplotu napájecí vody. Ne všechny vratné kondenzáty je nutno dohřívat na teplotu napájecí vody, některé mají teplotu vyšší a naopak dohřívají ostatní chladnější proudy. Také tento dohřev je nutno zahrnout do tepelné bilance daného uzlu a cirkulované energie. Nestačí tedy zahrnout pouze entalpii proudu, který kondenzát primárně dohřívá.



Obr. 4.5 Bilanční schéma ohřevu kondenzátu na teplotu napájecí vody

V obecném případě (obr. 4.5) jsou nositeli cirkulované energie proudy, které mají vyšší měrnou entalpii, než je požadovaná měrná entalpie napájecí vody. Obrázek představuje prosté smísení všech vratných kondenzátů a regulačního dohřevu parním odběrem. Parní odběr (číslo5) slouží k regulaci teploty napájecí vody na základě aktuální potřeby.

Písmeno h [GJ/kg] představuje měrnou entalpii, $\dot{m}$ [kg/h] je hmotnostní průtok daného proudu.

Z důvodu rozlišení teplejších a chladnějších proudů, v porovnání s napájecí vodou, je zavedena znaménková konvence. Za nositele cirkulované energie jsou považovány pouze proudy s kladným znaménkem vypočtené cirkulované energie, dle následujících výpočtových vztahů.

$$I_{circ,th1} = ((h_1 - h_6) \cdot \dot{m}_1) \cdot F_{PD} \cdot k \quad [GJ] \quad \textbf{(35)}$$
$$I_{circ,th\,2} = ((h_2 - h_6) \cdot \dot{m}_2) \cdot F_{PD} \cdot k \quad [GJ] \quad \textbf{(36)}$$
$$I_{circ,th\,3} = ((h_3 - h_6) \cdot \dot{m}_3) \cdot F_{PD} \cdot k \quad [GJ] \quad \textbf{(37)}$$
$$I_{circ,th\,4} = ((h_4 - h_6) \cdot \dot{m}_4) \cdot F_{PD} \cdot k \quad [GJ] \quad \textbf{(38)}$$
$$I_{circ,th\,5} = ((h_5 - h_6) \cdot \dot{m}_5) \cdot F_{PD} \cdot k \quad [GJ] \quad \textbf{(39)}$$

kde:

F ***PD*** *je fond pracovní doby [h]*
k = 1,0989 *[-]*

Fond pracovní doby je zde nutno zavést z důvodu toho, že ve výše zmíněných vztazích pracujeme s měrnou entalpií proudů (h) a hmotnostními toky ($\dot{m}$). Jejich součinem tedy nezískáme tepelnou energii (jak je tomu v předchozích případech s absolutní entalpií a bez hmotnostního toku), získáme tepelný výkon proudu (například v GJ/h). Pro výpočet energie (schopnosti soustavy konat práci) z výkonu je tedy obecně nutné znát pracovní dobu, po kterou je výkon podáván.

Podmínka zahrnutí energie do cirkulované tedy je: $\mathbf{I_{circ,th\ x} > 0}$ kde x je číslo proudu vratného kondenzátu.

Součet dílčích cirkulovaných energií následně udává celkovou cirkulovanou energii, potřebnou pro ohřev kondenzátu, včetně případných ztrát na vedení a směšovačích.

Koeficient přepočtů na ekvivalentní jednotky, pro všechny výše uvedené tepelné cirkulované energie, je roven převrácené hodnotě účinnosti výroby tepla v referenčním zdroji (k = 1,0989).

4.6 Celkové množství vyrobené elektřiny, $Q_{prod,el}$

Celkové množství vyrobené elektřiny je možno přímo naměřit ve stávající technologii, případně je možno použít výpočtového modelu.

$$Q_{prod,el} = Q_{prod,el\,m} \cdot k \quad [GJ] \tag{40}$$

$Q_{prod,el\,m}$ je naměřená (vypočtená) hodnota [GJ]

Vyrobená energie sestává z elektřiny určené k exportu a cirkulované energie, užité pro vlastní provoz zařízení.

$$Q_{prod,el} = Q_{exp,el} + I_{circ,el} \quad [GJ] \tag{41}$$

Do vztahu (41) je možno dosadit jak jednotky absolutní, tak ekvivalentní, vždy však stejného typu. Jednotka výsledné hodnoty bude odpovídat této volbě.

4.6.1 Cirkulovaná elektrická energie, $I_{circ,el}$

Cirkulovanou elektrickou energii je možno stanovit na základě hlavních technologických ukazatelů spotřeby, jako jsou čerpadla pro dopravu procesních kapalin a spalinový ventilátor, případně zařízení pro homogenizaci a dávkování odpadu (jeřáb, podavač, atd.). Níže uvedený výpočtový postup (42) je založen na stanovení poměrné spotřeby elektrické energie, na základě referenčního zařízení.

$$I_{circ,el} = i_{circ,el} \cdot m \cdot k \quad [GJ] \tag{42}$$

kde:
$I_{circ,el}$ *je měrná spotřeba elektrické energie [GJ/t]*
m *je hmotnost zpracovaného odpadu [t]*

Vztah (42) platí pouze v případě, že je výroba elektrické energie větší než její spotřeba ve vlastním procesu. Pokud tomu tak není, cirkulovaná energie může být maximálně energie vyrobená, zbytek je nutné importovat.

Koeficient přepočtu na ekvivalentní jednotky je roven 2,6316, což představuje převrácenou hodnotu účinnosti výroby energie v referenčním zdroji (elektrárně).

4.6.2 Exportovaná elektrická energie, $Q_{exp,el}$

Exportovaná energie se naměří ve stávající technologii. Výpočet vychází z vyjádření exportované energie. Jelikož je z bilančního modelu známa produkovaná elektrická energii a též cirkulovaná elektrická energie, je možno dopočítat energii exportovanou.

$$Q_{exp,el} = Q_{prod,el} - I_{circ,el} \quad [GJ] \tag{43}$$

Výpočet předpokládá dosazení a výslednou hodnotu v ekvivalentních jednotkách.

Výše zmíněný postup umožňuje určení rozhodných parametrů pro výpočet kritéria **Energy efficiency** a je možno jej považovat za doporučený i pro případné vyčíslení kritérií Plant Efficiency, Plant Efficiency Factor a Energy Utilization Rate.

4.7 Výpočtový model v tabulkovém procesoru MS Excel

Navržená metodika výpočtu rozhodných parametrů byla následně převedena do prostředí MS Excel. Byl navržen formulář, který obsahuje hlavní energetické toky technologie termického zpracování komunálních odpadů. Tyto toky následně převádí do formy vhodné pro výpočet.

Do výpočtového formuláře jsou vkládány hodnoty z bilančního modelu předmětné technologie. Výpočet je ukázán na příkladu formuláře, který byl použit při vypracování případové studie (viz. dále). Formulář je součástí přílohy 2 a je vypracován na podkladě bilančního modelu, který je uveden v příloze 1.

Vybraný příklad reprezentuje dvoustupňovou výrobu elektrické energie na parní protitlaké a parní kondenzační turbině. Za protitlakou turbinou je proud rozdělen na část pro výrobu tepla a část pro výrobu elektřiny na kondenzační turbině. V níže uvedeném příkladu je 100% páry za protitlakou turbinou určeno pro výrobu tepla, pro účely příkladu je takové uspořádání nazýváno 100% kogenerační výrobou.

Na obrázku 4.6 je formulář výpočtu energie vnesené odpadem, vlastní výpočet je proveden dle kapitoly 4.1.

Energetické toky v jednotkách W2E — 100% kogenerace

Fond pracovní doby: 8000 h/rok

ENERGIE VSTUPUJÍCÍ DO PROCESU

E_w		ABSOLUTNÍ ENERGIE	MWh	ABSOLUTNÍ ENERGIE	GJ	EKVIVALENTNÍ ENERGIE	MWh	PŘEPOČTOVÝ KOEFICIENT
Výhřevnost odpadu:	10,681 GJ/t							
Import odpadu:	12 t/h	284 826,7		1 025 376,0		284 826,7		1,0
Tepelná energie dodaná odpadem, Ew		**284 826,7**	MWh	1 025 376,0	GJ	**284 826,7**	MWh	-

Obr. 4.6 Výpočet energie vnesené odpadem, $\mathbf{E_w}$

Na obrázku 4.7 je formulář výpočtu energie paliva, která se podílí na výrobě páry, vlastní výpočet je proveden dle kapitoly 4.2.

E_f								
PLYNNÉ PALIVO								
Výhřevnost paliva:	34 MJ/Nm^3							
Import paliva:	112651,4 Nm^3	1 063,9		3 830,1		1 063,9		1,0
KAPALNÉ PALIVO								
Výhřevnost paliva:	GJ/t							
Import paliva:	t	0,0		0,0		0,0		1,0
Importovaná energie, podílející se na výrobě pára, E_f		**1 063,9**	MWh	3 830,1	GJ	**1 063,9**	MWh	-

Obr. 4.7 Výpočet energie paliva, které se podílí na výrobě páry, $\mathbf{E_f}$

Na obrázku 4.8 je uveden formulář pro výpočet importované energie, která se nepodílí na výrobě páry, vlastní výpočet je proveden dle kapitol 4.3 a 4.4.

I_{imp}								
PLYNNÉ PALIVO								
Výhřevnost paliva:		MJ/Nm³						
Import paliva:		Nm³	0,0		0,0		0,0	1,0
KAPALNÉ PALIVO								
Výhřevnost paliva:		GJ/t						
Import paliva:		t	0,0		0,0		0,0	1,0
PÁRA								
entalpie na vstupu:		GJ/t						
entalpie na výstupu:		GJ/t						
průtok:		t/h	0,0		0,0		0,0	1,1
HORKÁ VODA		GJ	0,0		0,0		0,0	1,1
ÚSTŘEDNÍ VYTÁPĚNÍ		GJ	0,0		0,0		0,0	1,1
ELETŘINA		MWh	0,0		0,0		0,0	2,6
Importovaná energie nepodílející se na výrobě pára, I_{imp}			**0,0**	MWh	0,0	GJ	**0,0**	MWh	-

Obr. 4.8 Výpočet importované energie, která se nepodílí na výrobě páry, $\mathbf{I_{imp}}$

Na obrázku 4.9 je formulář výpočtu produkované energie, výpočet je proveden dle kapitoly 4.6.

ENERGIE VYSTUPUJÍCÍ Z PROCESU									
Q_{prod}			**ABSOLUTNÍ ENERGIE**	MWh	**ABSOLUTNÍ ENERGIE**	GJ	**EKVIVALENTNÍ ENERGIE**	MWh	PŘEPOČTOVÝ KOEFICIENT
ELETRICKÁ ENERGIE									
1. STUPEŇ:	17657,2	MWh	17 657,2		63 565,9		46 466,7		2,6
2. STUPEŇ:	0	MWh	0,0		0,0		0,0		2,6
3. STUPEŇ:		MWh	0,0		0,0		0,0		2,6
4. STUPEŇ:		MWh	0,0		0,0		0,0		2,6
$Q_{prod,EL}$			17 657,2		63 565,9		**46 466,7**		2,6
TEPELNÁ ENERGIE									
$Q_{prod,TH}$			216 965,6		781 076,2		**238 423,5**		1,1
Produkovaná energie, Q_{prod}			**234 622,8**	MWh	844 642,1	GJ	**284 890,2**	MWh	-

Obr. 4.9 Produkovaná (vyrobená) energie, $\mathbf{Q_{prod}}$

Jednotlivé stupně jsou ve výpočtovém modulu zahrnuty z důvodu možného užití vícestupňové výroby elektřiny (technologie sestává například z parní protitlaké a parní kondenzační turbiny).

Na obrázku 4.10 je formulář výpočtu exportované energie, výpočet je proveden dle kapitoly 4.5.1.

Q_{exp}								
ELEKTRICKÁ ENERGIE								
$Q_{exp,EL}$	7 577,2	MWh	27 277,9	GJ	**19 940,2**	MWh	2,6
TEPELNÁ ENERGIE:	707629,2734	GJ					
$Q_{exp,TH}$	196 563,7	MWh	707 629,3	GJ	**216 003,8**	MWh	1,1
Exportovaná energie, Q_{exp}	**204 140,9**	MWh	734 907,2	GJ	**235 944,0**	MWh	-

Obr. 4.10 Výpočet exportovaná energie, $\mathbf{Q_{exp}}$

Na obrázku 4.11 je výpočet cirkulované energie, výpočet je proveden na základě kapitol 4.5.2 a 4.6.1.

Icirc								
ELEKTRICKÁ ENERGIE								
Měrná spotřeba:	0,105	MWh/t						
Zpracovaný odpad:	96000	t						
$Q_{circ,EL}$			10 080,0		36 288,0	GJ	**26 526,5**	MWh	2,6
TEPELNÁ ENERGIE								
Předehřev spalovacího vzduchu								
Entalpie odběru:	2989,1	kJ/kg						
Entalpie kondenzátu:	476,7	kJ/kg						
Průtok páry:	300	kg/h	1 674,9		6 029,8		1 840,6		1,1
Dohřev spalin								
Entalpie odběru:	2989,1	kJ/kg						
Entalpie kondenzátu:	823,8	kJ/kg						
Průtok páry:	250	kg/h	1 202,9		4 330,6		1 321,9		1,1
Předehřev spalovacího vzduchu - ostrou párou								
Entalpie odběru:	3214,4	kJ/kg						
Entalpie kondenzátu:	924,8	kJ/kg						
Průtok páry:	2,3	kg/h	11,7		42,1		12,9		1,1
Dohřev kondenzátu								
Entalpie napájecí vody	496	kJ/kg						
Teplejší proud 1								
entalpie	924,8	kJ/kg						
průtok	2,3	kg/h	2,2		7,9		2,4		1,1
Teplejší proud 2								
entalpie	476,7	kJ/kg						
průtok	300	kg/h	-12,9		-46,3		-14,1		1,1
Teplejší proud 3								
entalpie	2989,1	kJ/kg						
průtok	3130	kg/h	17 340,9		62 427,2		19 055,9		1,1
Teplejší proud 4								
entalpie	823,8	kJ/kg						
průtok	250	kg/h	182,1		655,6		200,1		1,1
$Q_{circ,TH}$			20 401,9		73 446,9	GJ	**22 419,7**	MWh	
Cirkulovaná energie, Qcirc			**30 481,9**	MWh	109 734,9	GJ	**48 946,2**	MWh	-

Obr. 4.11 Výpočet cirkulované energie, $\mathbf{I_{circ}}$

Na dalším obrázku 4.12 jsou výsledné hodnoty sledovaných kritérií. Výpočty jsou provedeny na základě kapitoly 3.

HODNOTÍCÍ KRITÉRIUM	PODMÍNKA	HODNOTA KRITÉRIA	
ENERGY EFFICIENCY	> 0,65*	**1,02**	-
PLANT EFFICIENCY FACTOR	> 1	5,68	-
PLANT EFFICIENCY	-	4,70	-
PES	-	**845 568,2**	GJ
pes	-	1,00	-
pes	-	**0,82**	-
FUR	-	0,714	-
TEPLÁRENSKÝ MODUL	-	0,039	-

Obr. 4.12 Výsledné hodnoty jednotlivých kritérií

Z kritérií, která jsou uvedena na obrázku 4.12 má legislativně podložený význam pouze kritérium Energy efficiency (R1 kritérium), měrná úspora primárních energetických zdrojů (pes). Absolutní hodnota primárních energetických zdrojů je relevantním a snadno představitelným ukazatelem. Je možné jej například přepočíst na množství uhlí, zemního plynu, nebo jiného paliva dané výhřevnosti.

Ve spolupráci s fakultou informačních technologií FSI VUT Brno byl na základě výše zmíněného postupu navržen formulář energetického vyhodnocení pro výpočtový software W2E (waste to energy).

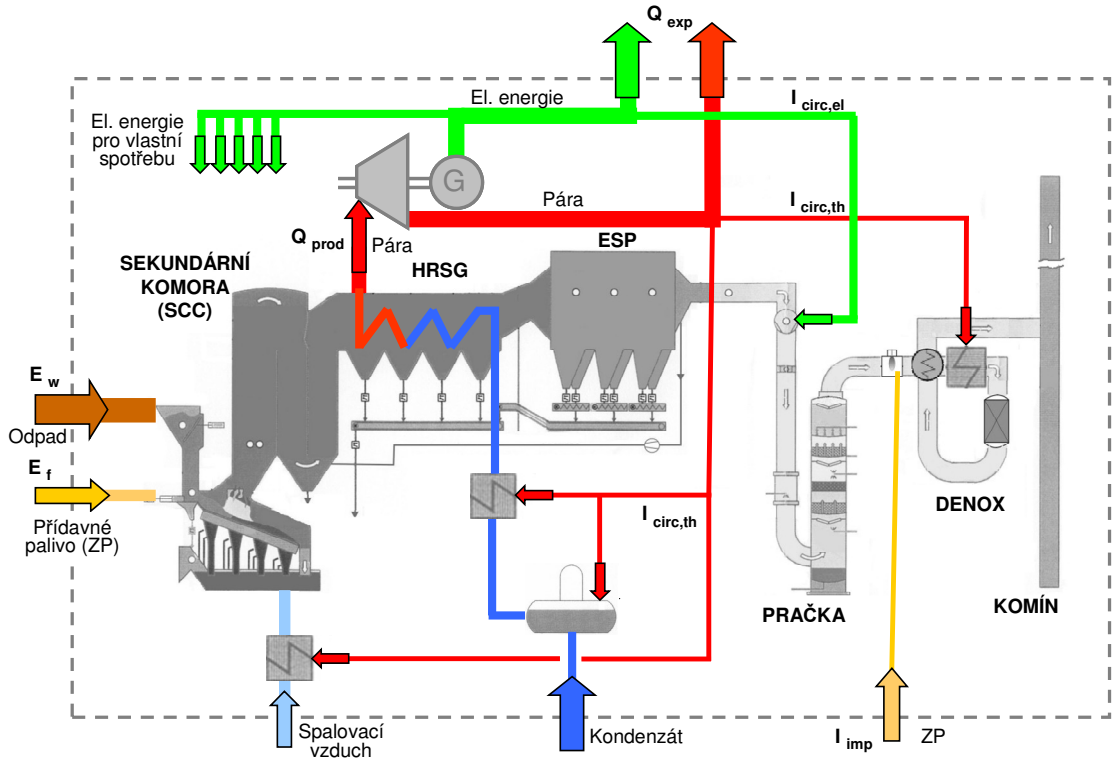
Výpočtový software W2E je schopen na základě sekvenční metody řešení vyčíslit materiálové a energetické bilance technologií pro výrobu energie z odpadu a biomasy. Sekvenční metoda řešení znamená, že výpočet je prováděn postupně po jednotlivých krocích, s přesně řízenou distribucí známých parametrů. K výpočtu je třeba znát vstupní parametry proudu, topologii zařízení (definuje distribuci známých veličin) a parametry jednotkových operací (poměr dělení proudu, přebytek spalovacího vzduchu, tepelná ztráta na výměníku atd.).

4.8 Bilanční model v programu W2E

V prostředí programu W2E byl vytvořen bilanční model typické technologie spalovny odpadů s kapacitou 100kt/rok. Podrobný popis bilančního softwaru W2E, včetně výpočtů jednotlivých bilančních uzlů a manuálu aplikace je uveden v práci [27].

Bilanční model (viz. příloha 3) umožňuje vytvořit základní energetickou bilanci jednotek termického zpracování komunálního odpadu. Následně je možné pomocí uvedené metodiky stanovit energetickou účinnost (R1 kritérium) a další kritéria, zejména s ohledem na poměr vyráběné elektřiny a tepla.

Modelový příklad předmětné technologie je znázorněn na obrázku 4.13.



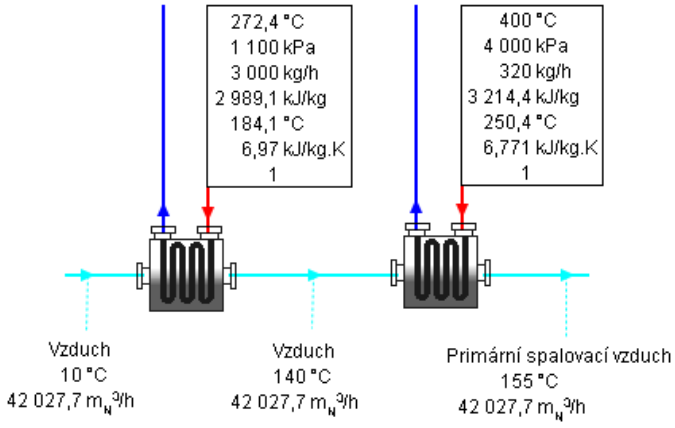
Obr. 4.13 Schéma hlavních energetických toků (20)

V následujícím textu jsou popsány jednotlivé části modelové technologie, bilanční model jako celek je uveden v příloze 1.

Předehřev spalovacího vzduchu

Předehřev spalovacího vzduchu je realizován pomocí dvou bilančních uzlů, které představují dva tepelné výměníky. Každý výměník zahrnuje dva různé typy proudů (vzduch a pára), mezi nimiž dochází k výměně tepla. Výměník je možno nastavit na daný výkon přeneseného tepla, případně nastavit cílovou teplotu, na niž se má chladný proud ohřát, případně teplý proud ochladit. Dále je možné nastavit tepelné ztráty výměníků. Tepelný obsah horkého média musí být dostatečný pro ohřev chladného proudu na danou teplotu, v opačném případě program zahlásí chybu překřížením teplotních profilů. Proudy vstupující do výměníku je možné definovat přímo zadáním parametrů (teplota, tlak, průtok, vlhkost vzduchu), nebo je možno využít výstupních proudů z jiných bilančních uzlů, které jsou stejného typu.

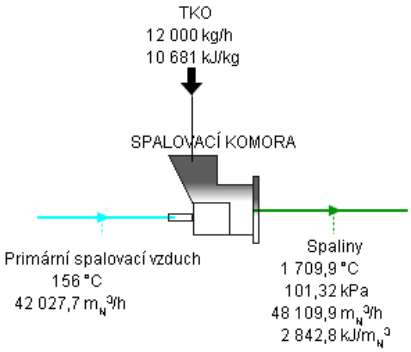
Dvoustupňový předehřev je zaváděn z důvodu vyšších dosažitelných teplot předehřívaného vzduchu. Kterýkoliv výměník je v případě potřeby možno „vyřadit z provozu“ nastavením nulové hodnoty přenášeného výkonu. Je však nutné brát ohled na souvislosti technologie, vypnutí výměníku má za následek zvýšení teploty vratného kondenzátu a pro plné odstavení je nutné nastavit i minimální průtok tímto výměníkem. Příklad dvoustupňového výměníku tepla uvádí obr. 4.14.



Obr. 4.14 Bilanční uzel dvoustupňového ohřevu vzduchu

Spalovací komora

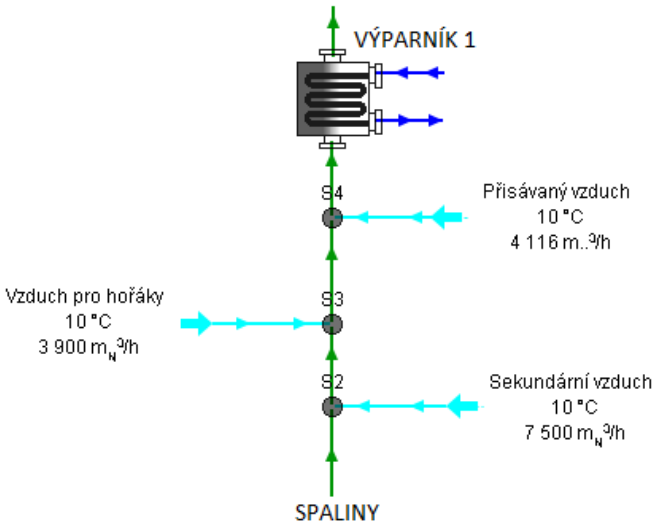
Tento bilanční uzel je realizován blokem spalování tuhých látek. Vstupními proudy jsou odpad, definovaný složením, průtokem a výhřevností, a spalovací vzduch, který je definován výstupem z bloku dvoustupňového předehřevu vzduchu. Výstupem jsou spaliny, známých parametrů (viz obr. 4.15).



Obr. 4.15 Bilanční uzel spalovací komory

Dohořívací komora

Sekundární komora je sestavena ze tří směšovačů vzduchu do proudu spalin. V tomto bloku se ke spalinám přidává sekundární vzduch, který je nutný k dokončení oxidačního procesu ve spalinách. V provozních stavech, kdy teplota klesne pod zákonem stanovenou mez je nutné spaliny dohřát. K tomu účelu slouží hořáky na přídavná paliva, která je, z důvodu možného přehřátí a ztrátě funkčnosti, nutno chladit vzduchem. Posledním přívodem je vzduch, který se do procesu dostává netěsnostmi v podtlakovém systému termického bloku. Stěny dohořívací komory jsou chlazeny vodou, tuto skutečnost modeluje výparník (viz. obr 4.16), který je součástí bloku tepelného využití spalin.



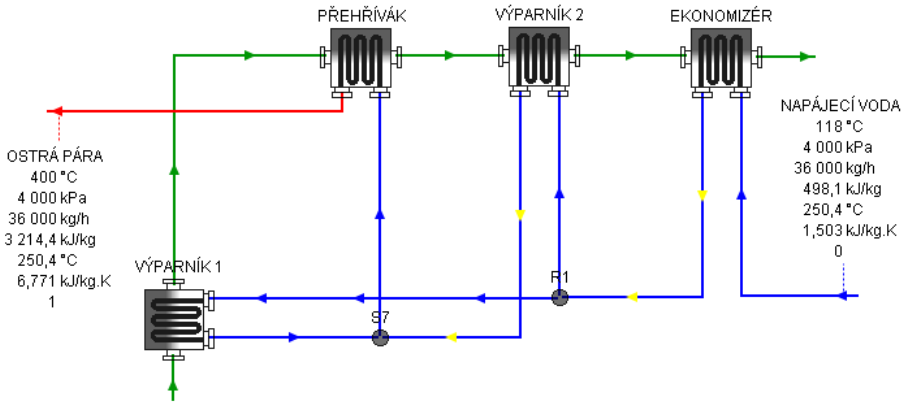
4.16 Bilanční uzel dohořívací komory

Kotel na odpadní teplo

Přestup tepla ze spalin do vody (páry) je možno simulovat pomocí bloku čtyř výměníků tepla. Uspořádání výměníků je protiproudé, což umožňuje maximální využití tepelného potenciálu horkého proudu.

Napájecí voda nejdříve vstupuje do ekonomizéru, kde se předehřeje, následně je rozdělena na dva proudy, z důvodu zmíněné potřeby chlazení prostoru dohořívací komory pomocí membránových stěn. (obr. 4.17)

Ve výparnících dochází ke změně skupenství a k přestupu poměrně velkého množství tepla. Sytá pára je poté vedena do přehříváku, kde se její parametry dále zvyšují až na potřebnou procesní hodnotu.



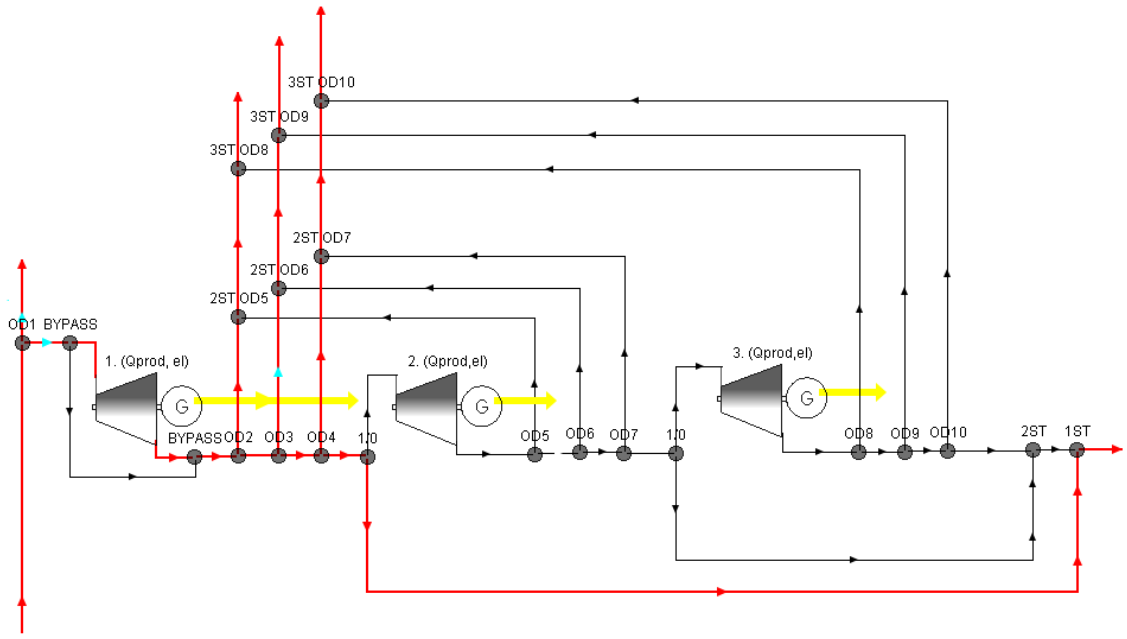
Obr. 4.17 Bilanční uzel kotle na odpadní teplo

Jednotlivé výměníky se nastavují pomocí známých provozních údajů, například cílových teplot vody (případně páry). Jedná se samozřejmě o modelové zjednodušení, kdy model přizpůsobuje tepelný výkon výměníku (teplosměnnou plochu) potřebě cílové teploty. Podmínkou je opět schopnost závislého proudu změnit teplotu proudu regulovaného na požadovanou hodnotu.

Odběrová parní turbina

Bilanční model je sestaven na základě předpokládané potřeby jednoho odběru vysokotlaké páry před vstupem na turbinu (pro druhý stupeň ohřevu spalovacího vzduchu) a tří odběrů páry o nižších parametrech. Tato pára může být odebrána za kterýmkoliv ze 3 turbinových stupňů. Případně mohou být pro daný model nepotřebné stupně vyřazeny z bilance, jako je tomu na obrázku 4.18, kde je model upraven pro potřebu jednostupňové protitlaké parní turbiny.

Případné odpojení turbinového stupně, případně celého turbinového modelu, je možné na základě jednoduchého systému bypassů. Červenou barvou jsou v modelu zvýrazněny funkční proudy.

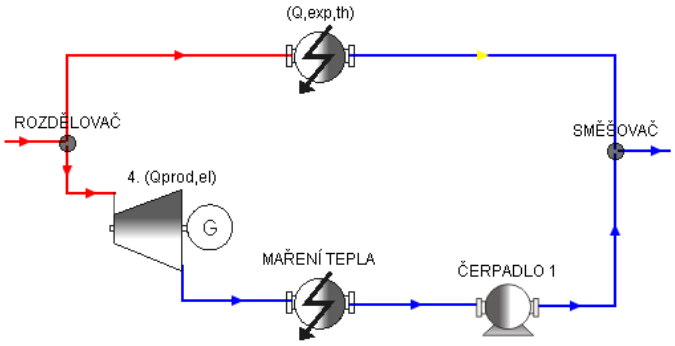


Obr. 4.18 Bilanční uzel odběrové parní turbiny

Funkční jsou pouze proudy označené červenou barvou. Další stupně jsou v modelu z důvodu univerzálnosti použití modelu (jiné varianty technologického uspořádání). Odběr první (OD1) představuje páru, která slouží k dohřevu primárního spalovacího vzduchu ve druhém stupni. Odběr druhý (OD2) slouží k ohřevu primárního spalovacího vzduchu ve druhém stupni. Odběr třetí (OD3) slouží k regulaci teploty napájecí vody pro kotel. Odběr čtvrtý (OD4) slouží k opětovnému ohřevu spalin.

Rozdělovač páry

Jak již bylo uvedeno, spalovací výkon zařízení pro termické zpracování odpadů je závislý na poptávce po exportované energii. Zejména v letních měsících je poptávka po tepelné energii menší, poptávka po energii elektrické zůstává zachována. Z tohoto důvodu se jeví jako výhodnější varianta částečně, nebo zcela nahradit výrobu tepelné energie, výrobou elektřiny. Bilanční model (obr. 4.19) umožňuje rozdělit proud páry do dvou větví, z nichž jedna simuluje export tepla a druhá produkci elektřiny na kondenzační turbině.

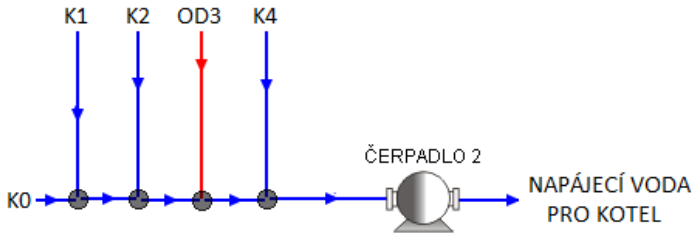


Obr. 4.19 Bilanční uzel rozdělení páry

Rozdělovač umožňuje nastavení absolutní hodnoty jednoho průtoku, případně nastavení poměru dvou průtoků. Z důvodu nutnosti mařeni tepla za kondenzační turbinou, je navyšování podílu výroby elektrické energie spojeno s vyššími nároky na teplo, určené pro dohřev kondenzátu.

Ohřev kondenzátu na teplotu napájecí vody

Ohřev kondenzátu je simulován smícháním kondenzátu s odběrovou párou (obr. 4.20), regulací průtoku odběru je možno řídit teplotu napájecí vody pro kotel. Proud odběrové páry, která je primárně určena pro ohřev kondenzátu, není jediným teplonosným médie, který kondenzát dohřívá, jak je uvedeno v kapitole 4.5.2.

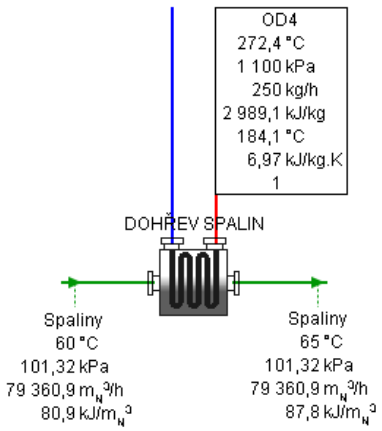


Obr. 4.20 Bilanční uzel ohřevu kondenzátu na teplotu napájecí vody

Číslování kondenzátů je provedeno ve shodě s číslováním parních odběrů, významy jednotlivých proudů jsou shodné. Proud K0 označuje vratný kondenzát z bilančního uzlu rozdělení páry (obr. 4.19).

Ohřev spalin na provozní teplotu zařízení pro čištění spalin

Je realizován obdobně jako předehřev spalovacího vzduchu, tepelným výměníkem. Teplonosným médiem je i v tomto případě odběrová pára (obr. 4.20).



Obr. 4.20 Bilanční uzel ohřevu spalin

Recykl části spalin

Určitý podíl (přibližně 10 až 20 obj.%) spalin (obvykle vyčištěných) se recirkuluje za účelem nahrazení sekundárního vzduchu ve spalovací komoře. Recykl snižuje ztráty tepla akumulované ve spalinách a zvyšuje energetickou účinnost procesu asi o 0,75-2 %. Jsou také známy další přínosy v primární redukci NO_x. [5]

Jednoduchý model spalinového recyklu zahrnuje rozdělovač, kterým se oddělí příslušná část proudu spalin, směšovač, kterým je proud zaveden do termického bloku a model chlazení proudu, kterým jsou simulovány tepelné ztráty na vedení.

Pro hodnocení energetické účinnosti dle metodiky, uvedené v dokumentu o nejlepších dostupných technologiích BREF, je nutné nastavit model na základě ročních průměrných hodnot. Vytvořený model byl použit v případové studii, cílem studie bylo ukázat vliv navyšování podílu kondenzační výroby elektřiny na uvedená kritéria hodnocení efektivity využití odpadů k výrobě energie.

5 PŘÍPADOVÁ STUDIE

Případová studie byla vypracována na základě typické technologie, které se v ČR pro spalování komunálního odpadu užívá (obr. 4.13). Technologie zahrnuje především roštové spalování, parní protitlakou turbinu a kondenzační turbinu. Podíl výroby elektrické a tepelné energie je možno za provozu měnit.

Technologie dosahuje spalovacího výkonu 96kt/rok směsného komunálního odpadu. Z důvodu nižší poptávky po tepelné energii v letních měsících a nutnosti zachovat plný projektovaný spalovací výkon zařízení, byla instalována parní kondenzační turbina, která je schopna využít nízkopotenciální páru, jinak užívanou k exportu do teplárenské sítě. Zařízení je za provozu plně energeticky soběstačné a je schopno dodávky energií do rozvodných sítí. Při nájezdu a odstávkách technologií je naopak nutno importovat energii, potřebnou k zachování legislativních parametrů systému.

Tepelné ztráty aparátů nejsou v modelovém případě předmětné technologie zahrnuty, což žádným způsobem neovlivní metodiku hodnocení. Při praktickém užití je nutno tepelné ztráty aparátů do bilančního modelu doplnit.

5.1.1 Specifikace údajů pro nastavení bilančního modelu

Pokud je bilanční model určen ke stanovení energetické účinnosti dle směrnice 98/2008/EC, je nutné dosazovat údaje na základě ročních průměrných hodnot parametrů procesních proudů.

Primární spalovací vzduch

Hodnota průtoku spalovacího vzduchu se určí na základě přebytku vzduchu, ve spalovací komoře. Nastavením hodnoty přebytku vzduchu je automaticky změněna hodnota průtoku před spalovací komorou. Následně je dopočtena hodnota entalpie vzduchu o zadaných parametrech.

Parametr	Jednotka	Hodnota
teplota	°C	155
tlak	kPa	101,32
Tepelné ztráty výměníků pro ohřev vzduchu	kJ/h	0

Tab. 5.1 Primární spalovací vzduch

Spalování odpadu

Parametry jednotkové operace spalování odpadů tabulka 5.2

Spalovací komora

Parametr	Jednotka	Hodnota
LHV (výhřevnost) odpadu	kJ/kg	10681
Průtok	kg/h	12000
Přebytek vzduchu	[-]	1,1
Tepelné ztráty bloku primárního spalování	kJ/h	0

Tab. 5.2 Parametry spalovacího procesu

Složení uvažovaného paliva uvádí tabulka 5.3.

Složení paliva	Jednotka	Hodnota
Hořlaviny	%	54
H_20	%	15
Popeloviny	%	31

Tab. 5.3 Složení paliva

Složení hořlaviny uvádí tabulka 5.4.

Složení hořlaviny	Jednotka	Hodnota
C	%	59,17
H	%	6,4
N	%	0,8
O	%	31,98
S	%	0,21
Cl	%	1,44

Tab. 5.4 Složení hořlaviny

Bilanční parametry dohořívací komory uvádí tabulka 5.5.

Dohořívací komora

Parametr	Jednotka	Hodnota
Průtok sekundárního vzduchu	m_N^3/h	7500
Teplota sekundárního vzduchu	°C	10
Průtok vzduchu pro hořáky	m_N^3/h	3900
Teplota vzduchu pro hořáky	°C	10
Průtok přisávaného vzduchu	m_N^3/h	4116
Teplota přisávaného vzduchu	°C	10
Tepelné ztráty bloku dohořívací komory	kJ/h	0

Tab. 5.5 Bilanční parametry dohořívací komory

Tlak vzduchu je obvykle atmosferický, v modelu byla použita hodnota tlaku vzduchu za normálních fyzikálních podmínek (101,325kPa, 0°C). Za přesnější je možno považovat průměrnou roční teplotu vzduchu v okolí daného zařízení.

Využití tepla a parametry páry

Parametry napájecí vody a parametry teplonosného média (páry) jsou uvedeny v tabulce 5.6.

Parametry napájecí vody	Jednotka	Hodnota
Teplota	°C	118
Tlak	kPa	4000
Průtok	kg/h	36000
Parametry páry	**Jednotka**	**Hodnota**
Cílová teplota páry v ekonomizéru	°C	191
Cílová teplota páry ve výparníku 1	°C	266
Průtok proudu ve výparníku 1	kg/h	9000
Cílová teplota páry ve výparníku 2	°C	266
Cílová teplota páry v přehříváku	°C	400
Tepelné ztráty bloku výroby páry	kJ/h	0

Tab. 5.6 Parametry napájecí vody a parametry páry

Výroba tepelné a elektrické energie

Technologie je primárně koncipována jako kogenerační. Pára o teplotě 400°C a tlaku 4MPa je dodávána na protitlakou turbinu, kde jsou její parametry sníženy na hodnoty, potřebné pro dodávku páry do teplárenské sítě (1,1MPa). Současně je vyrobena elektrická energie.

Proud nízkotlaké páry je možno libovolně rozdělit na část zajišťující export tepla a část další výroby elektřiny na kondenzační turbině (obr 4.19). Cirkulovaná tepelná energie byla oddělena před tímto aktuálním rozdělením. Elektrická energie je zde zastoupena ve formě energie produkované a dále se dělí na část určenou pro export a část určenou pro vlastní spotřebu v zařízení (cirkulovanou energii). Ve výpočtu jsou rozlišovány provozní stavy na základě poměru rozdělení proudu nízkotlaké páry, určené pro export a cirkulaci energie. Za plně kogenerační je považováno, pokud je 100% nízkotlaké páry určeno pro export tepla, nebo vlastní spotřebu. Procento kogenerace následně, pro potřeby tohoto výpočtu, odpovídá procentu nízkotlaké páry (určené pro export tepla). Parametry protitlaké a kondenzační turbiny udává tabulka 5.7.

Parametry protitlaké turbiny	Jednotka	Hodnota
Výstupní tlak	kPa	1100
Izoentropická účinnost	%	68,45
Elektromechanická účinnost	%	98
Tepelné ztráty	kJ/h	0
Parametry kondenzační turbiny	**Jednotka**	**Hodnota**
Výstupní tlak	kPa	6
Izoentropická účinnost	%	65
Elektromechanická účinnost	%	98
Tepelné ztráty	kJ/h	0

Tab. 5.7 Parametry protitlaké a kondenzační turbiny

Na základě výše uvedených parametrů je bilančním programem W2E dopočten výkon výroby elektrické energie na obou turbinách. Dále je nutno specifikovat odběry páry pro vlastní spotřebu tepla v zařízení (tab. 5.8).

Parametry odběrové páry pro vlastní spotřebu	Jednotka	Hodnota
Tlak páry pro předehřev spalovacího vzduchu (1.stupeň)	kPa	2989,1
Tlak páry pro předehřev spalovacího vzduchu (2.stupeň)	kPa	4000
Tlak páry pro ohřev kondenzátu	kPa	2989,1
Tlak páry pro ohřev spalin	kPa	2989,1

Tab. 5.8 Parametry odběrové páry pro vlastní spotřebu

Poměr výroby elektrické a tepelné energie z nízkotlaké páry

Ve výpočtu budou porovnány účinnosti různých provozních stavů na základě vyčíslení poměru exportu elektrické a tepelné energie. Dělič nízkopotenciální páry bude postupně nastaven od 100% výroby tepla až po výrobu čistě elektrické energie. Krok dělení je stanoven na 10%. Současně je z důvodu nutnosti maření tepla za kondenzační turbinou třeba zvyšovat dohřev napájecí vody na stanovenou teplotu.

Opětovný ohřev spalin

Technologie pro čištění spalin vyžaduje místní snížení teploty a následné dohřátí, pro modelový příklad byly zvoleny hodnoty dle tabulky 5.9.

Opětovný ohřev spalin	Jednotka	Hodnota
Teplota spalin před dohřátím	°C	60
Požadovaná teplota spalin po dohřátí	°C	65

Tab. 5.9 Opětovný ohřev spalin

Recykl spalin

Parametr	Jednotka	Hodnota
Průtok	m_N^3/h	18060

Tab. 5.10 Průtok spalinového recyklu

Na základě popsaných údajů je možno sestavit bilanční model v programu W2E. Některé údaje, jako například spotřeba zemního plynu, souvisí s nestandardními stavy,

proto je nelze modelovat. Tyto hodnoty jsou zadávány přímo ve výpočtu konkrétních energetických vstupů dle navrženého postupu (kapitola 4).

Další parametry výpočtu

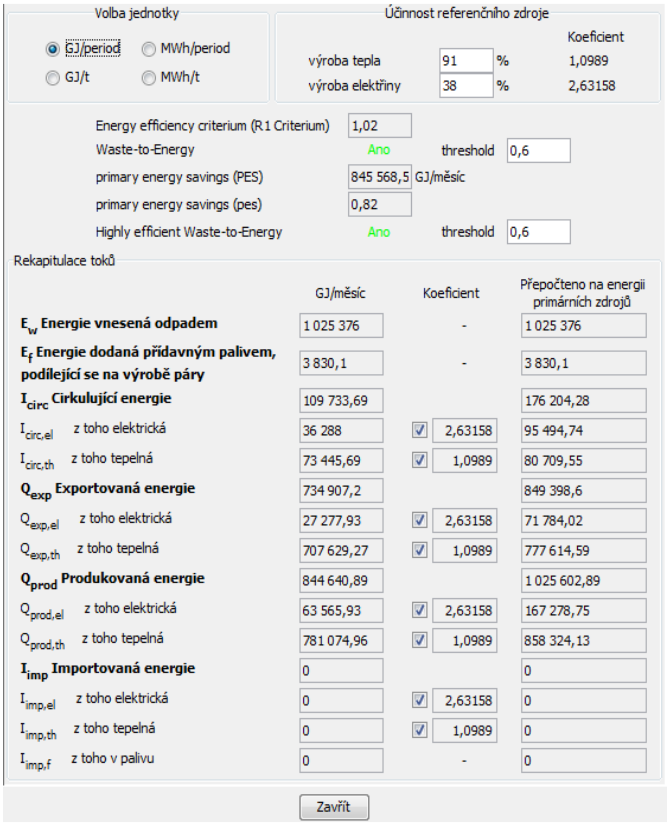
Parametr	Jednotka	Hodnota
Fond pracovní doby	h	8000
Výhřevnost užitého přídavného paliva, E_f	MJ/m_N^3	34
Spotřeba přídavného paliva E_f	m_N^3	112651

Tab. 5.11 Další parametry výpočtu

Kompletní výpočet, zahrnující bilanční modely pro různé provozní stavy z hlediska rozdílného poměru výroby elektrické a tepelné energie, a odpovídající výpočty v programu MS Excel, obsahuje příloha 2 a 3.

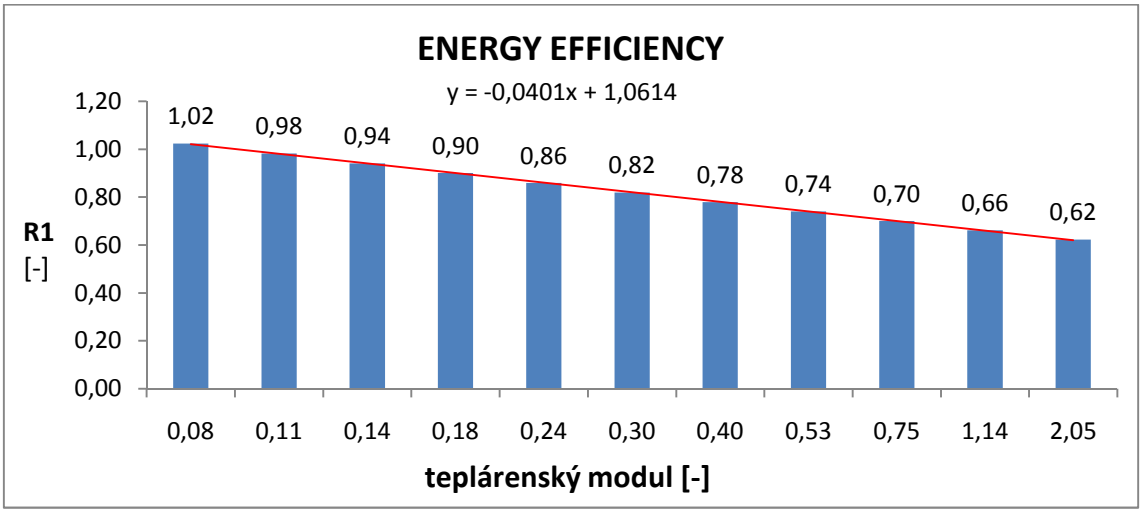
5.1.2 Výsledky výpočtu

Na základě výpočtů bilančního modelu a navrženého výpočtového postupu, byly stanoveny hodnoty energetické účinnosti (R1 kritérium) a některých dalších kritérií, pro různé provozní stavy, které byly definovány pomocí různého teplárenského modulu. Z výsledků vyplývá evidentní zhoršení všech kritérií se vrůstajícím podílem výroby elektrické energie, na úkor výroby tepla. Výsledek je dán obecně malou účinností výroby elektrické energie a nutností maření tepla za kondenzační turbinou, které navíc vyžaduje zvýšení podílu cirkulované tepelné energie. Příklad výsledku hodnocení konkrétního provozního stavu (100% kogenerace) pomocí formuláře hodnocení energetického využití v programu W2E je uveden na obrázku 5.1.



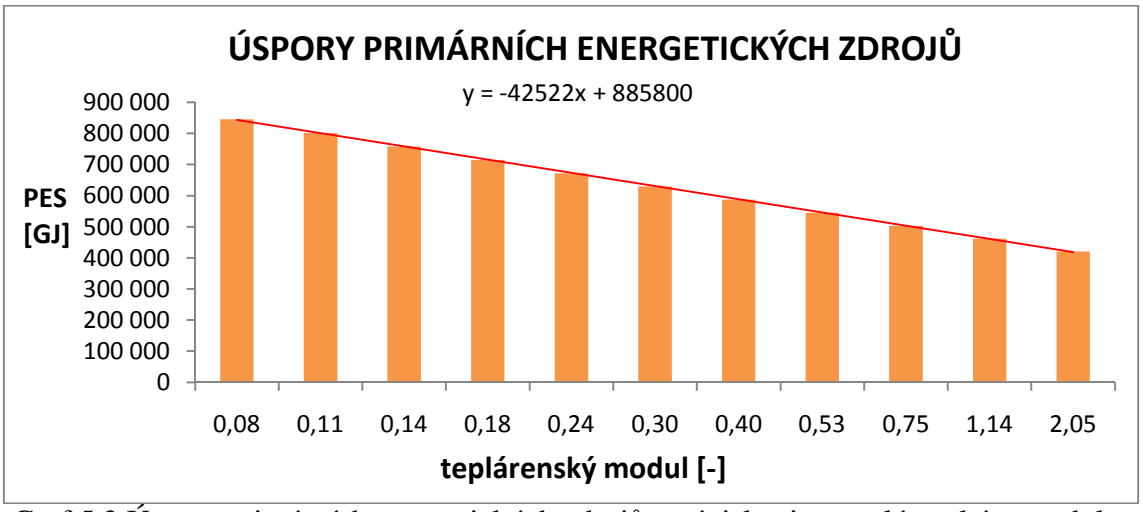
Obr. 5.1 Vyhodnocení energetického využití komunálních odpadů v programu W2E

V grafu 5.1 je možno vidět, že navyšování podílu výroby elektrické energie na úkor energie tepelné je spojeno s podstatným snížením legislativně stěžejního kritéria pro hodnocení zařízení jako energetické využívání.

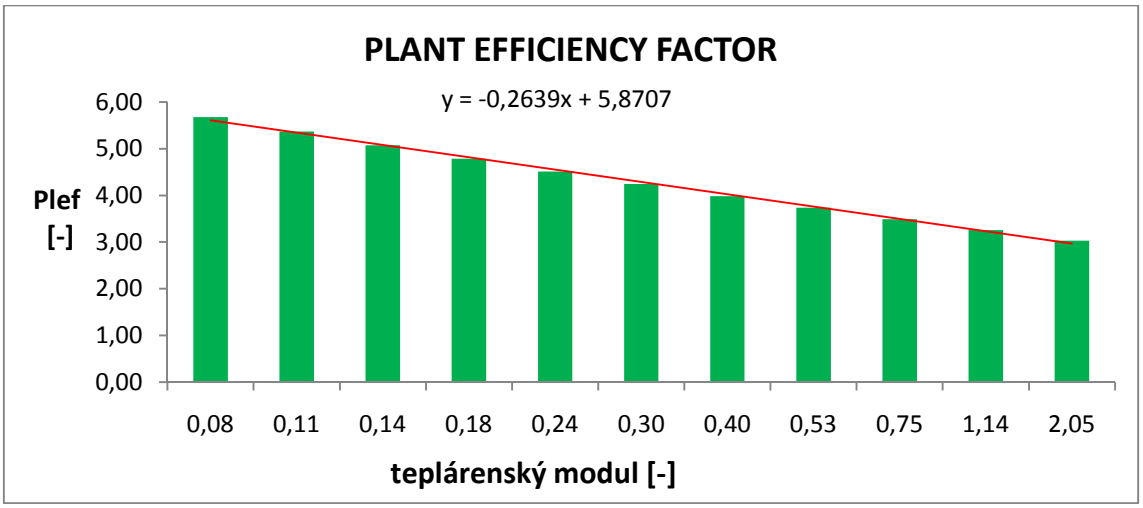


Graf 5.1. Kritérium Energy efficiency (R1) v závislosti na teplárenském modulu

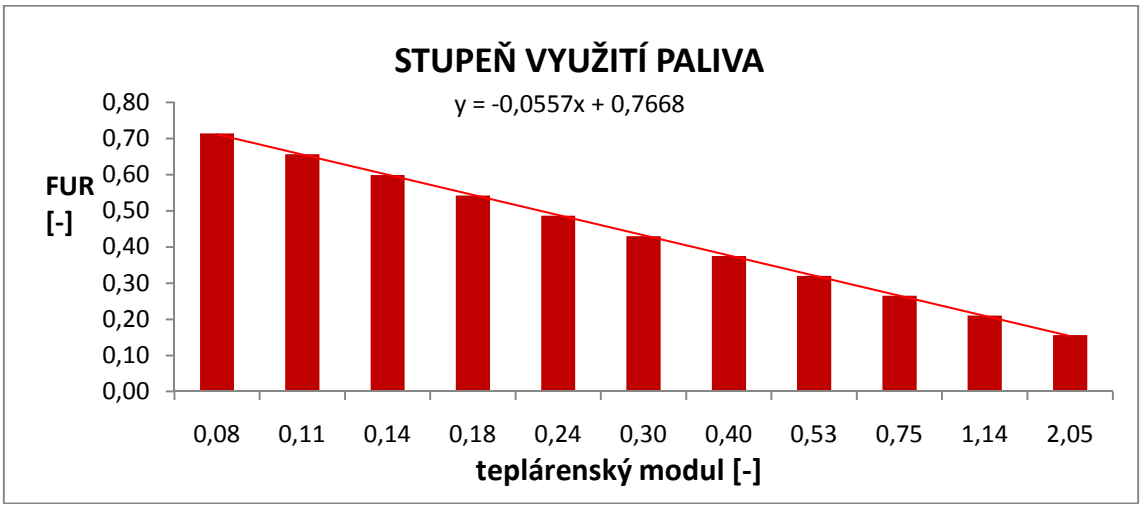
Zhoršení je patrné u všech sledovaných kritérií, jak je možné vidět z grafů 5.2 až 5.4



Graf 5.2 Úspora primárních energetických zdrojů v závislosti na teplárenském modulu



Graf 5.3 Plant Efficiency Factor v závislosti na teplárenském modulu



Graf 5.4 Stupeň využití paliva v závislosti na teplárenském modulu

6 ZÁVĚR

Na základě legislativy platné v Evropské unii byla v práci shrnuta metodika hodnocení zařízení pro spalování tuhých komunálních odpadů jako energetické využívání. Pro vyhodnocení hlavních energetických toků, které do výpočtu kritéria Energy efficiency vstupují, byl vytvořen bilanční model typické technologie. K tomu bylo využito prostředí bilančního software W2E, který se dlouhodobě na Ústavu procesního a ekologického inženýrství FSI VUT Brno vyvíjí. Dále byl navržen výpočtový systém v prostředí MS Excel, který umožňuje vyčíslení různých kritérií, používaných pro hodnocení systému energetického využití odpadů. Následovala softwarová implementace do prostředí W2E, která byla provedena na fakultě informačních technologií VUT Brno. Úkolem autora následně bylo vytvořenou aplikaci otestovat a ověřit její funkčnost na případové studii. Předností vytvořené aplikace je kromě profesionálního vzhledu rovněž přímé napojení na bilanční model.

7 SEZNAM CITACÍ

[1] **Kadrnožka, Jaroslav.** *Energie a globální oteplování.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2006. ISBN 80-214-2919-4.

[2] **Kyoto Protocol To The United Nations FrameworkK** [Online] 1998. http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf.

[3] **Termizo, a.s.** http://www.termizo.cz/indexcz.html. [Online] 3 2010.

[4] **Český statistický úřad** [Online] 2008. http://www.czso.cz/csu/2009edicniplan.nsf/p/2001-09.

[5] **European IPPC Bureau.** *Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration.* [Online] August 2006. ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/wi_bref_0806.pdf.

[6] **Pražské služby.** *Výroční zpráva 2008*. [Online] http://www.psas.cz/index.cfm/info-pro-akcionare/2009/vc3bdroc48dni-zprava-2008/.

[7] **KRANIMEX.** *Projekt rekonstrukce spalovny komunálních odpadů SAKO Brno*. [Online] http://www.kranimex.cz/projekt-rekonstrukce-spalovny-komunalnich-odpadu-SAKO-Brno.

[8] **European Parliament and the Council.** *Directive 98/2008/EC on waste and repealing certain Directives.* Official Journal of the European Union, 2008.

[9] **Eurostat.** Municipal waste by type of treatment. [Online] http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/product_details/dataset?p_product_code=TSIEN130.

[10] **Sdružení provozovatelů technologií pro ekologické využívání odpadů (STEO).** *Směrnice o skládkách odpadů* 31/99/ES. [Online] http://www.odpadjeenergie.cz/legislativa/smernice-o-skladkach-odpadu-31-99-es.aspx.

[11] **European Commission.** *Directive 99/31/EC on the landfill of waste.* Official Journal of the European Union, 1999.

[12] **Česká informační agentura životního prostředí (CENIA).** *Informační systém odpadového hospodářství.* [Online] http://isoh.cenia.cz/groupisoh/.

[13] **Ministerstvo životního prostředí ČR.** *Plán odpadového hospodářství ČR*. [Online] 2003. http://www.mzp.cz/www/zamest.nsf/0/2c7cb0f9ea5981ffc1256b3c0048ada9/$FILE/POH%20CR_kompletni%20dokument.pdf.

[14] **Bébar, Ladislav, Pavlas, Martin a Stehlík, Petr.** *Význam energetického využití směsných komunálních odpadů.*Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, Brno, 2006.

[15] **Sbírka zákonů**, *Zákon 185/2001 o odpadech.* 2001.

[16] **European Parliament and the Council.** *Regulation (EC) No 1013/2006 on Shipments of Waste.* Official Journal of the European Union, 2006.

[17] **European Parliament and the Council**. *Directive 2000/76/EC on the incineration of waste.* Official Jurnal of European Communities, 2000.

[18] **Bébar, Ladislav.** *Inovační prvky v oblasti termického zpracování odpadů.* Habilitační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrstvím, Ústav procesního a ekologického inženýrství, Brno, 2003

[19] **Reimann D.O.** *CEWEP Energy Report (Status 2001-2004) Result of specific Data for Energy, Efficiency Rates and coefficients, Plant Efficiency Facotrs and NCV of 97 Waste To Energy Plants and determination of the Main Energy Results.* Bamberg , 2006.

[20] **Pavlas, Martin.** *Systém pro výpočet technologických parametrů procesů včetně energetických aspektů. Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,* Ústav procesního a ekologického inženýrství, *Brno, 2008*.

[21] **Komise evropských společenství.** *Rozhodnutí stanovující podrobné pokyny pro proovádění a uplatňování přílohy II směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/8/ES,* Úřední věstník Evropské unie, 2004.

[22] **European Pariliament and the Council.** *Directice 2004/8/EC on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market.* místo neznámé : Official Jurnal of the European Union, 2004.

[23] **Confederation of European Waste to Energy Plants.** [Online] http://www.cewep.com/home/about/cewep/index.html.

[24] **ECJ judgement "C-458/00".** *par. 32-34 in the Case Commision of the European Communities v. Grand Duchy of Luxembourg,* 13.2.2003.

[25] **Confederation of the European Waste to Energy Plants.** *Discussion paper on criteria for energy reovery in waste to energy plants.* Brusels, 2004.

[26] **Bébar, Ladislav, Puchýř, Radim a Stehlík, Petr.** *Hodnocení energetického využití odpadů ve spalovně komunálního odpadu Termizo, a.s. Liberec.* Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, Brno, 2005.

[27] **Pavlas, Martin.** *Výpočtový systém pro analýzu využití energie u technologických linek.* [Diplomová práce] Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2004.

8 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Označení	Význam hlavních symbolů	Jednotka
c_f	Výhřevnost přídavného paliva pro výrobu páry	GJ/t
$c_{st\ x}$	Čistá entalpie páry	GJ/t
E_{ab}	Absolutní jednotky	MWh, GJ
E_{ek}	Ekvivalentní jednotky	MWh, GJ
E_f	Importovaná energie podílející se na výrobě páry	MWh, GJ
E_w	Energie dodaná odpadem	MWh, GJ
f_B	Koeficient zohledňující tepelné ztráty	-
F_{PD}	Fond pracovní doby	h
FUR	Stupeň využití paliva	-
$H_{h\ in/out}$	Absolutní entalpie horkého proudu na vstupu/výstupu	MWh, GJ
$H_{c\ in/out}$	Absolutní entalpie chladného proudu na vstupu/výstupu	MWh, GJ
h_x	Měrná entalpie proudu x	GJ/kg
$I_{circ\ (th/el)}$	Cirkulovaná energie (tepelná/elektrická)	GJ/MWh
$I_{imp\ (th/el)}$	Importovaná energie bez podílu na výrobě páry (tepelná/elektrická)	GJ/MWh
$I_{imp\ el\ m}$	Naměřená hodnota importované elektrické energie u stávajícího zařízení	GJ/MWh
$i_{imp\ el}$	Měrná referenční spotřeba elektrické energie pro stanovení importu	GJ/kg
k	Koeficient přepočtu na ekvivalentní jednotky	-
LHV	Výhřevnost odpadu	GJ/t
m	Hmotnost spáleného odpadu	t, kg
$\dot{m}_x$	Hmotnostní tok produ x	t/h, kg/h
m_f	Množství přídavného paliva pro výrobu páry	t/rok
$m_{st\ x}$	Celkové množství vyrobené páry	t/rok
PE^{CHP}	Primární energie při kogenerační výrobě	MWh, GJ
PE_{el}^{ref}	Primární energie v referenčním zdroji elektrické energie	MWh, GJ
PE_{th}^{ref}	Primární energie v referenčním zdroji tepelné energie	MWh, GJ
PES	Absolutní úspora primárních energetických zdrojů	MWh, GJ
pes	Měrná úspora primárních energetických zdrojů	%
Pl_{ef}	Plant efficiency factor	-
$Q_{exp\ (th/el)}$	Exportovaná energie (tepelná/elektrická)	MWh, GJ
$Q_{prod\ (th/el)}$	Produkovaná energie (tepelná/elektrická)	MWh, GJ
R_{sk}	Roční spotřeba kapalného paliva	kg
R_{sp}	Roční spotřeba plynného paliva	m_N^3
T_b	Teplota spalin za kotlem (při 4-12% O_2)	°C
V_k	Výhřevnost kapalného odpadu	MJ/kg
V_p	Výhřevnost plynného paliva	MJ/m_N^3

η	Kritérium energy utilization rate	-
η_B	Účinnost tepelné výměny	-
η_e	Kritérium energy efficiency (R1)	-
η_{el}^{CHP}	Účinnost kogenerační výroby elektřiny	-
η_{th}^{CHP}	Účinnost kogenerační výroby tepla	-
η_{tot}^{CHP}	Celková termická účinnost kogenerační výroby	-
η_{el}^{ref}	Účinnost výroby elektřiny v referenčním zařízení	-
η_{th}^{ref}	Účinnost výroby telpa v referenčním zařízení	-

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

zkratka	**význam**
BAT	Nejlepší dostupné technologie
BREF	Dokument o nejlepších dostupných technologiích
BRKO	Biologicky rozložitelný komunální odpad
CEWEP	Sdružení evropských spaloven odpadů
EVO	Energetické využívání odpadů
ISOH	Informační systém odpadového hospodářství
PEZ	Primární energetické zdroje
TKO	Tuhý komunální odpad
TZO	Tepelné zpracování odpadu

10 SEZNAM PŘÍLOH

1. Manuál softwarové aplikace
2. Výpočtové modely stanovení rozhodných koeficientů hodnocení MS Excel
3. Bilanční modely jednotlivých provozních stavů W2E