



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ JAKO KLÍČOVÝ
PRVEK EFEKTIVNÍCH SYSTÉMŮ ODPADOVÉHO
HOSPODÁŘSTVÍ**

EFFECTIVE UTILIZATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE IN HEAT AND POWER SYSTEMS

ZKRÁCENÁ VERZE PhD Thesis

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ondřej Putna

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.

KLÍČOVÁ SLOVA

Energetické využití odpadů, technicko-ekonomický model, optimalizační nástroj
NERUDA, centrální zásobování teplem

KEY WORDS

Waste-to-energy, technical-economic model, NERUDA optimization tool, district
heating

MÍSTO ULOŽENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

© Ondřej Putna, 2020

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě
strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení
oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

OBSAH

Úvod	4
1	Legislativní rámec 5
2	Produkce spalitelných odpadů 6
3	Centrální zásobování teplem a význam pro udržitelnost projektů EVO.... 6
4	Dizertační práce v kontextu komplexních optimalizačních nástrojů..... 7
4.1	Optimalizační nástroj <i>NERUDA</i> 7
4.2	Cíle dizertační práce..... 8
5	Technologie energetického využití odpadů 10
5.1	Ekonomika <i>ZEVO</i> 10
6	Sítě <i>CZT</i> na území ČR..... 13
7	Dílčí technicko-ekonomické modely 14
7.1	Nerovnoměrnost dodávky tepla 14
7.2	Akumulace tepla..... 18
8	Komplexní úloha modelování synergie zařízení EVO a dalších zdrojů tepla 21
8.1	Náhrada původního tepelného zdroje souborem <i>ZEVO A</i> plynová kotelna.... 22
8.2	Začlenění <i>ZEVO</i> do sítě <i>CZT</i> k existujícímu tepelnému zdroji 24
8.2.1	Stanovení ceny tepla a nalezení optimálního režimu provozu v konkrétní lokalitě 26
8.3	Úspora CO_2 vlivem náhrady tepla v <i>CZT</i> ze <i>ZEVO</i> 27
9	Shrnutí..... 29
	Seznam použité literatury 32
	Publikační činnost..... 35
	Abstrakt 37
	Abstract..... 37

ÚVOD

Směrnicí Evropského parlamentu a Rady č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 [1] byla stanovena hierarchie nakládání s odpady, která řadí materiálové využití (recyklaci) před využití energetické a skládkování považuje za nejhorší způsob nakládání. Materiálové využití je často nákladné a nelze ho použít pro všechny druhy odpadu [2]. V souvislosti s balíčkem oběhového hospodářství (tzv. „circular economy package“), který byl přijat EU v roce 2018 [3], byly zavedeny nové cíle pro nakládání s KO. V roce 2035 by mělo být skládkováno pouze 10 % KO a recyklováno alespoň 65 % KO a obalových materiálů. Při dotřídování KO z odděleného sběru, jako jsou zejména plasty, zákonitě vzniká velké množství sekundárního odpadu, který není technicky nebo ekonomicky možné materiálově využít. Energetické využití odpadů (EVO) tím pádem plní důležitou úlohu i při plánované vysoké míře separace. Jak vyplývá z předchozího textu, v souvislosti s EVO se za odpady vhodné pro tento druh zpracování považují právě KO, tedy odpady skupiny 20 dle katalogu odpadů (viz kap. 1). Legislativou je KO definován jako „veškerý odpad vznikající při činnosti fyzických osob (domácností) na území obce“. Největší podíl (cca 60 % hm. KO) představuje směsný komunální odpad (SKO), což je zbytková složka, kterou není možné v dnešní době efektivně třídit a materiálově využít.

Snahou předkládané práce je přispět k posouzení potenciálu ZEVO na území ČR zejména z pohledu technicko-ekonomického (T-E) hodnocení těchto projektů. Důraz je přitom kladen na specifické podmínky v jednotlivých lokalitách z pohledu uplatnění vyrobené energie, což je jedna z legislativních podmínek, a zároveň i klíčový faktor ekonomické udržitelnosti (viz kap. 5.1). K tomuto účelu byla vytvořena řada matematických modelů, které jsou postupně popsány v kap. 7.

Hlavní přínos autora spočívá ve vytvoření metodiky pro hodnocení investičních záměrů v rámci teplotních sítí. Důraz byl v tomto případě kladen na integraci ZEVO, ale prezentovaný přístup (viz kap. 8.2) je využitelný i na další strategické změny týkající se konfigurace sítí CZT. Tato metodika a data nashromážděná během studia byla autorem dále využita k sestavení optimalizačního matematického modelu, který je blíže popsán v kap. 8. Tento model byl průběžně zdokonalován a využíván při řešení reálných úkolů pro průmyslové subjekty Příklady provedených praktických aplikací jsou:

1. Ekonomické posouzení projektů ZEVO s ohledem na parametry všech zdrojů dodávajících teplo do sítě CZT.
2. Odhad akceptovatelné ceny tepla ze ZEVO (viz kap. 8.2)
3. Multikriteriální hodnocení projektů ZEVO z ekonomického a zároveň environmentálního hlediska (viz kap. 8.3).
4. Vyhodnocení integrace dalších technologických celků, jako jsou např. kogenerační jednotky, parní turbína nebo biomasový kotel.
5. Doporučení vhodné strategie při plánované změně palivové základny.
6. Analýza citlivosti energetických zdrojů na neurčité parametry, jako jsou budoucí změny v cenách emisních povolenek a dalších legislativních nástrojů.
7. Návrh optimální strategie provozování komplexních teplotních sítí.

Další klíčovou oblastí využití vytvořených matematických modelů je generování vstupních dat pro komplexní logistickou úlohu optimalizace toku odpadu na vymezeném území, což je blíže popsáno v kap. 4.1.

V kap. 1 je představeno legislativní pozadí řešené problematiky. V kap. 2 a je popsán současný stav OH v ČR v souvislosti s EVO. Kap. 3 shrnuje problematiku CZT a jeho význam pro udržitelnost projektů EVO. Přínosy dizertační práce v kontextu komplexních optimalizačních nástrojů vyvíjených na ÚPI jsou představeny v kap. 4. Následuje uvedení do problematiky teplárenství v kontextu dodávky tepla ze ZEVO a popis uvažovaných technologií EVO (kap. 5). V kap. 6 je popsána rešeršní část práce v podobě analýzy teplárenských sítí na území ČR. Dále už jsou popsány praktické výstupy v podobě dílčích T-E modelů (kap. 7), jejichž tvorba vyústila v komplexní úlohu integrace ZEVO do existující sítě CZT s dalšími tepelnými zdroji (kap. 8).

1 LEGISLATIVNÍ RÁMEC

Následuje stručný souhrn legislativy, která se týká problematiky dizertační práce. Podrobnější obsah jednotlivých směrnic, zákonů a vyhlášek je uveden v plné verzi práce.

Směrnice Evropského parlamentu a rady 1999/31/ES o skládkách odpadů definuje je požadavek na omezení skládkování biologicky rozložitelných komunálních odpadů (BRKO). **Směrnice evropského parlamentu a rady 2008/98/ES** o odpadech a o zrušení některých směrnic obsahuje hierarchii nakládání s odpady zmíněnou v úvodu a dále požadavek na dosažení minimální energetické účinnosti. **Směrnice Evropského parlamentu a rady 2000/76/ES** o spalování odpadů stanovuje podmínky pro EVO a spoluspalování odpadů. **Balíček oběhového hospodářství („Circular Economy Package“)** je soubor směrnic vydaný v roce 2018, který je v kontextu KO reprezentován zejména třemi dokumenty. Klíčové body spočívají zejména v požadavcích na snížení skládkování a zvýšení recyklace KO.

Nařízení vlády č. 352/2014 Sb. o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015–2024 implementuje do české legislativy směrnici EU 1999/31/ES. **Vyhláška č. 415/2012 Sb.** o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně vychází ze směrnice EU 2000/76/ES a určuje emisní limity pro spalování odpadu. **Zákon č. 201/2012 Sb.** o ochraně ovzduší souvisí s vyhláškou č. 415/2012 Sb. a stanovuje podmínky termického využívání odpadů. **Zákon č. 100/2001 Sb.** definuje pravidla posuzování vlivů na životní prostředí, anglicky „*Environmental Impact Assessment*“ (EIA). **Vyhláška 93/2016 Sb.** obsahuje tzv. katalog odpadů. **Zákon č. 185/2001 Sb.** o odpadech vymezuje základní pojmy a definice týkající se odpadů a požadavky na nakládání s nimi. Na základě tohoto zákona jsou získávány informace o produkci a nakládání s jednotlivými kódy odpadu dle katalogu odpadů. Z **plánu odpadového hospodářství (POH) ČR na období 2015 až 2024** vyplývá, že klíčový typ odpadu, který bude zcela zásadním způsobem dotčen

platností legislativy po roce 2024/2030¹ (v kontextu zákazu skládkování využitelných odpadů), je SKO. V kontextu celé ČR je v současné době SKO dominantně skládkován (73 %), přičemž výsledky vylepšují regiony, kde jsou provozována současná ZEVO (Praha, Brno, Liberec, Chotíkov). V ostatních krajích je procento využití (energetického nebo materiálového) v zásadě nulové.

Evropská směrnice 1999/31/ES o skládkách odpadů je předpisem, který pro členské státy udává povinnost omezit skládkování BRKO ve srovnání se skládkovaným množstvím v roce 1995, a to, mimo jiné, na 35 % do 15 let ode dne účinnosti příslušného právního předpisu zajišťujícího dosažení souladu s touto směrnicí.

2 PRODUKCE SPALITELNÝCH ODPADŮ

Pro plánování projektů EVO je klíčové znát množství spalitelných odpadů na určitém území, které lze energeticky využít. Protože u projektů EVO je nutné počítat s relativně dlouhou přípravnou fází a dále s životností zařízení zpravidla přes 20 let, je důležité co nejpřesněji odhadnout produkci těchto odpadů do budoucna. Autor práce se podílel na vývoji metodiky pro určení potenciálu produkce odpadů v budoucnu vhodných pro EVO.

Na základě informací z existujících ZEVO v ČR bylo vytipováno celkem 47 kódů spalitelných odpadů, které jsou nezanedbatelné z hlediska množství. Způsob jejich výběru je popsán v dokumentu [4]. V roce 2015 bylo dle systému VISOH vyprodukováno asi 7 milionů tun těchto odpadů. Většinu energeticky využitelných odpadů zaujímá SKO (62 %). Dále lze zmínit např. objemný odpad (OO) a odpady skupin 2, 15 a 19 dle katalogu odpadů (viz kap. 1). Celý výčet odpadů uvažovaných pro EVO je včetně jejich produkce a způsobu nakládání v roce 2015 uveden v Příloze 1 plné verze práce. Při posuzování projektů EVO jsou zpravidla uvažovány zejména SKO a OO. Přestože z hlediska vyprodukovaného množství jsou důležité i jiné potenciálně spalitelné odpady, často pro ně existuje jiné vhodnější využití.

Na pracovišti ÚPI byl s využitím nástroje JUSTINE [5] proveden odhad současného potenciálu odpadu vhodného pro EVO. Byl uvažován předpoklad, že je upřednostněn vhodnější způsob nakládání dle hierarchie nakládání s odpady (viz kap. 1). Využitá metodika je podrobněji popsána v [6]. V dalším kroku byla provedena prognóza produkce těchto odpadů s výhledem do roku 2024. Předpokladem bylo mírné zvyšování míry separace a materiálového využití vyřaditelných složek KO a s tím související snižování množství zbytkového SKO. Je předpokládáno, že v roce 2024 bude činit produkce SKO 1 937 kt a produkce OO 456 kt.

3 CENTRÁLNÍ ZÁSOBOVÁNÍ TEPLEM A VÝZNAM PRO UDRŽITELNOST PROJEKTŮ EVO

Pro ekonomiku záměrů EVO je klíčový výnos z prodeje tepla. Tento fakt platí zejména pro zařízení nižších kapacit, kde lze z důvodu nízkých parametrů páry a účinnosti turbíny

¹ V současné době (05/2020) je v souvislosti s připravovanou novelou zákona o odpadech diskutována varianta odkladu zákazu skládkování využitelných odpadů na rok 2030

očekávat pouze zanedbatelné příjmy z prodeje elektřiny (technologické odlišnosti v závislosti na kapacitě budou popsány v kap. 5). Pro plánování projektu EVO je tedy důležité co nejpřesněji odhadnout, jakým způsobem a za jakou cenu bude možné teplo do sítě CZT dodávat.

Na území ČR existuje ve srovnání s převážnou částí EU historicky velké množství sítí CZT. Systémy CZT jsou ve srovnání s decentralizovanou výrobou tepla výhodné z několika důvodů [7].

Možná nejvýznamnějším přínosem je možnost výroby dálkového tepla kombinovaným způsobem s elektřinou, tedy kogenerační výrobou v teplárnách nebo elektrárnách. Touto cestou jsou v ČR vyráběny téměř 2/3 dálkového tepla [8]. Zdroj [9] uvádí, že využitím kogenerace dochází v Evropě k úspoře asi 15 % skleníkových plynů ve srovnání se stavem, kdy by bylo veškeré teplo a elektřina vyráběny odděleně.

Protože s velikostí zdroje zpravidla roste účinnost energetických přeměn, dochází u centralizované výroby tepla i tímto způsobem k určitým úsporám primárních paliv. Další výhodou je možnost využití různých druhů paliv (včetně obnovitelných zdrojů nebo právě např. odpadů), což u lokálního vytápění není možné. Podstatným přínosem je zejména v dnešní době nulová náročnost obsluhy pro koncové odběratele tepla. U kapalných a pevných paliv lze také očekávat nižší znečištění na jednotku vyrobeného tepla díky více či méně sofistikovaným systémům čištění spalin a rovněž díky vyšším teplotám spalování, kterých není možné v lokálních topeništích dosáhnout.

Nevýhodou jsou vyšší tepelné ztráty při přenosu a distribuci tepla, menší možnosti regulace a investiční náročnost v souvislosti s konkrétními podmínkami. Pokud je teplo do sítí CZT dodáváno z elektráren transformovaných na teplárny, což je v ČR relativně častý jev, bývají tyto zdroje pouze pro účely dodávky tepla někdy předdimenzované. Při poklesu cen silové elektřiny a její někdy pouze vynucené výrobě se tento fakt negativně projeví na ekonomice.

4 DIZERTAČNÍ PRÁCE V KONTEXTU KOMPLEXNÍCH OPTIMALIZAČNÍCH NÁSTROJŮ

V předchozím textu byl shrnut současný stav EVO v ČR a představen související legislativní rámec. Aby bylo možné dostatečně vysvětlit přínos problematiky řešené v dizertační práci, je nutné nejprve krátce představit komplexní optimalizační systém NERUDA, který byl vytvořen a je průběžně zdokonalován na pracovišti ÚPI v Sekci energetických systémů a simulačních výpočtů. V následující podkapitole je popsán princip tohoto nástroje a jeho struktura. V kap. 4.2 je pak vysvětlen přínos práce autora v kontextu jednotlivých modulů nástroje NERUDA.

4.1 OPTIMALIZAČNÍ NÁSTROJ NERUDA

Jedná se o logistickou úlohu pro optimalizaci toku odpadu na vymezeném území implementovanou v prostředí GAMS [10]. Protože mezi producenty odpadu, jeho přepravci a zpracovateli včetně zpracovatelů koncových produktů (struska, kompost, kaly atd.) existují složité vazby, je nutné tyto interakce respektovat a není možné posuzovat

jednotlivé uzly odděleně. Pro odhad ekonomiky konkrétního zařízení je například nutné znát cenu za zpracování odpadu, která však bude závislá na existenci konkurenčních zařízení v okolí, která se ovlivňují navzájem.

Producent odpadu, typicky obec, se rozhoduje, jakým způsobem naloží se svým odpadem, přičemž kritériem jsou minimální náklady, které jsou dány cenou na bráně zpracovatelského zařízení a náklady na dopravu. Řešené území, v tomto případě ČR, je rozděleno na jednotlivé uzly, např. území obcí s rozšířenou působností (ORP). Každému uzlu je přiřazena produkce odpadu a případně informace, zda má být uvažován jako potenciální lokalita pro výstavbu zařízení na zpracování odpadu, což může být v případě KO ZEVO, zařízení mechanicko-biologické úpravy (MBÚ), skládka, monoblok ke spalování tuhých alternativních paliv (TAP) nebo úprava teplotěnských fluidních kotlů pro spoluspalování TAP. Existující zařízení na území ČR nebo v příhraničních oblastech jsou do modelu zahrnuta. Každému potenciálnímu zařízení jsou přiřazeny určité parametry, zejména pak závislost požadované ceny na bráně na zpracovatelské kapacitě.

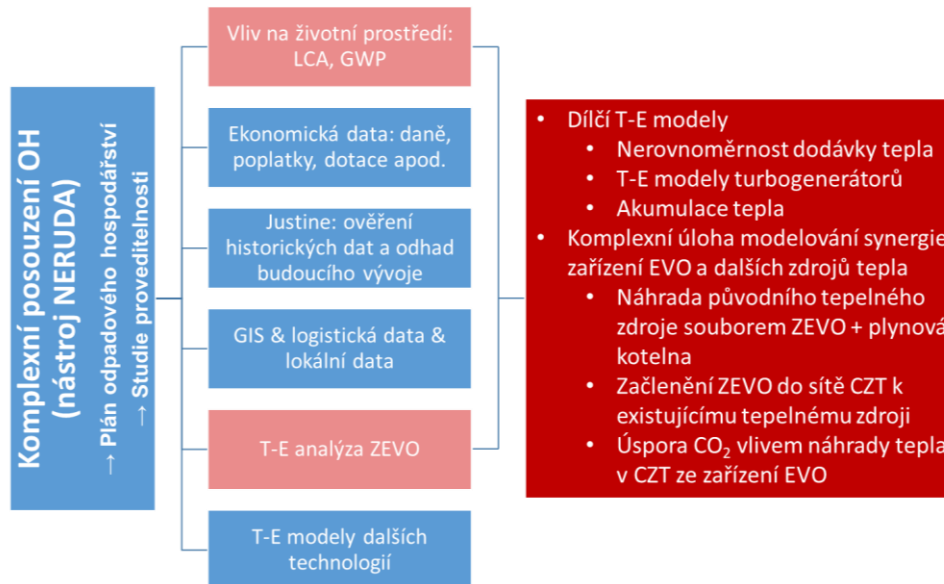
Nástroj využívá stochastického přístupu a pracuje tedy s neurčitými vstupními parametry, které jsou generovány z intervalu. Jedná se např. o cenu na bráně ZEVO, kde je neurčitost dána zejména uvažovaným rozsahem požadovaného vnitřního výnosového procenta – „*internal rate of return*“ (IRR) (viz kap. 5.1) nebo právě cenou prodaného tepla. Následně proběhne velké množství optimalizačních výpočtů (řádově tisíce). Při každém z nich je pro aktuální soubor náhodně generovaných vstupních parametrů a aktuální scénář (např. výše skládkovacího poplatku) nalezen ekonomicky optimální stav, při kterém dojde ke splnění okrajových podmínek (zpracování veškerého vyprodukovaného odpadu, naplnění kapacit apod.). Vzhledem ke stochastickému přístupu jsou výsledkem pravděpodobnosti, s kterými nastane určitý stav, např. bude výhodná realizace ZEVO s určitou kapacitou v určité lokalitě nebo určitá obec dosáhne určité ceny za zpracování odpadu. O ekonomice jednotek EVO pojednává kap. 5.1. V práci [11] je vysvětleno celkové pozadí hodnocení investic do OH s pomocí nástrojů využívajících stochastické programování.

V poslední době je do nástroje NERUDA zahrnuto také environmentální hledisko v podobě bilance skleníkových plynů v souvislosti s transportem a zpracováním odpadů. V závislosti na aktuálním nastavení modelu a různých okrajových podmínkách je možné řešit úlohy s rozdílným cílem. Podrobnější popis a využití nástroje NERUDA je možné nalézt např. v [12] nebo [13]. Nástroj NERUDA je využitelný pro provozovatele nebo potenciální investory nových zařízení, kterým pomůže při rozhodování o vhodných parametrech nebo způsobu provozování.

4.2 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

V souvislosti s předpokládaným zákazem skládkování do roku 2024/2030¹ (viz kap. 1) hrozí, že pokud nedojde k výstavbě dostatečných kapacit EVO v ČR, bude ve velké míře docházet právě k přepravě energeticky využitelného odpadu z ČR, což s sebou ponese značné ekonomické ztráty. Dizertační práce se svým způsobem snaží přispět k možnostem jeho efektivního využití v ČR, což s sebou ve výsledku nese ekonomické i environmentální výhody.

Hlavním cílem práce bylo vytváření T-E modelů s využitím optimalizace, které jsou dále využitelné pro komplexní hodnocení OH prostřednictvím nástroje NERUDA. Jednotlivé moduly nástroje NERUDA jsou znázorněny na obr. 1. Červeně jsou pak zvýrazněny oblasti, kterými se zabývá autor práce.



Obr. 1 Cíle dizertační práce v kontextu komplexních optimalizačních nástrojů

Jak je patrné, cíle práce jsou spjaty zejména se dvěma vzájemně souvisejícími oblastmi. Jednou z nich je zpřesňování ekonomických modelů ZEVO jakožto klíčových zařízení pro zpracování spalitelných odpadů. Díky podrobné analýze využitelnosti vyrobeného tepla je možné přesněji odhadnout akceptovatelnou cenu na bráně a v konečném důsledku tak i zpřesnit výpočet nástrojem NERUDA. K tomuto účelu byl vytvořen optimalizační matematický model synergie ZEVO s dalšími tepelnými zdroji, který je popsán v kap. 8. Částečně je zvýrazněna i oblast „T-E analýza ZEVO“ kam spadá implementace díličích matematických modelů do T-E modelu ZEVO primárně vytvořeném v rámci práce [14]. Kromě toho se autor podílel i na zdokonalování tohoto modelu.

Druhou oblastí je potom vliv náhrady dálkového tepla z fosilních zdrojů teplem ze ZEVO na emise skleníkových plynů hodnocené měřítkem potenciálu globálního oteplování – „global warming potential“ (GWP), kterým se zabývá kap. 8.3. Jedná se o rozšíření optimalizačního modelu o další kritérium, kterým je vedle ekonomiky také minimalizace produkce skleníkových plynů.

V následujících kapitolách jsou blíže popsány jednotlivé body, které byly řešeny v rámci dizertační práce. V kap. 5 je popsána technologie ZEVO uvažovaná ve vytvořených T-E modelech. Ačkoliv má kapitola zejména rešeršní charakter, praktický přínos autora zde spočíval ve zdokonalení T-E modelu ZEVO s důrazem na analýzu investičních nákladů, jak je v kapitole blíže popsáno.

V kap. 6 je shrnuta provedená analýza sítí CZT na území ČR. Ta byla důležitá zejména pro praktickou využitelnost modelů v optimalizačním nástroji NERUDA, kde je nutné zohlednit místní podmínky ve všech lokalitách, kde se uvažuje s potenciální výstavbou

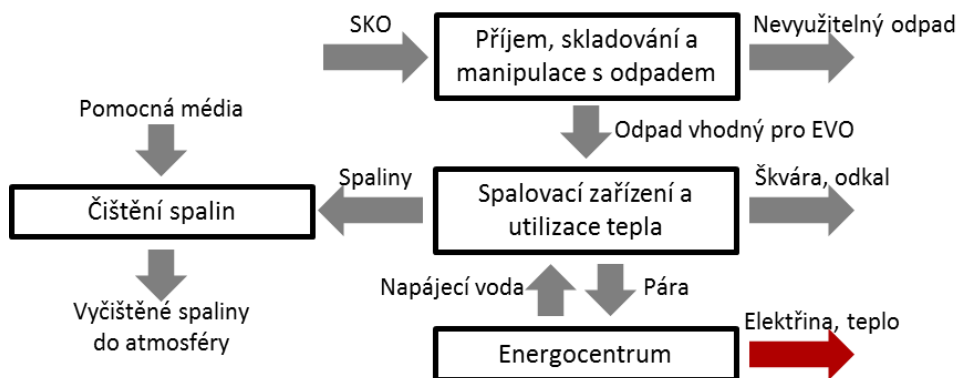
ZEVO. Kap. 7 obsahuje výčet dílčích modelů, které byly následně využity v komplexním výpočtovém modelu synergie ZEVO s dalšími zdroji tepla popsáném v kap. 8, který představuje klíčovou část práce.

5 TECHNOLOGIE ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ ODPADŮ

V této kapitole jsou vysvětleny základní pojmy týkající se EVO a popsány obecné principy technologie ZEVO s ohledem na vyvedení a potenciální dodávku tepla. Znalost principů výroby energie a příslušných technologických limitů těchto zařízení je důležité pro pochopení významu řešené problematiky.

Pokud jde o EVO, v rámci dizertační práce jsou uvažovány pouze technologie využívající spalování neupraveného odpadu na roštu, tedy s přímou reakcí hořlaviny v odpadu za přebytku spalovacího vzduchu, tedy $\alpha > 1$, což je ve srovnání s pyrolýzou nebo zplyňováním jediná prověřená a spolehlivě fungující technologie pro termické využívání SKO. Zmíněné alternativy technologie EVO byly popsány v rámci dokumentu [15], který byl zpracován na pracovišti ÚPI ve spolupráci se společností Ernst & Young pro MŽP². Hlavní energetické proudy a účinnost ZEVO v EU sumarizuje dokument [16].

Přestože se mezi jednotlivými projekty vyskytují určité odlišnosti, základní koncepce je v drtivé většině případů stejná. Celou technologii je možné rozdělit do několika technologických celků, viz obr. 2. Export energie, stěžejní pro problematiku řešenou v dizertační práci, je zvýrazněn. Uvažovaná technologie ZEVO je detailně popsána v plné verzi práce.



Obr. 2 Schéma technologie EVO se zvýrazněným exportem vyrobené energie

5.1 EKONOMIKA ZEVO

Při plánování projektu EVO a vyhodnocení jeho ekonomiky hraje kromě obecně platných pravidel důležitou roli několik hlavních faktorů závislých na konkrétní posuzované lokalitě. Mezi ně patří zejména vlastnosti spalovaného odpadu, odbyt a cena vyrobeného

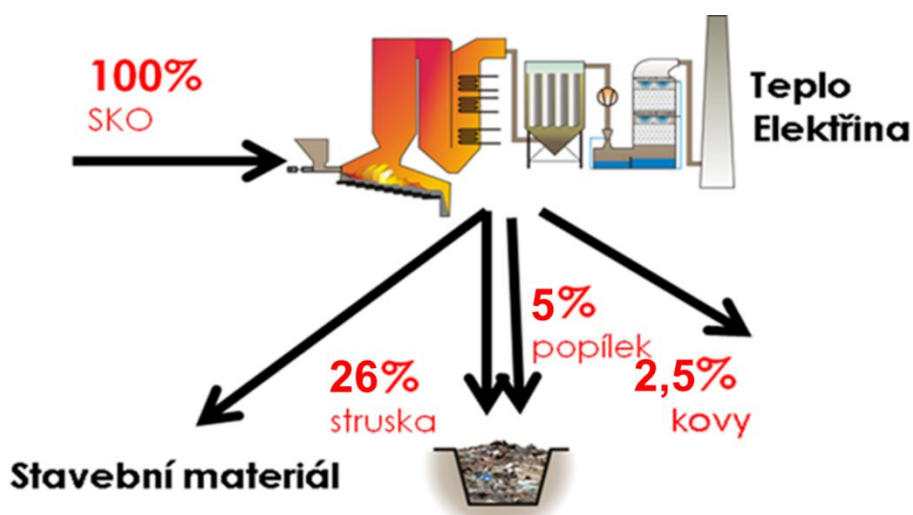
² Příprava podkladů pro oblast podpory odpadového hospodářství 2014-2024

tepla a možnosti synergie, tedy potenciální investiční nebo provozní úspory např. vlivem sdílení stavebních objektů nebo zaměstnanců dalšího tepelného zdroje. V rámci práce byly tyto faktory vyhodnoceny a použity jako vstupy do T-E modelů, jejichž hlavním výstupem bylo určení minimální ceny za zpracování odpadu nutné pro zajištění stanovené výnosnosti projektu. V této kapitole jsou shrnuty obecné principy platné pro zajištění ekonomické udržitelnosti projektu EVO. V potenciální lokalitě pro výstavbu jednotky EVO jsou z pohledu udržitelnosti zásadní následující parametry:

- Poptávka po vyrobeném teple
- Možnosti synergie
- Dostupnost odpadu

V rámci dizertační práce je rozlišováno mezi dvěma hlavními technologickými koncepty, a to s jednotkami EVO malých kapacit (cca do 50 kt/rok) a jednotkami středních a vyšších kapacit (cca nad 80 kt/rok). Tento přístup byl poprvé představen v práci [17]. Přesto, že u jednotek malých kapacit lze zpravidla očekávat vyšší měrné provozní náklady (např. mzdové náklady), měrné investiční náklady mohou být relativně nízké. Potenciál využití malých ZEVO spočívá zejména v možnostech realizace v lokalitách s nižší poptávkou po teple, s nižší produkcí odpadu v blízkém okolí nebo kdekoliv, kde by výstavba velkého ZEVO z různých důvodů nebyla možná. Potenciál využití malých jednotek EVO byl popsán v práci [18].

Technologické provedení jednotek EVO obecně odpovídá jiným spalovacím procesům. Vyšší nároky jsou kladeny na vedení spalovacího procesu v peci a na zajištění čistoty především plyných produktů procesu – spalin. Výstupy procesu ve vztahu ke vstupnímu toku SKO znázorňuje obr. 3.



Obr. 3 Příklad – schéma možných materiálových toků a energetických produktů vystupujících z provozu EVO

V evropských podmínkách je obvyklá realizace a provoz ZEVO ve velmi širokém rozpětí zpracovatelských kapacit. Zařízení s nízkou až střední kapacitou se, na rozdíl od jednotek s vyšší kapacitou, obvykle orientují na výrobu tepla na úkor elektřiny. Systém čištění spalin je koncipován obdobně jako u standardního velkého ZEVO. Investičně výhodné je

především řešení založené na tzv. suchém čištění spalin, spočívajícím v rozprašování sorbentů a adsorbentů do spalin a jejich následné filtraci. Jak je zmíněno výše, potenciál malého ZEVO spočívá ve využití sériově vyráběných aparátů a celkově jednodušších (ale plně funkčních) řešení. Tím mohou měrné investiční náklady klesnout a v konečném důsledku je tedy v některých případech možné u těchto zařízení dosáhnout nižších nákladů na zpracování odpadu [17].

Nejdůležitější položkou výnosů u malého ZEVO je vedle výnosů za zpracování odpadů také příjem z prodaného tepla. Udržitelnost takového projektu je tedy silně závislá na schopnosti místní sítě CZT absorbovat teplo vyrobené v ZEVO a na akceptovatelné ceně tepla na rozhraní dodávky jednotka EVO-teplárna. Co se týče nákladů, největší roli hrají mzdové náklady a zpracování reziduí. V případech, kdy je EVO realizováno v rámci existujícího teplárenského provozu, lze dosáhnout značných úspor provozních nákladů při sdílení zaměstnanců teplárny. To platí i o případném využití některých existujících technologií, což vede k úspoře investičních nákladů (tzv. synergický efekt).

Výnosy z prodeje elektřiny jsou minimální, zejména u malého ZEVO. Primárně je vyráběna elektřina pro účely krytí vlastní spotřeby. U velkého ZEVO zaujímá prodej elektřiny o něco výraznější podíl. V případě porovnání nákladů malého a velkého EVO je značný rozdíl ve mzdových nákladech.

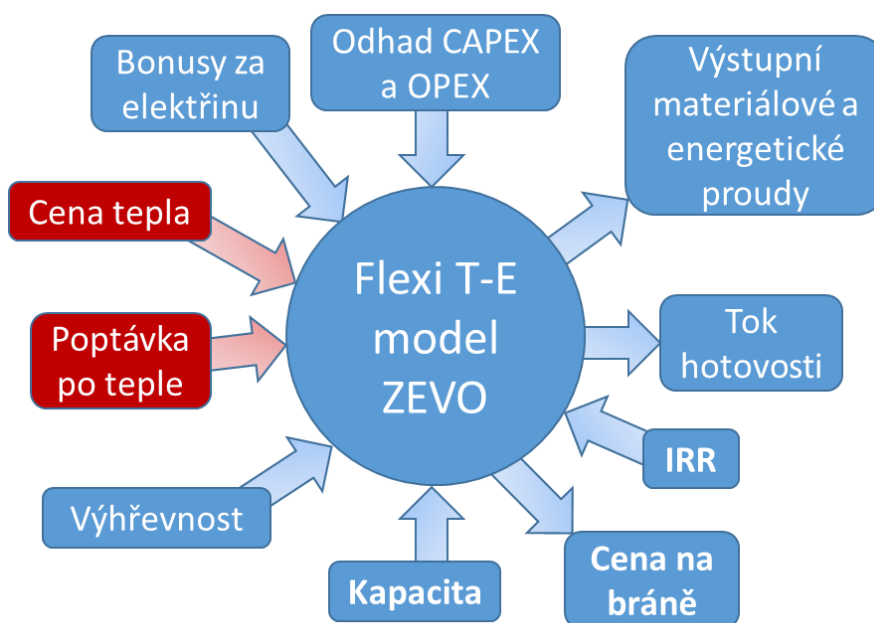
Při stanovení investičních nákladů technologie EVO bylo postupováno následujícím způsobem: každý z technologických souborů jednotky EVO se skládá z několika dalších zařízení. Pro každé z těchto zařízení byla ve spolupráci s odborníky ze společnosti EVECO Brno, s.r.o. definována mocinná funkce růstu investičních nákladů s kapacitou. Na stejném principu byly odhadnuty koeficienty pro všechny uvažované technologické a stavební celky. V některých případech je možné využít např. existující stavební objekty nebo některé strojní součásti (chladicí okruhy, pomocné provozny apod.) – tzv. synergický efekt – a tím dosáhnout úspory investičních nákladů a v důsledku i nižší požadované ceny na bráně.

Pro každý z provozních souborů byly pro danou kapacitu zařízení stanoveny investiční náklady. Jelikož odhad investic pro kapacity do 40 kt/rok vychází z odborných odhadů a pro kapacity nad 80 kt převážně z již realizovaných projektů, investice v intervalu 40-80 kt/rok byly stanoveny aproximací.

Investiční a provozní náklady uvedené v kap. 5 slouží jako vstupní data do simulačního T-E modelu „Flexi“ podrobně popsaném v práci [14]. Jak ukazuje obr. 4, tento model slouží především k orientačnímu výpočtu minimální ceny za zpracování odpadu. Využívá se zde tedy tzv. zpětného výpočtu (backsolvingu), kdy je prostřednictvím požadované výnosnosti projektu dopočten parametr, který běžně ve výpočtech figuruje jako jeden ze vstupů. Některé ze vstupních parametrů jsou buď relativně snadno odhadnutelné, nebo jsou předmětem jiných závěrečných prací řešených na pracovišti ÚPI. Červeně jsou zvýrazněny vstupy řešené v rámci této práce, tedy uplatnění vyrobeného tepla a jeho přijatelná cena.

Vypočtená cena na bráně z Flexi modelu, respektive její závislost na kapacitě v jednotlivých lokalitách je následně využita v optimalizačním nástroji NERUDA [10].

Jedná se o logistickou transportní svozovou úlohu, která je také popsána v následující kapitole.



Obr. 4 Shrnutí vstupů a výstupů T-E modelu "Flexi"

Pozn.: CAPEX – investiční náklady, OPEX – provozní náklady. Červeně jsou vyznačeny parametry klíčové z hlediska řešené problematiky.

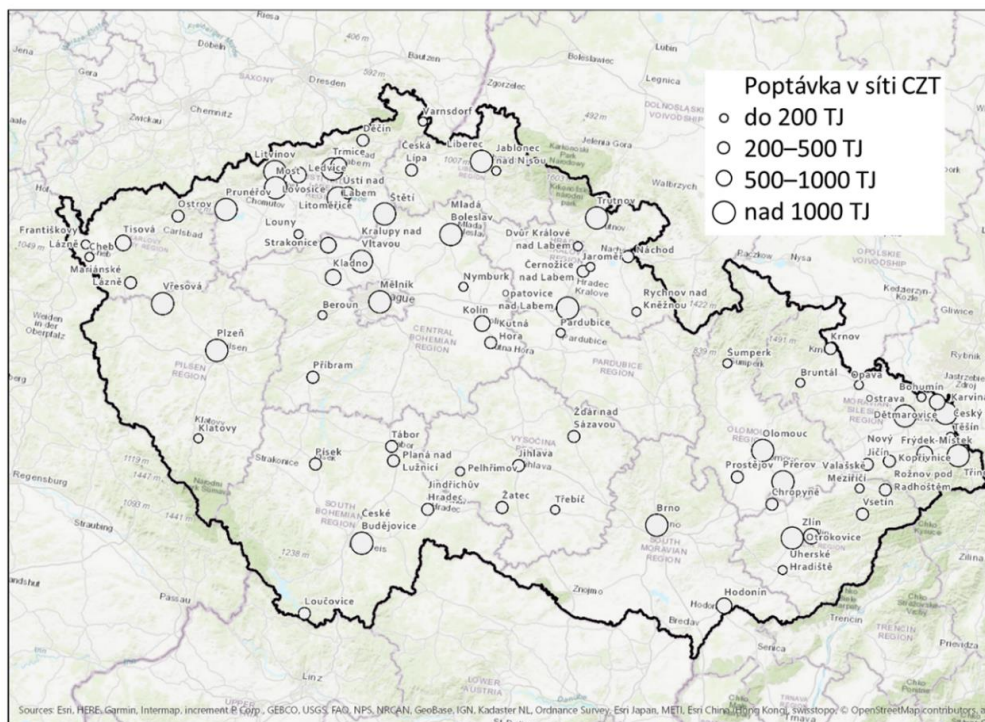
6 SÍŤE CZT NA ÚZEMÍ ČR

Pro komplexní posouzení potenciálu výstavby ZEVO s využitím nástroje NERUDA bylo nutné zmapovat síť CZT na území ČR, a to zejména z hlediska celkové roční poptávky po teple, jejího rozložení v průběhu roku, dále pak zohlednit současné zdroje tepla, využívaná paliva a teplonosná média.

Informace byly čerpány zejména ze zdrojů [19], [20], [8], z výročních zpráv jednotlivých provozovatelů, jejich webových stránek a z průběžně řešených studií. Cenové lokality ne vždy odpovídají fyzickému uspořádání sítí CZT, protože v první řadě zohledňují vlastnickou strukturu. Jedna síť CZT zde tedy může figurovat v rámci několika cenových lokalit, mezi kterými dochází k přeprodeji tepla. Existují také lokality s více menšími sítěmi CZT, kde je reálné uvažovat o jejich propojení, což je třeba příklad Jihlavy. Zvláštním případem jsou potom rozsáhlejší soustavy CZT, které propojují několik měst.

Hlavní výsledky provedené analýzy sítí CZT na území ČR jsou shrnuty v podobě tabulky v Příloze 2 plné verze práce, která obsahuje základní parametry sítí CZT v ČR s roční poptávkou nad 100 TJ. Data odpovídají roku 2017.

U asi deseti lokalit byla průběžně získána také data dodávky tepla na denní, hodinové nebo minutové bázi, která byla následně využita pro analýzu vlivu časového detailu výpočtu na přesnost výsledků a také pro generování průměrné denní poptávky, pokud jsou k dispozici pouze měsíční data (viz kap. 7.1).



Obr. 5 Síť CZT na území ČR s roční dodávkou tepla nad 100 TJ [19]

7 DÍLČÍ TECHNICKO-EKONOMICKÉ MODELY

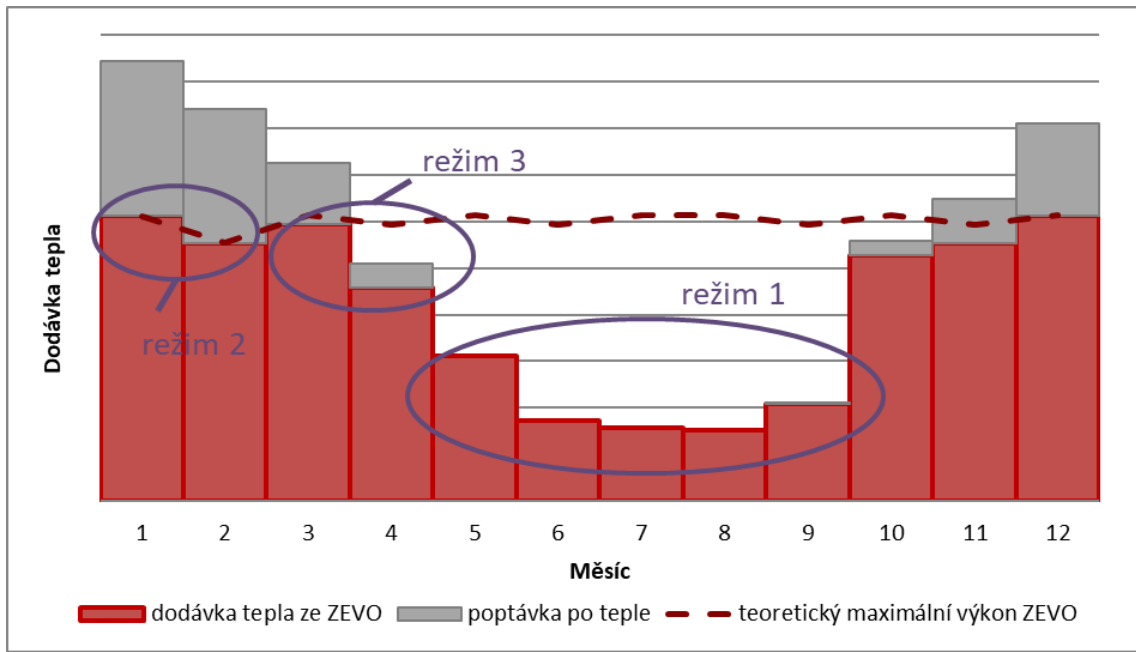
V následujících podkapitolách jsou popsány dílčí T-E modely, které mohou být využívány samostatně, avšak primárním cílem byla následná implementace do komplexních simulačních nebo optimalizačních nástrojů. Cílem je zpřesnění zejména ekonomických vstupních dat, jako je požadovaná cena za zpracování odpadu a s tím souvisejících odhadů optimálních kapacit v jednotlivých lokalitách.

7.1 NEROVNOMĚRNOST DODÁVKY TEPLA

V T-E modelech jednotek EVO, které jsou vytvářeny na ÚPI, jsou využívány údaje o spotřebě tepla v síti CZT ke stanovení dodávky tepla z modelovaného zařízení. Jak už bylo zmíněno výše, tyto modely slouží zejména ke stanovení požadované ceny na bráně. Kvůli zjednodušení a zrychlení výpočtů je pracováno s daty na měsíční bázi, což bylo pro účely modelu považováno za přijatelnou úroveň přesnosti. V průběhu jednotlivých měsíců je tedy uvažováno s konstantním tepelným výkonem. Nebyly tím pádem zohledněny denní ani hodinové výkyvy v dodávkách tepla. Z hlediska tepelného výkonu ZEVO jsou možné tři režimy (viz obr. 6):

1. Spotřeba v síti CZT je výrazně nižší než maximální možná dodávka ze ZEVO → veškerá poptávka je pokryta (režim 1).

2. Spotřeba v síti CZT je výrazně vyšší než maximální možná dodávka ze ZEVO → během celého měsíce se uvažuje s maximálním možným tepelným výkonem z jednotky EVO (režim 2).
3. Spotřeba v síti CZT je podobná maximální možné dodávce ze ZEVO → je nutné analyzovat průběh spotřeby a výkyvy v průběhu měsíce (režim 3).



Obr. 6: Režimy dodávky tepla

I když je maximální dodávka z jednotky EVO vyšší než průměrný měsíční odběr ze sítě CZT, může nastat situace, že není možné z důvodu výkonových špiček pokrýt veškerou poptávku a je nutné využít další tepelný zdroj, což se ve výsledku promítne do zvýšení provozních nákladů. Bylo zjištěno, že pokud je průměrný měsíční odběr tepla ze sítě shodný s maximálním výkonem jednotky EVO, je možné dodat pouze okolo 90 % teoretické měsíční dodávky. Není zde uvažován minimální výkon špičkového zdroje, což by vedlo k dalšímu snížení potenciální dodávky tepla ze ZEVO.

Cílem tedy bylo navrhnout řešení, které by umožnilo zachovat jednoduchost výpočtu modelu na měsíční bázi, a tedy i rychlost výpočtu a zároveň zohlednilo krátkodobé výkyvy v poptávce po teple. Toho bylo dosaženo zavedením tzv. korekčních koeficientů. Na základě této analýzy byl publikován článek [21].

Pro využívání korekčních koeficientů existují dva hlavní důvody. Prvním je existence neurčitých parametrů měnících se v čase. Tyto parametry zpravidla není možné přesně předpovědět na celou dobu životnosti. Řešením je využití odhadů na delších časových úsecích v kombinaci s korekčními koeficienty. Druhým důvodem je zjednodušení matematického modelu. Přesto, že jsou vstupní data známá i na krátkých časových úsecích, model na této úrovni nemusí být řešitelný. Koeficienty tak umožní zjednodušení modelu na měsíční bázi, ale zároveň zachování jeho dostatečné přesnosti.

Za účelem zohlednění výkyvů v dodávkách tepla byla provedena analýza dat z několika sítí CZT s celkovou roční dodávkou od 130 do 10 000 TJ. Data byla k dispozici ve formě průměrných hodinových odběrů nebo průměrných denních odběrů. Cílem bylo určení korekčních koeficientů k , které budou využity pro stanovení skutečné měsíční dodávky tepla ze ZEVO. Tuto dodávku lze potom vyjádřit jako:

$$Q_{skut.}^{EVO} = Q_{teor.}^{EVO} \cdot k, \quad (1)$$

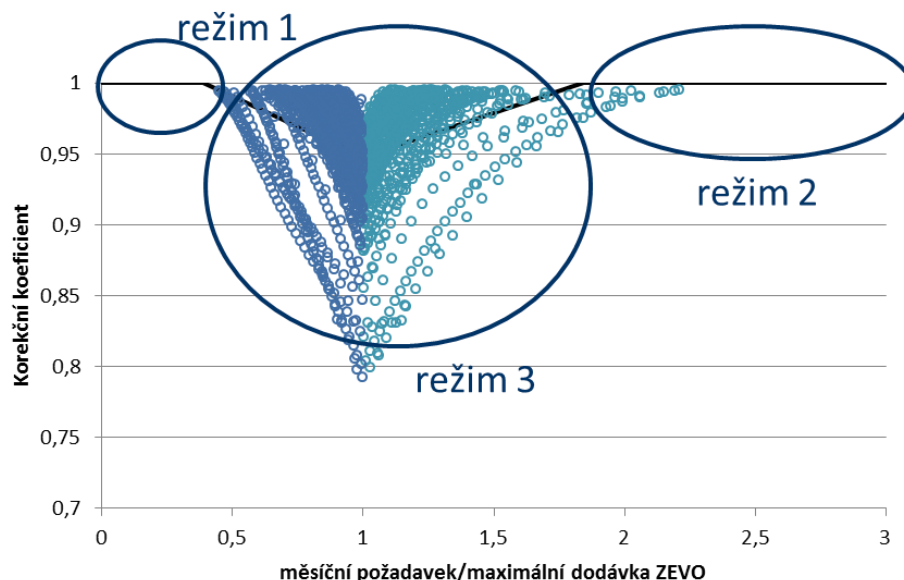
kde:

$Q_{skut.}^{EVO}$ skutečná měsíční dodávka tepla [GJ],

$Q_{teor.}^{EVO}$ teoretická měsíční dodávka tepla [GJ],

k korekční koeficient [-].

Získaná historická data byla detailně vyhodnocena. Pomocí softwaru Statistica byla zjištěna závislost korekčních koeficientů vypočtených podle reálných průběhů na různých parametrech, charakterizujících danou síť, resp. integrované ZEVO, které do dané sítě dodává teplo. Nejvyšší hodnotu korelace vykazovala závislost koeficientu k na poměru měsíčního požadavku v síti CZT a maximální dodávky z jednotky EVO. Z grafu (viz obr. 7) je patrné, že nejnižší hodnoty koeficientů lze nalézt v oblasti, kde se maximální výkon ZEVO blíží spotřebě v síti (viz režim 3 na obr. 6). Získané hodnoty koeficientů byly dále upraveny a pomocí lineární aproximace byl vytvořen model, který byl začleněn do T-E modelu ZEVO.



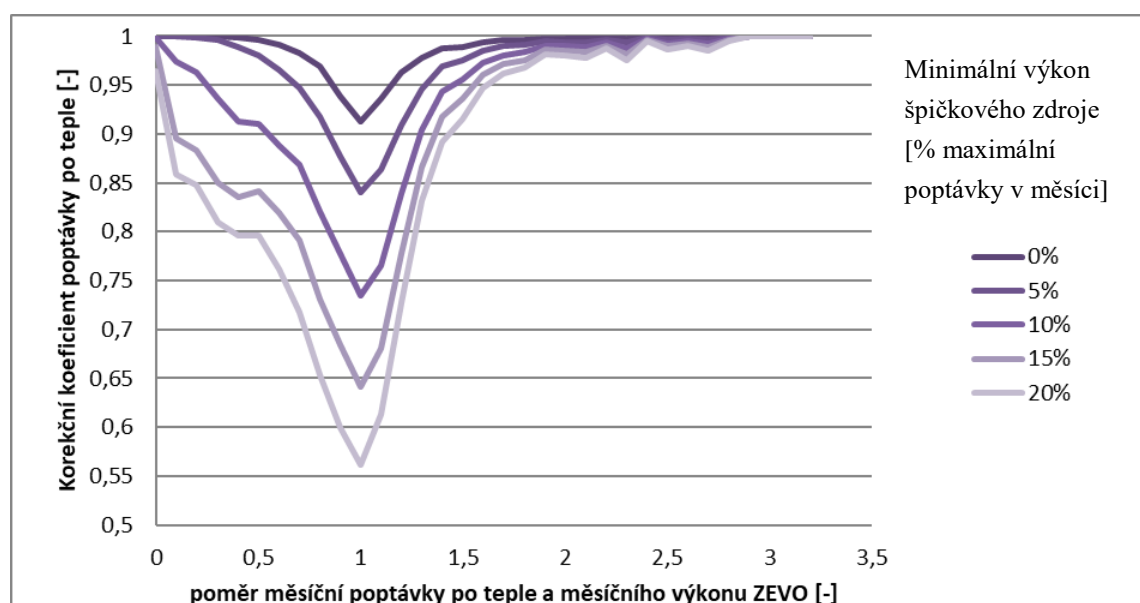
Obr. 7: Závislost korekčního koeficientu na poměru měsíčního požadavku v síti CZT a maximální teoretické měsíční dodávky ze zařízení EVO

Při optimalizaci nástrojem NERUDA je pro dosažení věrohodných výsledků nutné hodnotit velké množství lokalit, kde je možné počítat s potenciální výstavbou ZEVO. V ideálním případě by do výpočtu měly být zahrnuty všechny lokality, kde lze uvažovat určitou poptávku po teple – s ohledem na výše uvedené (viz kap. 3) se jedná o několik desítek lokalit. Není možné očekávat, že budou k dispozici údaje o nerovnoměrnosti dodávek ze všech těchto lokalit. Právě pro tyto účely byl vytvořen tento model. Naopak pro podrobnější hodnocení konkrétní lokality, viz [22], [23], kde jsou tato data k dispozici, lze vytvořit model přesnější.

Korekční koeficienty – další rozpracování

Pokud je ze ZEVO dodáváno teplo do sítě CZT současně s dalším tepelným zdrojem, je kromě výkyvů poptávky po teple třeba vzít v úvahu také provozní parametry tohoto zdroje, což je především jeho minimální výkon a možnosti odstavení. Každý zdroj tepla může být provozován v určitém rozsahu výkonu. Minimální výkon je zpravidla uváděn jako procentní podíl nominálního (maximálního) výkonu a závisí hlavně na typu spalovacích zařízení a použitého paliva. Pokud není zdroj delší dobu potřebný, je možné jej odstavit. Při odstavení parního nebo horkovodního kotle je možné kotel provozovat buď v režimu tzv. horké, nebo studené zálohy.

Pokud je do vstupních proměnných pro výpočet korekčních koeficientů zahrnutý i minimální výkon dalšího tepelného zdroje, jsou korekční koeficienty značně ovlivněny. Z grafu na obr. 8 je na příkladu jedné sítě CZT prezentován vliv tohoto minimálního výkonu na hodnotu korekčních koeficientů. Minimální výkon byl měněn v intervalu 0–20 % maximální poptávky v této síti CZT. Analýza byla provedena na období jednoho měsíce. Pokud je uvažován minimální výkon ve výši 20 % maximální poptávky – příklad předdimenzované teplárny, je možné v případě výkonu ZEVO shodného s průměrnou měsíční poptávkou v průměru v daném měsíci uplatnit pouze 56 % vyrobeného tepla oproti základnímu modelu.



Obr. 8: Korekční koeficienty zohledňující minimální výkon dalšího tepelného zdroje

Zohlednění minimálního výkonu špičkového tepelného zdroje a minimální doby odstávky

Analýza uvedená v předchozí podkapitole předpokládá, že ZEVO pokrývá spotřebu tepla v dané síti CZT za podmínky, že není vytlačován špičkový zdroj. V případech, kdy je nutné pokrýt výkonové špičky dalším zdrojem, je nutné brát v úvahu minimální výkon tohoto zdroje a určitou dobu najíždění. Pokud existuje možnost odstavení tohoto zdroje – v případě, že je ZEVO schopné pokrýt veškerou poptávku po teple – je nutné brát také v úvahu minimální dobu, na kterou je z hlediska ekonomiky a technologie vhodné kotel odstavit. Najíždění i odstavování kotle mají velký vliv na jeho životnost a hospodárnost a jedná se o technicky náročnou fázi jeho provozu. Obecně je možné odstavení kotle rozdělit na krátkodobé (10-15 h), kdy je kotel udržován v teplé záloze, při dlouhodobé odstávce (cca do 30 dní) se jedná o tzv. studenou zálohu. Pokud je kotel odstaven na delší dobu, musí být chráněn proti korozi [24].

Zde bylo nutné posuzovat zvláště jednotlivé lokality. Pokud bude tato skutečnost zahrnuta do modelu, bude to mít za následek zvýšení vlivu koeficientů, což může v závislosti na povaze sekundárního zdroje negativně ovlivnit ekonomiku projektu EVO, případně zkomplikovat dosažení požadované účinnosti R1.

Pokud má být zohledněn minimální výkon dalšího tepelného zdroje nebo minimální doba jeho odstavení, rozdíly v ceně na bráně při různých časových krocích výpočtu budou větší.

7.2 AKUMULACE TEPLA

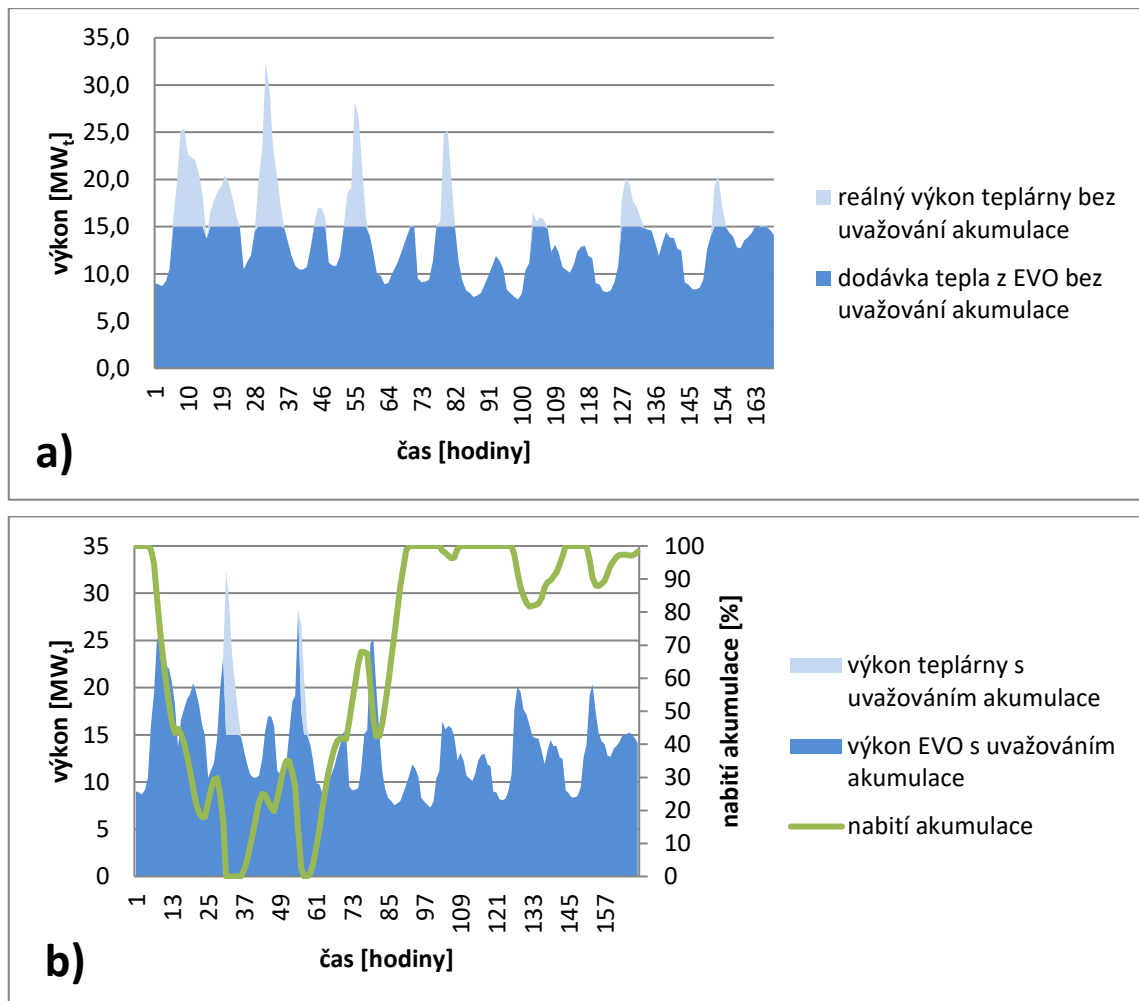
V rámci dizertační práce byly rozvíjeny optimalizační modely zohledňující akumulaci tepla. V určitých případech může roli akumulace částečně plnit i samotná soustava CZT. V rozsáhlejších sítích cirkuluje řádově několik tisíc m³ vody, která je pak zejména při letním provozu schopna sama o sobě vyrovnat výkonové špičky.

Pokud by nebyla tepelná kapacita samotné sítě dostatečná, je možné uvažovat o instalaci akumulčních nádrží. Akumulaci je možné realizovat prostřednictvím různých technologií a s cílem vyrovnání jak krátkodobých (hodiny, dny), tak i dlouhodobých (roční období) výkyvů v poptávce po teple. V závislosti od zvolené technologie se odvíjí i využitelný teplotní rozsah.

Typickým příkladem vhodného využití akumulace v případě výstavby ZEVO může být pravidelné zvýšení poptávky po teple kvůli ochlazení v noci, tedy dimenzování objemu nádrží pro vyrovnání denních výkyvů.

Na obr. 9 je na příkladu ukázáno, jakým způsobem může být využita akumulace tepla. Je uvažováno ZEVO s maximálním tepelným výkonem 15 MW_t, což odpovídá přibližně kapacitě 60 kt/rok a časový úsek jeden týden. Dále je posuzována akumulční nádrž s využitelnou tepelnou kapacitou 100 MWh. Pokud je akceptovatelný teplotní rozsah akumulční vody 20°C, pak tuto kapacitu představují nádrže o celkovém objemu asi 4300 m³. V prvním případě (obr. 9 a) je během týdne dodáno zařízením EVO 2 105 MWh_t tepla, s využitím akumulace (obr. 9 b) 2290 MWh_t, což je asi o 9 % více. Největší potenciál má akumulace ovšem v období, kdy umožní například odstavení

celého bloku dalšího tepelného zdroje. V tomto případě se finanční úspora dramaticky zvyšuje.



Obr. 9: Vliv akumulace na dodávku tepla do sítě CZT

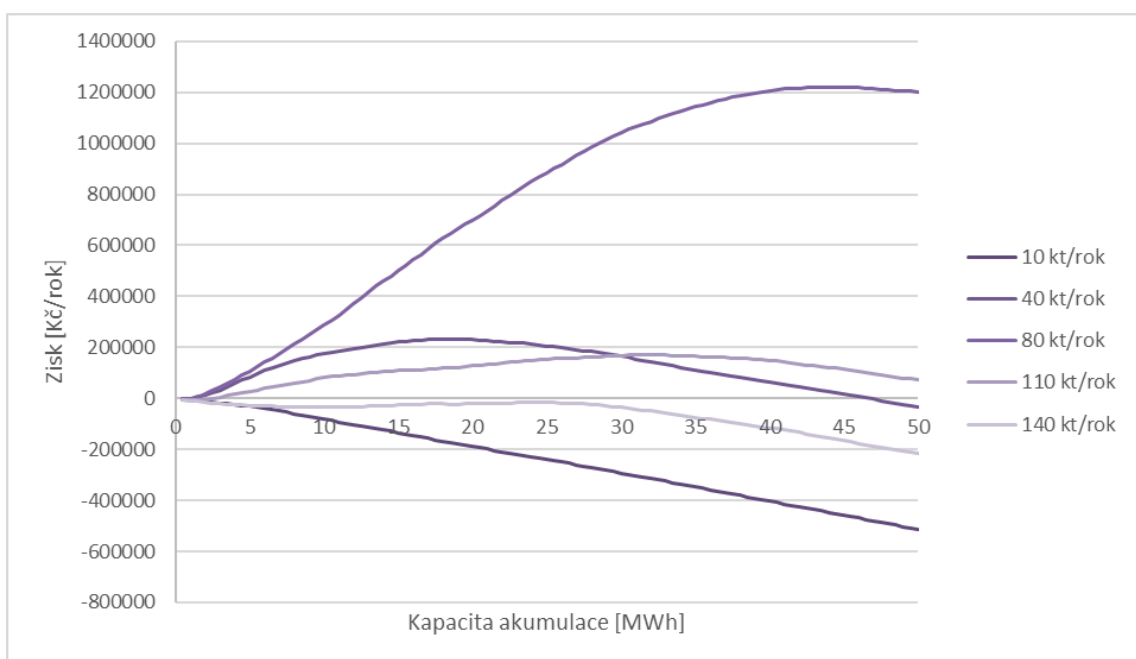
Pozn.: a) bez uvažování akumulace, b) s uvažováním akumulace

Nejefektivnější využití akumulace z pohledu kompromisu mezi investičními náklady do akumulčních nádrží a vyrovnání výkyvů v poptávce po teple je akumulace v řádu hodin. Hlavním účelem je tedy vyrovnání rozdílu mezi minimální poptávkou po teple v noci a maximální v ranních hodinách. Vliv akumulace tepla není možné efektivně zahrnout do optimalizačních nástrojů pracujících na měsíční bázi.

Předpokladem je vytvoření závislosti vlivu akumulace tepla prostřednictvím charakteristických parametrů (např. objem akumulční nádrže, přípustný pokles teploty topné vody apod.). Předmětem optimalizace bylo dimenzování akumulční nádrže, tedy hledání kompromisu mezi investičními náklady a zvýšením příjmů z prodeje tepla, případně zvýšením energetické účinnosti. Byl tedy vytvořen dílčí T-E model využívající reálná data poptávky po teple na hodinové bázi. Klíčovým vstupním parametrem byly investiční náklady do akumulčních nádrží.

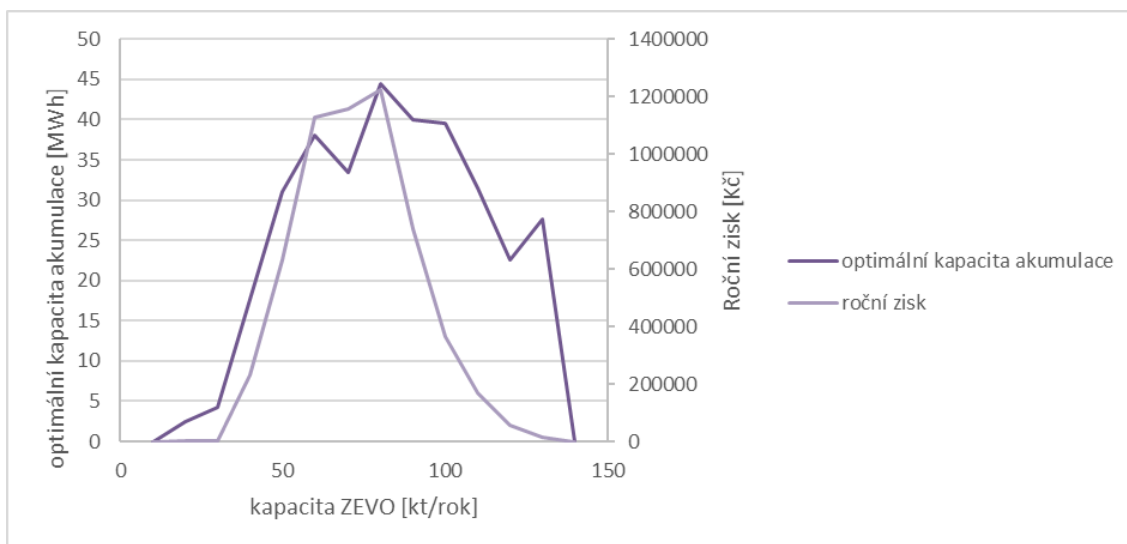
Měrné investiční náklady byly pro účely modelu odhadnuty na základě realizace akumulace tepla v rámci Teplárny Tábor, a.s. v podobě čtyř tlakových nádrží o celkovém objemu 400 m³ a kapacitě 63 MWh ve výši 295 tis. Kč/MWh [25]. Závislost měrných nákladů na velikosti (kapacitě) nádrží byla zanedbána, stejně jako inflace. Živostnost akumulčních nádrží byla uvažována 25 let. Provedené analýzy ukázaly, že dimenzování akumulčních nádrží závisí jak na relativních výkyvech v poptávce po teple, tak i tepelného výkonu ZEVO a velikosti sítě CZT. Jinými slovy dává akumulace tepla největší smysl v případech, kdy se ZEVO pohybuje největší část roku v režimu 3 dle obr. 6.

Příklad na obr. 10 ukazuje ziskovost investice do akumulčních nádrží v závislosti na jejich kapacitě pro různá kapacitní řešení ZEVO. Uvažována byla síť CZT s roční poptávkou 388 TJ/rok.



Obr. 10: Závislost ziskovosti investice do akumulčních nádrží na kapacitě akumulace

Je zřejmé, že u nižších kapacit ZEVO není v tomto případě realizace akumulčních nádrží výhodná, protože je možné uplatnit veškeré vyrobené teplo v průběhu roku. Investice do menších akumulčních nádrží se začíná vyplácet v případě kapacit, které krátkodobě pokrývají celou poptávku v letním období. Obr. 11 ukazuje ekonomicky optimální kapacitu akumulace v závislosti na zpracovatelské kapacitě ZEVO. Největší přínos má v tomto případě akumulace 44,5 MWh při realizaci ZEVO s kapacitou 80 kt/rok, která přinese zisk asi 1,2 mil. Kč/rok. Při provozních teplotách 150°C/60°C (tlaková akumulace topné vody o teplotě 150°C) této kapacitě pro představu odpovídá objem nádrží asi 425 m³. S rostoucí kapacitou ZEVO dochází k využití akumulace v kratším období a zároveň rostou i investiční náklady. Výpočtem bylo potvrzeno, že v případě realizace ekonomicky nejvýhodnější kapacity akumulace je průměrná doba konstantního nabíjení 4-5 h, vybíjení potom 3-4 h a jedná se tedy zejména o vyrovnání denních výkyvů v poptávce po teple.



Obr. 11: Závislost optimální kapacity akumulace tepla a maximálního zisku na kapacitě ZEVO

8 KOMPLEXNÍ ÚLOHA MODELOVÁNÍ SYNERGIE ZAŘÍZENÍ EVO A DALŠÍCH ZDROJŮ TEPLA

Při plánování projektu EVO jakožto dalšího tepelného zdroje, který má být připojen do sítě CZT k již existujícímu tepelnému zdroji, je důležitý odhad akceptovatelné ceny a jeho množství ze ZEVO. Pro řešení tohoto problému je důležitá znalost struktury sítě CZT a vychází tedy z výše zmíněných kapitol týkajících se analýzy sítě CZT. Zároveň se jedná o stěžejní část dizertační práce.

Jedná se o komplexní problém, kdy je nejprve nalezen ekonomicky optimální režim provozu ZEVO a dalšího tepelného zdroje v rámci jedné sítě CZT a na jeho základě je následně vyčísleno množství a cena tepla z jednotky EVO. Přitom je snaha do optimalizačního výpočtu zahrnout všechny výše zmíněné podstatné aspekty, tedy nerovnoměrnost poptávky po teple, nutnost zálohy (viz kap. 7.1), možnosti akumulace tepla (viz kap. 7.2) a další okolnosti ovlivňující dodávku tepla ze všech tepelných zdrojů.

V následující kapitole je podrobněji představen tento postup, který bude následně prezentován na příkladech konkrétních lokalit. Cílem je stanovit výnosy z prodeje tepla a elektřiny. Při jejich znalosti již bylo možné s využitím T-E modelu odhadnout závislost ceny na bráně na zpracovatelské kapacitě a na dalších klíčových parametrech jednotky.

Následující podkapitoly nastiňují provedené činnosti v souvislosti se spoluprací (synergií) ZEVO s dalším tepelným zdrojem. Nejprve je popsán model pro odhad akceptovatelné ceny tepla v případě kompletní náhrady původního tepelného zdroje ZEVO a špičkovou PK. V rámci komplexnějšího přístupu byl dále vytvořen model pro optimalizaci provozu při integraci ZEVO do sítě CZT s existujícím tepelným zdrojem.

8.1 NÁHRADA PŮVODNÍHO TEPELNÉHO ZDROJE SOUBOREM ZEVO A PLYNOVÁ KOTELNA

S využitím T-E matematických modelů byla posouzena ekonomika souboru ZEVO a PK. Jsou uvažovány další okrajové podmínky, jako je pokrytí veškeré poptávky po teple nebo provozní parametry obou zdrojů tepla. Dále je ekonomicky optimální způsob provozu obou zdrojů prezentován na základě provozních dat ze skutečných tepláren, přičemž je uvažován typický profil poptávky po teple v průběhu roku a fluktuace v různých časových úrovních.

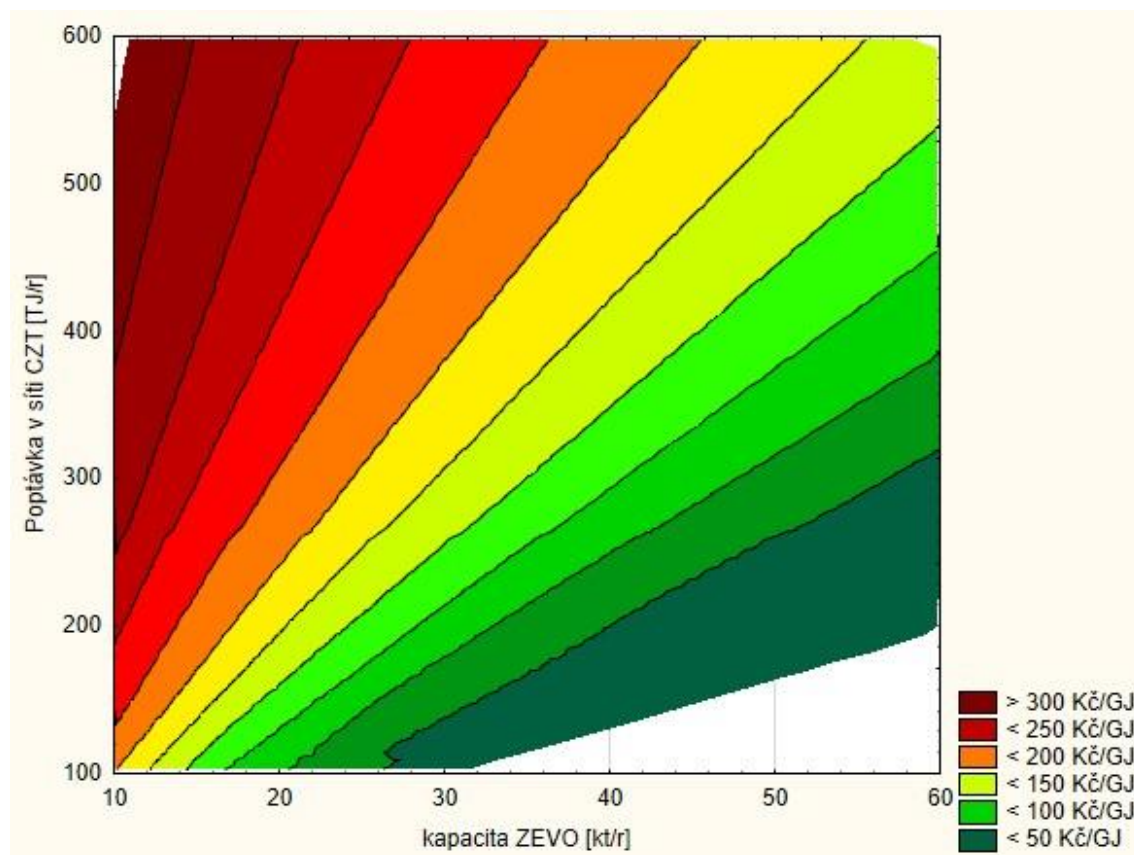
V první fázi byl vytvořen T-E model horkovodní PK, který byl následně propojen s T-E modelem ZEVO. Základ poptávky po teple v CZT je pokrýván ze ZEVO. PK zajišťuje pokrytí špiček v poptávce a tepelnou zálohu během topné sezony. Proměnné v modelu jsou velikost CZT a kapacita (tepelný výkon) ZEVO. Je předpokládána realizace akumulčních nádrží odpovídající velikosti pro vyrovnání výkyvů v poptávce v průběhu jednoho dne, viz kap. 7.2. Díky tomuto předpokladu jsou krátkodobé fluktuace zanedbány a model je počítán na denní bázi, tj. 365 časových intervalů. Funkce modelu jsou níže prezentovány na případové studii. Uvedené předpoklady umožňují využití relativně jednoduchého matematického modelu. Důvodem je použití pouze jedné kotle, respektive více kotlů, ale se stejnými parametry a zejména absence výroby elektřiny. Situaci, kdy je uvažována synergie ZEVO s komplexním zdrojem (teplárnou), se věnuje kap. 8.2.

Pro modelování poptávky po teple byla využita reálná provozní data z CZT s roční poptávkou asi 600 TJ, která byla zprůměrována v jednotlivých dnech. Změna poptávky byla docílena jednoduše násobením koeficientem $k \leq 1$ tak, aby byla výsledná poptávka v intervalu 100-600 TJ/rok. Výkonově je PK vždy dimenzována na úrovni 150 % maximální průměrné denní poptávky v roce bez ohledu na kapacitu ZEVO. Provedená analýza provozních dat ukazuje, že zhruba tato hodnota odpovídá výkonovým špičkám v zimním období. V závislosti na nastavené velikosti CZT to představuje interval 10-60 MW_t. V modelu je předpokládáno, že PK je v závislosti na jmenovitém výkonu složena z jednoho až tří modulů, z nichž nejmenší se vždy uvažuje s výkonem 10 MW_t. Pro PK s výkonem 10 MW_t to například představuje jeden 10 MW_t modul, pro PK s výkonem 30 MW_t jeden 10 MW_t a jeden 20 MW_t modul apod. Tím je zajištěn široký regulační rozsah v rozmezí 10 % nejmenšího modulu (tedy 1 MW_t pro všechny výkony PK) až plného výkonu všech modulů.

Hlavním výstupem tohoto dílčího modelu jsou roční náklady na provoz PK v závislosti na velikosti sítě CZT a tepelném výkonu (kapacitě) ZEVO. Výpočet těchto nákladů byl proveden pro 100 různých variant velikosti CZT a 100 variant velikosti ZEVO, což celkem představuje 10 000 výpočtů. Tyto náklady byly následně přepočteny na GJ tepla dodaného do CZT a vyjadřují tak snížení výnosů za jednotku tepla na vstupu do CZT pro ZEVO. Předpokládá se tedy, že ZEVO dotuje provoz PK. Vzniklá závislost je pro ilustraci na obr. 12. Pro představu byla dle přehledu cen tepelné energie, který vydává ERÚ, průměrná cena tepla do CZT z výroby v roce 2017 243 Kč/GJ včetně DPH.

S rostoucí kapacitou, a tedy i tepelným výkonem ZEVO náklady na provoz PK klesají až na úroveň fixních nákladů, které jsou u těchto zařízení ve srovnání s variabilními poměrně

nízké. Bílá oblast (viz obr. 12) u malých CZT a větších kapacitách ZEVO představuje situace, u nichž lze kvůli nízkému uplatnění vyrobeného tepla očekávat nedostatečné hodnoty účinnosti R1 a nebyly proto do výpočtů zahrnuty. Tyto dodatečné náklady na provozování PK se přirozeně snižují s rostoucí kapacitou ZEVO, kdy však klesá podíl využitého tepla ze ZEVO.



Obr. 12 Závislost nákladů na provoz plynové kotelní vztahených na dodané teplo

Tyto výsledky byly dále využity jako vstupy do T-E modelu Flexi, který je blíže popsán v [26], přičemž je uvažováno technologické řešení popsané v kap. 5, tj. ZEVO nízké kapacity s roštovým spalováním a výrobou páry v kotli o teplotě 220°C a tlaku 13 bar využívající točivou redukci pro výrobu elektřiny.

Protože je uvažován společný vlastník ZEVO i PK, jsou výnosy z prodeje tepla závislé pouze na velikosti CZT a ceně tepla na vstupu do CZT. Jinými slovy je v modelu ZEVO uvažováno vždy s pokrytím celé poptávky bez ohledu na tepelný výkon ZEVO. Teplo dodané z PK je v modelu zohledněno právě formou nákladů na provoz PK (viz obr. 12). Ty jsou z výše popsaného modelu PK získány metodou dvourozměrné lineární regrese.

Jak už bylo zmíněno výše, klíčové jsou pro ekonomiku malých projektů EVO výnosy ze zpracování odpadu a z prodeje tepla. Cena za zpracování odpadu je závislá na mnoha těžko předvídatelných okolnostech. Jejím odhadem se formou stochastické optimalizace zabývá [27]. Pro účely prezentovaného modelu byla stanovena pevně pro všechny

kapacity na úrovni 2250 Kč/t v roce realizace (2025). Při posuzování konkrétní lokality je možné provést přesnější odhad.

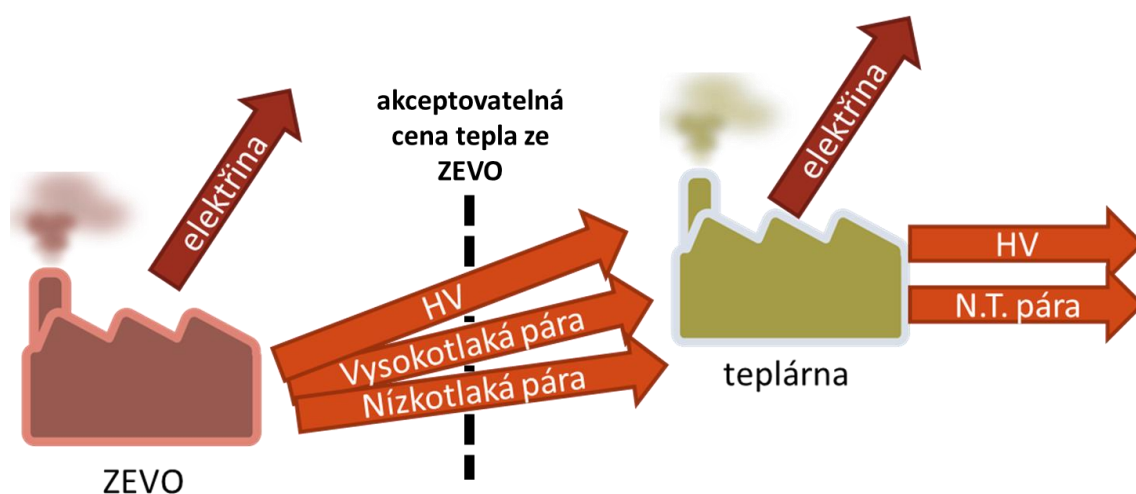
Stejně jako u modelu PK bylo opět provedeno 10 000 výpočtů pro různé kombinace kapacity ZEVO a velikosti CZT. Na výstupu z primárních rozvodů se v roce 2017 pohybovala cena tepla kolem 400 Kč/GJ [19]. Při zohlednění dalších nákladů na distribuci je cena na patě ZEVO (na vstupu do CZT) odhadnuta na 250–300 Kč/GJ. Při realizaci projektu ZEVO záleží zejména na investoru a konkrétních podmínkách, zda bude upřednostněna nižší cena tepla pro koncové zákazníky a vyšší cena za zpracování odpadu nebo naopak.

Výsledky ukazují, že při uvažovaných vstupních datech, považovaných za reálná v podmínkách ČR, je náhrada původního tepelného zdroje ZEVO a PK ekonomicky udržitelná. Ekonomika těchto projektů je však silně závislá na ceně za zpracování odpadu, která je závislá na konkurenci v okolí a akceptovatelné ceně tepla. Ta zase závisí na limitní ceně pro koncové zákazníky, při jejímž překročení hrozí jejich odpojení od CZT a na nákladech na distribuci.

8.2 ZAČLENĚNÍ ZEVO DO SÍTĚ CZT K EXISTUJÍCÍMU TEPELNÉMU ZDROJI

Odhad uplatnitelného množství a akceptovatelné ceny tepla ze ZEVO se výrazně komplikuje, pokud má být jednotka integrována do sítě CZT, kam dodává teplo komplexnější tepelný zdroj, jakým je běžná teplárna nebo elektrárna. To je případ téměř všech větších sítí CZT na území ČR.

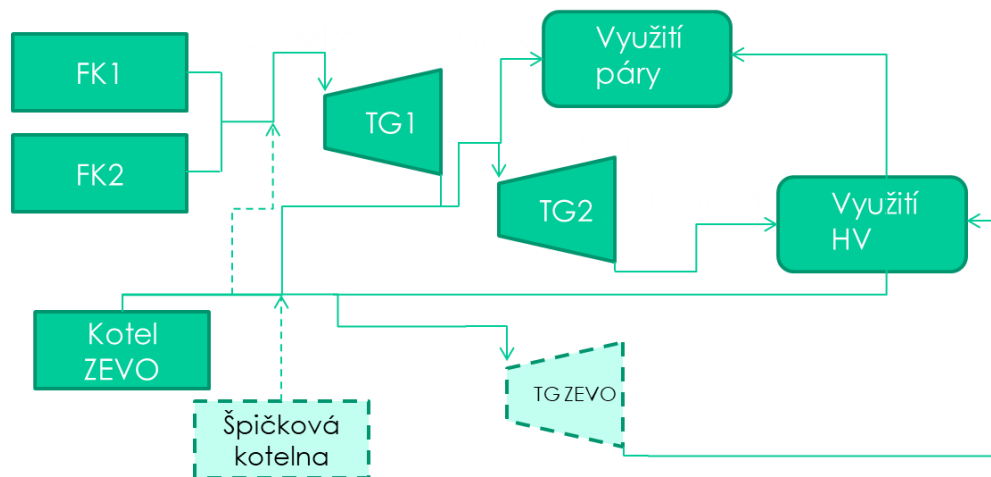
Předpokládá se, že veškeré teplo vyrobené v jednotce EVO je na různých úrovních odkupováno teplárnou, která jej buď využívá (např. k výrobě elektřiny nebo pro technologické účely) nebo dále prodává do sítě CZT. ZEVO může disponovat vlastním turbogenerátorem. Tento princip je ilustrován na obr. 13.



Obr. 13: Princip výroby a dodávky energie pro model výpočtu ceny tepla

Po prvotních testovacích modelech popsaných v plné verzi práce byl vytvořen optimalizační model provozu několika tepelných zdrojů. V daném časovém intervalu je hledán režim provozu s nejnižšími provozními náklady a tedy nejvyšší možnou cenou tepla na patě ZEVO. Předpokladem je, že cena tepla na patě teplárny jako celku bude zachována. Na rozdíl od dříve prezentovaných verzí byl kladen důraz na univerzálnost a jednoduchou úpravu pro různé lokality.

Princip funkce modelu je na příkladu znázorněn na obr. 14. V tomto případě je modelován systém se čtyřmi kotli (včetně ZEVO a špičkové PK), třemi turbogenerátory a dvěma úrovněmi využití tepla. Eventuálně je možné modelovat systém s osmi jednotlivými kotli a třemi úrovněmi využití tepla. Každému bloku jsou přiřazeny příslušné parametry. Konkrétně u kotlů je to minimální a maximální výkon, možné využití výstupní páry a náklady na provoz. U turbogenerátorů linearizovaná funkce pro výpočet elektrického výkonu, omezení hltnosti a možné využití výstupní páry. U využití páry/horké vody potom minimální požadovaný výkon. Na základě těchto parametrů jsou v jazyce VBA vytvořeny okrajové podmínky výpočtu a formulována účelová funkce. Následně je pomocí řešitele nalezen ekonomicky optimální režim provozu.



Obr. 14: Blokové schéma vstupující do modelu synergie zařízení EVO s dalším tepelným zdrojem

Pozn.: FK – fluidní kotel

Výpočet je nejprve realizován bez ZEVO a poté se ZEVO. Ze vzniklé úspory provozních nákladů je vypočtena akceptovatelná cena tepla.

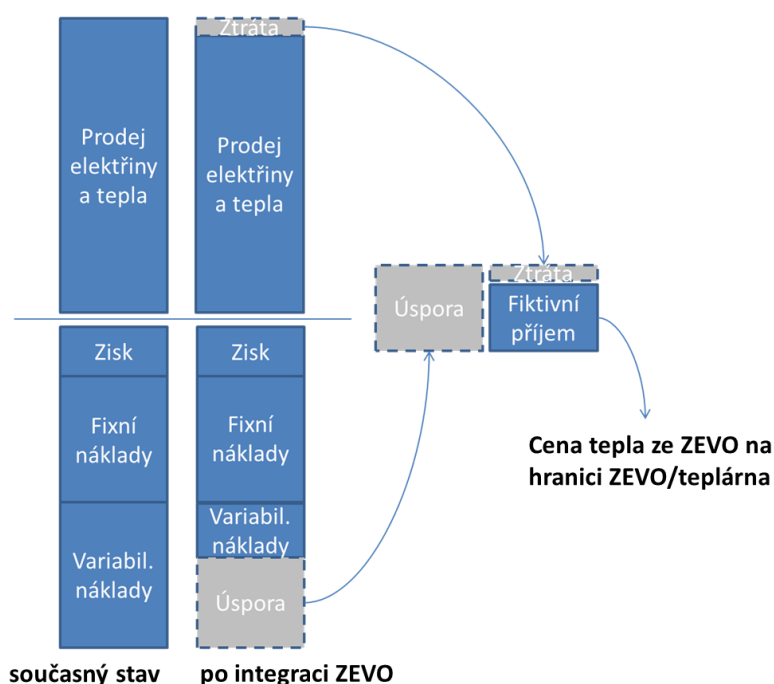
Tento model se ukázal jako funkční, nicméně odhalil některé nedostatky, například byl uvažován pouze na ohraničené časové úseky jednoho měsíce. Dále vznikla potřeba převedení modelu do optimalizačního softwaru GAMS z důvodu obtížné řešitelnosti v MS Excel v případě většího počtu kotlů a turbín. V další fázi bylo také vytvořeno rozhraní pro jednodušší zadávání okrajových podmínek. Vlastní implementace nástroje do softwaru GAMS nebyla předmětem dizertační práce.

8.2.1 Stanovení ceny tepla a nalezení optimálního režimu provozu v konkrétní lokalitě

Byl vytvořen T-E model teplárny na měsíční bázi, jehož cílem bylo stanovení výrobních ukazatelů a jejich změn v důsledku integrace ZEVO a dále odhad parametrů klíčových pro ekonomiku ZEVO při zohlednění změny výrobních ukazatelů teplárny. Technická část modelu slouží pro výpočet spotřeby paliva a množství vyrobené elektřiny a tepla, resp. změn ve výrobě v důsledku integrace EVO. Tyto údaje dále vstupují do ekonomické části modelu. Cílem je provést výpočet ceny tepla z jednotky EVO tak, aby byla pro teplárnu zachována současná ziskovost resp. finanční tok. Výpočet výroby energie a spotřeby paliva dále probíhá iteračním způsobem.

Výrobní ukazatele z technické části modelu jsou využity pro ekonomickou bilanci. Hlavním cílem je stanovení výnosů a fixních a variabilních nákladů. Model předpokládá, že roční výnosy se shodují s náklady (navýšené o fiktivní náklad – zisk).

V první fázi je modelován současný stav a předpokládá se tedy pokrytí celé poptávky po teple z teplárny nebo jiného existujícího tepelného zdroje. V dalším kroku je uvažováno pokrytí části poptávky po páře a horké vodě z jednotky EVO v různých variantách. V důsledku nižší výroby elektrické energie teplárnou po integraci ZEVO může dojít k částečnému poklesu příjmů. Na druhou stranu však dojde k úspoře variabilních nákladů samotné teplárny. Výsledkem rozdílu této úspory a ztráty je částka, která slouží k fiktivnímu nákupu tepla z jednotky EVO za předpokladu, že je zachován zisk teplárny. Nakupována je buď pára, která je využita k výrobě elektřiny v rámci teplárny, anebo pára nebo horká voda přímo k využití v síti CZT. Tímto způsobem je stanovena cena tepla z jednotky EVO, která je akceptovatelná pro teplárnu. Princip výpočtu je znázorněn na obr. 15.



Obr. 15 Princip výpočtu ceny tepla z jednotky EVO

Při posuzování synergie jednotky EVO a teplárny byl využit obdobný model jako v případě samostatné teplárny, který umožňuje modelovat různé varianty toků páry v zařízení. V rámci jednotlivých variant, kapacit ZEVO a měsíců jsou modelovány různé režimy provozu, které se liší například ročním obdobím, poměrem pokrytí poptávky po páře jednotkou EVO nebo teplárnou apod. Cílem výpočtu bylo najít pro každý měsíc a kapacitu takový režim provozu, při kterém existuje maximální výnos jednotky EVO při celkovém zachování ekonomiky výroby tepla v teplárně. Tento výnos je tvořen prodejem elektřiny (v případě vlastní turbíny) a tepla teplárně. V rámci výnosů z prodeje tepla je tedy již zahrnuta cena tepla, která zajišťuje zachování zisku teplárny dle výše uvedeného postupu.

Ze série výpočtů provedených autorem lze uvést některé obecně platné závěry. Zásadní vliv na výslednou cenu tepla má primární palivo v původním zdroji. Z hlediska ekonomiky ZEVO je nejvhodnější (částečné) nahrazení zdroje spalujícího zemní plyn, kde hrají roli vysoké provozní náklady na palivo, a tedy je zde i potenciál vyšší finanční úspory. V místě předání konečnému odběrateli nelze pozorovat vliv převládajícího paliva na cenu tepla, což může být způsobeno rozsáhlejší sítí CZT – plynovými zdroji jsou často malé lokální výtopny a kotelny.

8.3 ÚSPORA CO₂ VLIVEM NÁHRADY TEPLA V CZT ZE ZEVO

Metodika popsána v kap. 8.2 byla dále rozvinuta s cílem vyhodnotit úsporu produkce skleníkových plynů při integraci ZEVO do existující sítě CZT. Optimalizační model byl tak vedle minimalizace provozních nákladů souboru ZEVO + teplárna rozšířen také o minimalizaci emisí CO₂eq. Jedná se tedy o multikriteriální optimalizaci, která bude popsána níže v této kapitole.

Metodika optimalizace z hlediska ekonomiky a následný odhad dodávky tepla ze ZEVO a stanovení jeho akceptovatelné ceny byla podrobněji představena v [28]. Principem bylo provedení optimalizačního výpočtu ve dvou fázích, jehož výsledkem byla akceptovatelná cena tepla a jeho množství při integraci ZEVO. Původní model byl následně rozšířen o optimalizaci z hlediska minimalizace GWP. Za tímto účelem musela být provedena analýza bilance skleníkových plynů ze spalování primárních paliv v teplárně, ze spalování odpadu a z výroby elektřiny. Vzhledem k faktu, že posouzení GWP zde předpokládá srovnání vzhledem k výchozímu stavu, dodávka tepla pro koncové spotřebitele mohla být zanedbána.

Představený matematický model se zaměřuje na popis provozu teplárenských provozů a integraci ZEVO do jejich systémů. Model pracuje na denním časovém kroku, což se v tomto případě jeví jako nejvhodnější varianta (viz kap. 7.1). Poskytuje akceptovatelnou výpočtovou náročnost za předpokladu dostatečné přesnosti, viz [29] a kap. 8.2.

První část se věnuje samostatně stojícímu tepelnému zařízení. V závislosti na vlastnostech kotlů, turbín a definované poptávce po teple se spočítají roční variabilní náklady n_r a roční produkce CO₂ $p_{CO_2,r}$.

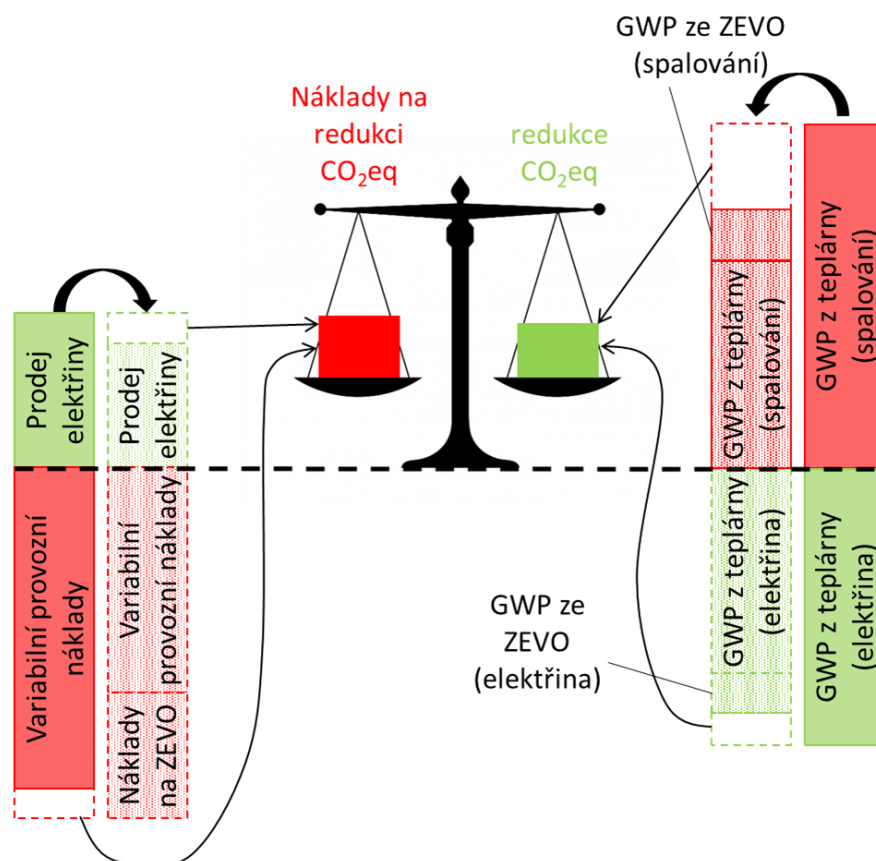
V druhé části se do modelu zahrne výpočet ZEVO. Kotel ZEVO je uvažován jako další virtuální kotel s nulovými provozními náklady. Velikost kotle je odvozena ze zvolené kapacity ZEVO. V zadání turbogenerátoru ZEVO není rozdíl oproti teplárně. Jediný

problém tkví v odhadu regresních koeficientů $a_{1,j}, a_{2,j}$. Ty jsou odhadnuty na základě návrhových specifikací od nejmenovaných firem. Výsledkem druhé části jsou opět variabilní náklady n_r^{EVO} a CO_2 produkce $p_{\text{CO}_2,r}^{EVO}$. Rozdíl

$$n_r - n_r^{EVO}, \quad (2)$$

definuje příjmy, které si může ZEVO nárokovat jako příjmy za prodej tepla a elektrické energie. Tato hodnota může být potom použita do modelu ekonomiky samotného ZEVO (investiční náklady, náklady spojené s provozem založené na výkonu kotlů a turbín). Výsledkem je pak výnosnost projektu ZEVO kvantifikována pomocí IRR. Stejně jako náklady, lze porovnávat i produkci CO_2 .

Díky popsanému přístupu je možné určit snížení/zvýšení produkce CO_2 za předpokladu integrace ZEVO o zvolené kapacitě. Zároveň lze určit výnosnost této integrace v podobě IRR za předpokladu zachování ekonomické stability dosavadního teplárenského provozu. Pokud je podmínkou dosažení určité hodnoty IRR, pak lze vyjádřit dodatečné náklady potřebné pro provoz ZEVO. Vhodně to ilustruje na jednom příkladu obr. 16.



Obr. 16 Princip multikritériální optimalizace

9 SHRNU TÍ

Pracoviště ÚPI dlouhodobě vyvíjí optimalizační nástroje pro hodnocení investičních záměrů ZEVO. Vlastní výpočtové jádro ve formě matematického modelu vyžaduje jako vstup rozsáhlou datovou základnu. V tomto kontextu je cílem dizertační práce příprava vybraných vstupů ve formě původních T-E modelů, které odrážejí potřebu zohlednit různou úroveň detailu, dostupnost dat a časovou náročnost vlastního výpočtu.

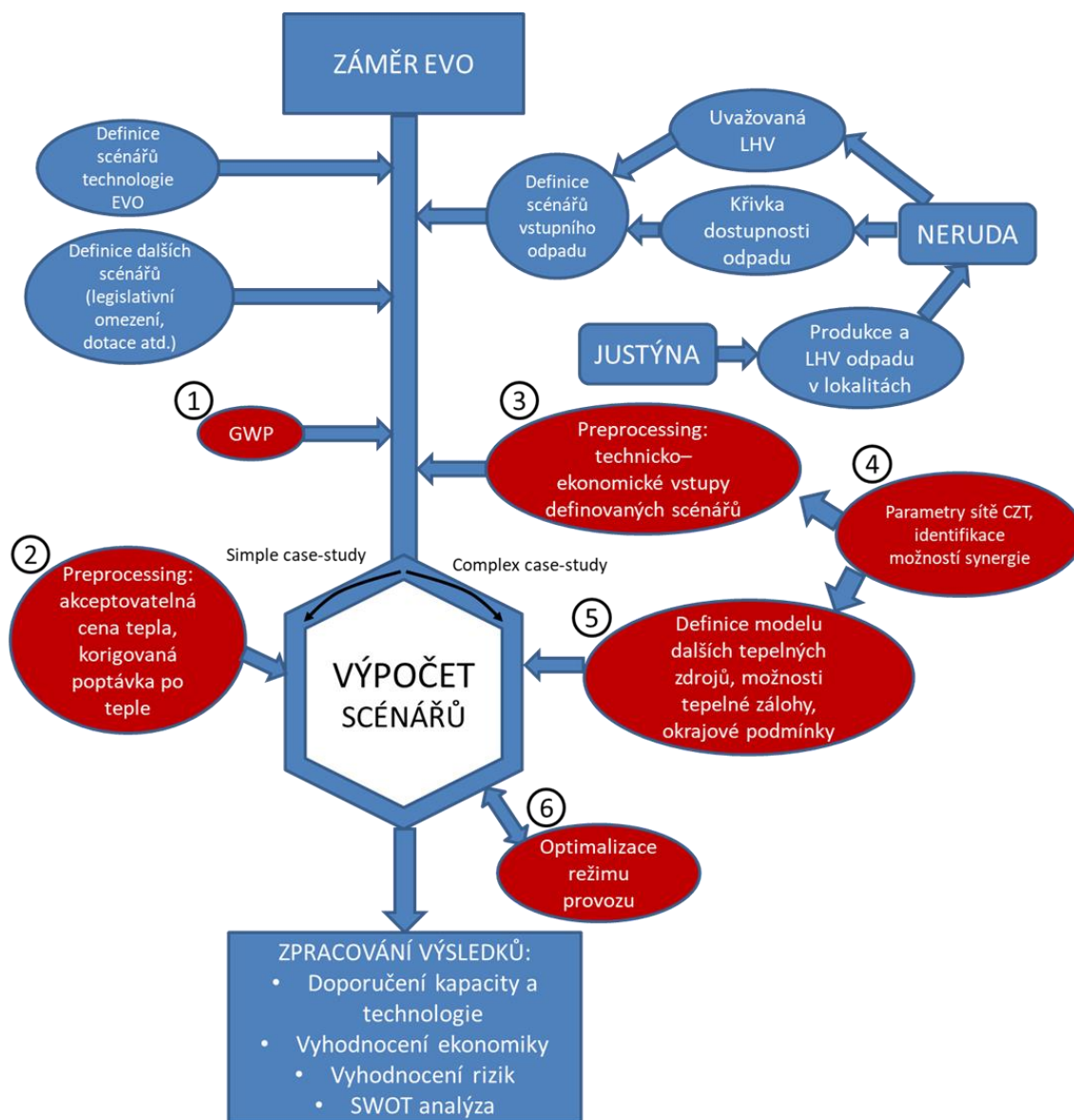
Vzhledem k faktu, že dodávka tepla ze ZEVO a jeho cena představuje zásadní parametr pro udržitelnost budoucích projektů, zaměřuje se práce především na problematiku integrace EVO do sítí CZT.

Obr. 17 schematicky ilustruje náplň dizertační práce v kontextu optimalizačních nástrojů využívaných pro plánování OH, jejichž finálním výstupem je komplexní nástroj pro návrh parametrů ZEVO s využitím scénářového přístupu. Červeně je zvýrazněno šest oblastí, na kterých se autor přímo podílel, modře pak vstupní a výstupní data, která jsou vytvořena, respektive zpracována na pracovišti ÚPI.

V počáteční fázi jsou definovány scénáře vstupních parametrů (okrajové podmínky výpočtu). S využitím nástrojů *NERUDA* a *JUSTINE* je pro danou lokalitu vytvořena tzv. „křivka dostupnosti odpadu“, která ukazuje závislost mezi maximální cenou na bráně a množstvím odpadu a dále je proveden odhad LHV.

Následně jsou do modelu načtena vstupní data, se kterými souvisí potenciál synergie s případným dalším tepelným zdrojem v lokalitě. Samotný výpočet je možné rozdělit na dvě varianty:

1. **Jednoduchá případová studie (Simple case study)** – tento způsob výpočtu je možné aplikovat buď v lokalitě s jednoduchým výtopenkým nebo teplárenským zdrojem, kde nepřipadá v úvahu významnější možnost technologické synergie (např. využití turbíny). V tomto případě je v pre-processingu odhadnuta akceptovatelná cena tepla, která v zásadě odpovídá variabilním nákladům na jeho výrobu v původním zdroji a korigovaná poptávka po teple, která zohledňuje krátkodobé výkyvy. Následně je proveden výpočet scénářů na měsíční bázi.
2. **Komplexní případ (Complex-case study)** – v případě, že je možné využít synergie mezi původním tepelným zdrojem tepla a zařízením EVO, případně je původní zdroj komplikovanější, např. využívá více kotlů s různými parametry, je nutné zvolit přístup, při kterém je do optimalizačního modelu zahrnut i tento zdroj.



Obr. 17: Schéma scénářového přístupu pro návrh ZEVO v lokalitě s dalším tepelným zdrojem se zvýrazněným modelů, které jsou cílem práce

V rámci řešení práce byly zpracovány následující oblasti. U každého bodu je uveden okruh dle obr. 17, pod který příslušný bod spadá.

- Problematika CZT
 - Přehled existujících sítí CZT na území ČR včetně sumarizace dostupných parametrů (oblast 4)
 - Analýza vlivu použité úrovně časového detailu poptávky po teple na přesnost výpočtu požadované ceny na bráně. Hlavním závěrem je dosažení uspokojivé přesnosti při využití dat na měsíční bázi s využitím koeficientů zohledňujících nerovnoměrnost poptávky po teple. (oblast 3)
 - Rozšíření současné datové základny týkající se sítí CZT na území ČR včetně prognóz do budoucna týkající se jejich struktury, dodávek tepla a tepelných zdrojů (oblast 4)
- Dílčí T-E modely

- Vytvoření předběžného optimalizačního modelu záloh pro případ výpadku dodávky tepla (oblast 5)
- Posouzení vlivu akumulace na dodávku tepla ze ZEVO (oblast 3)
- Návrh metodiky korekce měsíčních dat ve vybraných režimech – zohlednění nerovnoměrností v poptávce po teple (oblast 2 a 3)
- Optimalizace akumulace tepla pro účely jeho dodávky z jednotky EVO (oblast 2 a 6)
- Optimalizační modely integrace ZEVO do existující sítě CZT
 - Výpočet ceny tepla na patě zdroje (oblast 2 a 6)
 - Posouzení vlivu různých parametrů na akceptovatelnou cenu tepla, což slouží pro její odhad v lokalitách s nedostatkem informací pro její exaktní stanovení (oblast 2).
 - Vytvoření nástroje pro optimalizaci provozu více zdrojů tepla (včetně ZEVO) v rámci jedné sítě CZT (oblast 6).
 - Zahnutí problematiky GWP do optimalizačních výpočtů integrace ZEVO (oblast 1 a 6).
 - Implementace výstupů z vytvořených modelů do komplexních optimalizačních nástrojů

Co se týče přidané hodnoty pro potenciální zákazníky, představená metodika nabízí možnost komplexního posouzení integrace ZEVO, případně jiných strategických rozhodnutí v rámci teplárenských sítí. Proti běžně využívaným postupům jsou zohledněny parametry existujících zdrojů tepla a fluktuace v poptávce po teple a je tak dosaženo vyšší přesnosti odhadu ekonomiky plánovaných investic. Díky univerzálnosti a flexibilitě vytvořeného optimalizačního modelu je možné jej po drobných úpravách a naplnění vstupními daty využít pro hodnocení téměř jakékoliv sítě CZT a vzájemně porovnat velké množství možných variant.

Kromě ekonomického vyhodnocení disponuje model možnostmi navrhnout takovou strategii budoucího provozování sítě CZT, která je zároveň vhodná z hlediska GWP. V neposlední řadě slouží výstupy z matematických modelů vytvořených autorem ke zvýšení přesnosti logistické optimalizační úlohy NERUDA (viz kap. 4.1), která je dále využitelná např. jako pomůcka při rozhodování o vhodných parametrech nebo způsobu provozování ZEVO, dále také pro orgány státní správy pro podporu klíčových rozhodnutí nebo při vytváření strategických dokumentů, jako je např. POH.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EU. Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2008/98 ES ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic, Úřední věstník Evropské unie L 312/3. 2008
- [2] BOHM, Robert A., David H. FOLZ, Thomas C. KINNAMAN a Michael J. PODOLSKY. The costs of municipal waste and recycling programs. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. 2010, **54**(11), 864–871. ISSN 0921-3449. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2010.01.005
- [3] European Parliament. Circular economy package, Four legislative proposals on waste [online]. B.m.: EU Legislation in Progress. 2017. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2018/2/Zprava-o-vyvoji-energetiky-v-oblasti-tepla-za-rok-2016.pdf>
- [4] ŠOMPLÁK, Radovan, Martin PAVLAS a Michal STIEBER. Příprava podkladů pro oblast podpory odpadového hospodářství 2014–2020, dokument „Návrh optimální sítě zařízení k nakládání s odpady v rámci celé ČR včetně stanovení potřebných kapacit těchto zařízení ve všech krajích“. zadavatel: Ministerstvo životního prostředí ČR, subdodávka pro EY. 2015.
- [5] ŠOMPLÁK, Radovan, Lenka ZAVÍRALOVÁ, Jiří KROPÁČ a Martin PAVLAS. Justýna–nástroj pro odhad produkce a výhřevnosti komunálních odpadů na úrovni mikroregionů. In: *Odpadové fórum 2015* [online]. 2015 [vid. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2015/prispevky/017.pdf>
- [6] ŠOMPLÁK, Radovan, Vlastimír NEVRLÝ, Veronika SMEJKALOVÁ, Zlata ŠMÍDOVÁ a Martin PAVLAS. Bulky waste for energy recovery: Analysis of spatial distribution. *Energy* [online]. 2019, **181**, 827–839. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2019.05.175
- [7] ROSADA, Janusz. Characteristics of district heating - advantages and disadvantages. *Energy and Buildings* [online]. 1988, **12**(3), 163–171. ISSN 0378-7788. Dostupné z: doi:10.1016/0378-7788(88)90061-8
- [8] TSČR. Naše teplo. Teplárenské sdružení České republiky [online]. 2017 [vid. 2016-05-30]. Dostupné z: <http://www.naseteplo.cz/>
- [9] International Energy Agency. Combined Heat and Power, Evaluating the benefits of greater global investment [online]. 2008. Dostupné z: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/chp_report.pdf
- [10] ŠOMPLÁK, Radovan, Martin PAVLAS, Jiří KROPÁČ, Ondřej PUTNA a Vít PROCHÁZKA. Logistic model-based tool for policy-making towards sustainable waste management. *Clean Technologies and Environmental Policy* [online]. 2014,

16(7), 1275–1286. ISSN 1275–1286 (2014). Dostupné z: doi:10.1007/s10098-014-0744-5

- [11] ŠOMPLÁK, Radovan. Efektivní plánování investic do technologií pro energetické využití odpadů. Brno, 2016. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
- [12] ŠOMPLÁK, Radovan a Lenka ZAVÍRALOVÁ. Síťové úlohy v oblasti nakládání s odpadem. In: 62. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2015. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2015, s. 1–12.
- [13] PAVLAS, Martin. Waste Availability, Successful Regional Strategies and New WtE Projects Shaping – The Benefits and Application of The Optimization Tool NERUDA. In: IRRC (International Recycling & Recovery Congress): TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky. 2014, s. 139–150. ISBN 978-3-944310-15-2.
- [14] FERDAN, Tomáš. Efektivní využití komunálních odpadů v energetice. Brno, 2017. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
- [15] BÉBAR, Ladislav a Martin PAVLAS. Příprava podkladů pro oblast podpory odpadového hospodářství 2014–2020, dokument „Analýza a vyhodnocení možnosti aplikace nových technologií k energetickému využití odpadů“. zadavatel: Ministerstvo životního prostředí ČR, subdodávka pro EY. 2015.
- [16] REIMANN, Dieter O. CEWEP Energy Report III (Status 2007-2010) - Results of Specific Data for Energy, R1 Plant Efficiency Factor and NCV of 314 European Waste-to-Energy (WtE) Plants. 2012.
- [17] UCEKAJ, Vladimír. Analýza možností nakládání s komunálními odpady v rámci mikroregionu [online]. Brno, 2010 [vid. 2016-07-26]. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/1328/teze.pdf?sequence=1>
- [18] PUTNA, Ondřej. Uplatnění zařízení pro energetické využití odpadů malých zpracovatelských kapacit v podmínkách ČR. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.
- [19] Energetický regulační úřad ČR. Přehled cen tepelné energie v členění podle cenových lokalit [online]. 2015 [vid. 2016-06-16]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/teplo/statistika/prehled-cen-tepelne-energie-v-cleneni-podle-cenovych-lokalit>
- [20] Český hydrometeorologický ústav. EMIS, Zdroje znečišťování za rok 2016 [online]. 2017 [vid. 2019-01-23]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/plants/index_CZ.html

- [21] PUTNA, Ondřej, F. JANOSTAK, R. SOMPLAK a Martin PAVLAS. Short-time Fluctuations and Their Impact on Waste-to-Energy Conceptual Design Optimized by Multi-Stage Stochastic Model. *Chemical Engineering Transactions* [online]. 2017, **61**, 955–960. Dostupné z: doi:10.3303/CET1761157
- [22] JANOŠŤÁK, František. Modely toků v síti pro odpadové hospodářství. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.
- [23] ŠOMPLÁK, Radovan. Využití metod stochastického programování pro hodnocení investic v energetických zdrojích banoš. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce RNDr. Pavel Popela, Ph.D.
- [24] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. Parní kotle. B.m.: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983.
- [25] Teplárna Tábor, a.s. Využití akumulace tepla k navýšení výroby z KVET v Teplárně Tábor, a.s. *All for Power*. 2016, (3).
- [26] JANOŠŤÁK, František, Martin PAVLAS, Ondřej PUTNA, Radovan ŠOMPLÁK a Pavel POPELA. Heuristic Approximation and Optimization for Waste-to-Energy Capacity Expansion Problem. In: *Proceedings of 22nd International conference on Soft Computing, Mendel 2016*. 2016, s. 123–130. ISBN 1803-3814.
- [27] FERDAN, Tomáš, Radovan ŠOMPLÁK, Lenka ZAVÍRALOVÁ, Martin PAVLAS a Lukáš FRÝBA. A waste-to-energy project: A complex approach towards the assessment of investment risks. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2015, **89**, 1127–1136. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.04.005
- [28] JANOŠŤÁK, František, Ondřej PUTNA a Martin PAVLAS. Energy Dispatch Model for Integrated Waste-to-Energy Plant. *Chemical Engineering Transactions*. 2019, **76**, 1435–1440.
- [29] PUTNA, Ondřej, František JANOŠŤÁK, Radovan ŠOMPLÁK a Martin PAVLAS. Demand modelling in district heating systems within the conceptual design of a waste-to-energy plant. *Energy* [online]. 2018, **163**, 1125–1139. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.059

PUBLIKAČNÍ ČINNOST

2014

PUTNA, O.; KROPÁČ, J.; FRÝBA, L.; PAVLAS, M. Prediction of Heating Value of Waste and Its Importance for Conceptual Development of New Waste-to- Energy Plants. In Proceedings of the 17th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2014. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. Milano, Italy: Aidic Servizi S.r.l., 2014. s. 1273-1278. ISBN: 978-88-95608-30- 3. ISSN: 2283- 9216.

ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M.; KROPÁČ, J.; PUTNA, O.; PROCHÁZKA, V. Logistic model-based tool for policy- making towards sustainable waste management. Clean Technologies and Environmental Policy, 2014, roč. 16, č. 10098, s. 1275-1286. ISSN: 1618- 954X.

2015

ZAVÍRALOVÁ, L.; ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M.; KROPÁČ, J.; POPELA, P.; PUTNA, O.; GREGOR, J. Computational system for simulation and forecasting in waste management incomplete data problem. In Proceedings of the 18th International Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES 2015). CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. Miláno, Itálie: Aidic Servizi Srl, 2015. s. 763-768. ISBN: 978-88-95608-36- 5. ISSN: 2283-9216.

TOUŠ, M.; PAVLAS, M.; PUTNA, O.; STEHLÍK, P.; CRHA, L. Combined heat and power production planning in a waste-to-energy plant on a short- term basis. Energy, 2015, č. 90, s. 137-147. ISSN: 0360- 5442.

PUTNA, O.; KROPÁČ, J.; ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M.; STEHLÍK, P. Studie možností energetického využití odpadů. Brno. 2015. p. 1 - 79.

PAVLAS, M.; ŠOMPLÁK, R.; KROPÁČ, J.; FERDAN, T.; PUTNA, O.; GREGOR, J.; BÉBAR, L. Příprava podkladů pro oblast podpory odpadového hospodářství 2014 až 2020. 2015. p. 1 - 250.

2016

JANOŠŤÁK, F., PAVLAS M., PUTNA O., ŠOMPLÁK R., POPELA P. Heuristic approximation and optimization for waste-to-energy capacity expansion problem. In: Mendel 2016.

GREGOR, J.; PUTNA, O.; FERDAN, T.; KROPÁČ, J.; ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M.; STEHLÍK, P. Study on waste collection area proposal. 2016.

PAVLAS, M.; PUTNA, O.; KROPÁČ, J.; STEHLÍK, P. Complex approach towards the assessment of waste-to-energy plants' future potential. In Thomé-Kozmiensky, K. J., Thiel, S. (Eds.): Waste Management, Volume 6, Waste-to- Energy. Neuruppin, Germany: TK Verlag Karl Thomé- Kozmiensky, 2016. s. 149-160. ISBN: 978-3-944310-29- 9.

2017

ŠYC, M.; GREGOR, J.; KROPÁČ, J.; PUTNA, O.; PAVLAS, M.; STEHLÍK, P. Material recovery of waste – technology and products utilization. 2017.1

PUTNA, O.; JANOŠŤÁK, F.; ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M. Short-time Fluctuations and their Impact on Waste-to-Energy Conceptual Design Optimised by Multi-stage Stochastic Model. In Chemical engineering transactions. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. 2017. s. 955-960. ISBN: 978-88-95608-51- 8. ISSN: 2283-9216.

KROPÁČ, J.; PUTNA, O.; PAVLAS, M. Limity energetického využití odpadu s nižší výhřevností. Odpady, 2017, č. 2017/ 4, s. 21-23. ISSN: 1210-4922.

KROPÁČ, J.; PUTNA, O.; PAVLAS, M. Limity energetického využití odpadu s nižší výhřevností. Energie- 21, 2017, č. 2017/ 3, s. 28-31. ISSN: 1803-0394.

2018

PUTNA, O.; JANOŠŤÁK, F.; PAVLAS, M. Modelling of Existing Heating Plant Replacement with a Waste to Energy Plant and a Peak-Load Natural Gas Boiler. In Chemical Engineering Transactions. CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. Milano, Italy: Aidic Servizi Srl, 2018. s. 1615-1620. ISBN: 978-88-95608-67-9. ISSN: 2283-9216.

PUTNA, O.; JANOŠŤÁK, F.; ŠOMPLÁK, R.; PAVLAS, M. Demand modelling in district heating systems within the conceptual design of a waste-to-energy plant. Energy, 2018, č. 163, s. 1125-1139. ISSN: 0360-5442.

PUTNA, O.; JANOŠŤÁK, F.; PAVLAS, M.; STEHLÍK, P. Integration of WtE plant into energy producing system. 2018.

2019

NEVRLÝ, V.; ŠOMPLÁK, R.; PUTNA, O.; PAVLAS, M. Location of mixed municipal waste treatment facilities: Cost of reducing greenhouse gas emissions. Journal of Cleaner Production, 2019, roč. 239, č. 1, s. 118003.1-118003.11. ISSN: 0959-6526.

JANOŠŤÁK, F.; PUTNA, O.; PAVLAS, M. Energy Dispatch Model for Integrated Waste-to-Energy Plant. Chemical Engineering Transactions, 2019, roč. 76, č. 1, s. 1435-1440. ISSN: 2283-9216.

PUTNA, O.; JANOŠŤÁK, F.; PAVLAS, M. Greenhouse Gas Credits from Integrated Waste-to-Energy Plant. Book of abstracts. Proceedings of SDEWES 2017 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems. Záhřeb, Chorvatsko: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 2019. s. 1-11. ISSN: 1847-7178.

2020

PUTNA, O., JANOŠŤÁK, F., PAVLAS, M. Greenhouse gas credits from integrated waste-to-energy plant. Journal of Cleaner Production. 2020, roč. 270, s. 122408. ISSN 0959-6526.

ABSTRAKT

Předkládaná dizertační práce je zaměřena na problematiku energetického využití odpadů. Svým zaměřením přispívá do optimalizačních modelů dlouhodobě vyvíjených na pracovišti autora, které slouží pro simulaci toků v odpadovém hospodářství a k hledání optimální strategie nakládání s odpady. Hlavním cílem je posouzení potenciálu uplatnění tepla vyrobeného v jednotkách energetického využití odpadů jakožto klíčového faktoru pro ekonomiku těchto zařízení. Práce tedy představuje aktivitu na pomezí oborů odpadového hospodářství a teplárenství. V rámci jejího zpracování byly postupně vytvořeny dílčí matematické modely, pro jejichž vznik bylo nutné shromáždit vstupní data, zejména v souvislosti se sítěmi centrálního zásobování teplem. Tyto modely byly následně využity v komplexním optimalizačním nástroji pro posouzení integrace zařízení energetického využití odpadů do teplárenských systémů. Kromě ekonomického vyhodnocení je možné tento nástroj využít také pro odhad dopadu investičních záměrů v rámci sítí centrálního zásobování teplem na životní prostředí.

ABSTRACT

The dissertation thesis is focused on the issue of energy recovery of waste. It contributes to optimization models developed in the author's workplace in the long term, which serve to simulate material flows in waste management and to search for an optimal waste management strategy. The main objective is to assess the potential for the use of heat produced in waste-to-energy plants as a key factor for the economy of these facilities. The thesis therefore represents an activity on the border of the fields of waste management and heating. Partial mathematical models were developed within the scope, for which it was necessary to collect input data, especially in relation with district heating networks. These models were subsequently used in a comprehensive optimization tool to assess the integration of waste-to-energy plants into heating systems. In addition to the economic evaluation, this tool can also be used to estimate the impact of investment plans within the district heating networks on the environment.