



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**SIMULAČNÍ NÁSTROJ PRO INTEGRACI PLYNOVÉ  
MIKROTURBÍNY DO PRŮMYSLOVÝCH PROVOZŮ**

SIMULATION TOOL FOR GAS MICROTURBINE INTEGRATION INTO  
INDUSTRIAL OPERATIONS

**TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE**

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Ing. Eva Konečná**

**ŠKOLITEL**  
SUPERVISOR

**doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.**

**BRNO 2022**



# Obsah

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Úvod a cíle práce .....   | 5  |
| 2   | Současný stav poznání v řešené oblasti .....                          | 8  |
| 2.1 | Využití plynové mikroturbíny v průmyslu.....                          | 8  |
| 2.2 | Plynová mikroturbína a mikrosítě .....                                | 9  |
| 2.3 | Plynová mikroturbína v prádelenství .....                             | 10 |
| 3   | Metodika integrace plynové mikroturbíny do průmyslu .....             | 11 |
| 4   | Softwarový nástroj pro integraci plynové mikroturbíny.....            | 13 |
| 4.1 | Modul mikroturbíny .....  | 14 |
| 4.2 | Modul přímého sušení.....   | 15 |
| 4.3 | Modul pro technologický ohřev .....                                   | 16 |
| 4.5 | Modul akumulace .....   | 16 |
| 4.6 | Technicko-ekonomické vyhodnocení.....                                 | 17 |
| 5   | Příklad integrace mikroturbíny do prádelenského provozu .....         | 18 |
| 5.1 | Případová studie – prádelenský provoz využívající odpadní teplo ..... | 19 |
| 5.2 | Shrnutí a diskuze výsledků.....                                       | 24 |
| 6   | Závěr .....   | 26 |
|     | Seznam zdrojů .....   | 28 |
|     | Životopis.....  | 30 |
|     | Abstrakt .....  | 31 |



# 1 Úvod a cíle práce

Vzhledem k neustálému nárůstu spotřeby primárních zdrojů je třeba klást důraz na jejich maximální využití s vysokou účinností produkce energie. Dlouhodobě je vyvíjen tlak na snížení využívání fosilních paliv a produkce skleníkových plynů, a zároveň zvýšení podílu znovu obnovitelných zdrojů, vše s ohledem na zaručení energetické udržitelnosti a přístupu šetrnému k životnímu prostředí. Současně je také prosazován koncept decentralizované výroby energie. Ten přináší především zlepšení fungování energetické sítě z pohledu stability a zatížení. Další přednosti decentralizované výroby energie spočívají ve snížení emisí CO<sub>2</sub>, zvětšení energetických rezerv nebo nezávislosti subjektů při krizových situacích, jakými jsou výpadky sítě (Kanchev et al., 2011). Ve světle současných událostí, kdy ceny energií a paliv výrazně kolísají a mají výraznou rostoucí tendenci, je efektivní nakládání s palivy a energiemi, zcela stěžejním tématem. Obzvláště pro oblast průmyslu, která zůstává jedním z hlavních konzumentů primárních zdrojů, kdy tvoří zhruba jednu třetinu spotřeby. Zvyšování účinnosti výroby a využití energie v průmyslu bude mít i v dalším období prioritu.

Jednou z možných odpovědí na výše uvedené trendy jsou kogenerační jednotky. Primární palivo je maximálně využito k výrobě elektrické a tepelné energie. Jejich zavádění je podporováno systémem dotací a „zelenými“ bonusy pro energeticky efektivní zdroje kombinované výroby elektrické a tepelné energie (KVET). Mohou také přispět významně podpořit koncept decentralizované výroby. Mezi kogenerační zdroje patří i plynové mikroturbíny (MT) poskytující elektrický výkon až 500 kW. Díky jednoduché integraci, malým nárokům na údržbu a vysoké účinnosti kombinované produkce energie 80–90 % (Nelson et al. 2018) je možné MT využít jak pro komerční objekty, tak i v průmyslových provozech.

Pro dosažení vysoké efektivity procesu je důležité využít všechny dostupné proudy a technologie. V případě MT je klíčové využití tepla pro dosažení vysoké kombinované účinnosti. Nesmí být opomenuty ani dostupné odpadní proudy, které často poskytují slibný potenciál pro znovu využití v procesu. Nicméně pro operátory provozů je stále aktuální téma dostupnosti metod, které by bylo možné použít k návrhu integrace zdroje nebo optimalizace procesu.

Právě z těchto důvodů byl vyvinut softwarový (SW) nástroj, který při zadání vybraných provozních údajů poskytne základní zhodnocení investice do plynové MT jako nového

hlavního zdroje energie. Hlavním požadavkem na tento nástroj je především univerzálnost, díky které ho lze s minimálními zásahy adaptovat pro řadu dalších průmyslových procesů. Cílem bylo vytvořit jednoduchý nástroj pro provozovatele, na jehož základě mohou dále rozvíjet zájem o dané řešení.

**Hlavním cílem práce je tvorba softwarového nástroje, který vyhodnotí vhodnost integrace plynové mikroturbíny do průmyslových provozů** (viz Tab. 1). Současná inženýrská praxe postrádá efektivní postup, jak vhodně vybrat a následně integrovat MT, aby byla optimálně využívána a ekonomicky přínosná z hlediska konkrétního sledovaného provozu. Tato práce si klade za cíl tuto metodiku zformulovat a implementovat ji v softwarovém nástroji, který umožní integraci MT do vybraného systému tak, aby bylo dosaženo vysoké energetické účinnosti celého systému, využití potenciálu plynové mikroturbíny a příznivé doby návratnosti investice.

Potřebná data byla získána na základě experimentálního provozu vybrané plynové MT v Laboratoři energeticky náročných procesů (LENP), výzkumného centra NETME Centre při Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.

Mikroturbína je vhodnou jednotkou pro energeticky náročné procesy, které spotřebovávají velké množství tepla. Příkladem takového procesu je profesní péče o prádlo, která využívá velké množství tepla, jehož zdrojem je většinou zemní plyn, a také vody. Tento druh provozu byl vybrán pro ověření vytvořeného SW nástroje i vzhledem k velkému množství experimentálních a provozních dat, výzkumnému zázemí v LENP, a v neposlední řadě kvůli praktické možnosti přímého využití tepla ze spalin pro sušení prádla a předehřev vody v akumulární nádobě. I přesto, že prádelenský provoz je velmi specifický, bude brán ohled na to, aby byl software maximálně univerzální i pro další druhy provozů s minimálním množstvím úprav.

**Tab. 1 Popis dílčích cílů práce s použitými metodami**

| <b>Dílčí cíl</b>  | <b>Použité metody</b>  | <b>Kapitola</b> |
|---|--|-----------------|
| <b>1</b> Rešerše odborné literatury   | databáze odborné literatury Web of Science, Science Direct<br>klíčová slova: gas microturbine, application, industry, laundry, microgrid | <b>2</b>        |
| <b>2</b> Formulace metodiky integrace MT  | studium řešení energetických úspor v průmyslu<br>konzultace s průmyslovými společnostmi a odborníky z praxe                              | <b>2.2</b>      |
| <b>3</b> Popis SW nástroje  | algoritmizace a struktura SW nástroje  | <b>3</b>        |
|   | popis výpočtů v jednotlivých modulech (MT, SUŠ, TO, TUV, AKU)  | <b>3.1-3.5</b>  |
|   | technicko-ekonomické hodnocení, zhodnocení technických možností  | <b>3.6</b>      |
| <b>4</b> Případová studie   | popis průdelenského procesu, parametry prádelny  | <b>4</b>        |
|   | popis variantních řešení pro prádelnu  | <b>4.1-4.2</b>  |
|   | vyhodnocení výsledků   |                 |
|   | zhodnocení získaných poznatků a omezení  | <b>4.3</b>      |
| <b>5</b> Vyhodnocení  | komplexní zhodnocení použití MT v průmyslu, použitelnost SW nástroje (jeho možnosti a limity)  | <b>5</b>        |
| <b>Hlavní cíl: SW nástroje pro efektivní integraci plynové MT do průmyslových provozů</b> |  |                 |

## 2 Současný stav poznání v řešené oblasti

Rešerše současné literatury byla provedena pro tři stěžejní témata – využití MT v průmyslových provozech, použití MT v mikrosítích a využití MT pro průmyslové prádely. Celkem byla rešerše sestavena ze 115 odborných publikací. V následujících kapitolách jsou uvedeny hlavní závěry ze studia současné literatury.



Obr. 1 Mikroturbína Capstone C30 integrována do infrastruktury LENP

### 2.1 Využití plynové mikroturbíny v průmyslu

*Kapitola je založena na publikaci KONEČNÁ E., MÁŠA V. Review of Gas Microturbine Application in Industry. Chemical Engineering Transactions, 2019, roč. 76, s. 355-360. ISSN: 2283-9216.*

Plynové mikroturbíny je možné využít jako součásti komplexních systémů pro produkci různých typů energie (Kalantar a Mousavi, 2010), jako záložní zdroje (Ismail et al., 2013), nebo pro provoz ostrovních zdrojů. Plynové MT se řadí mezi dobře známé technologie s výkonem mezi 30–500 kW a celkovou účinností mezi 80–90 % (Al Moussawi et al., 2017). MT pracují na základě Braytonova cyklu a mohou využívat na různé druhy paliv. Velkou výhodou MT je vysoká čistota spalin ( $\text{NO}_x$  méně než 9 ppm, při 15% přebytku  $\text{O}_2$ ) a jejich vysoká teplota okolo 300 °C. Jsou tak velmi kvalitním zdrojem tepla pro další aplikace:



ohřev teplé užitkové vody (TUV), výroba chladu, přímé sušení, předehřev provozních proudů apod. Nevýhodou MT zůstává vyšší investiční cena 1000–1800 \$/kW (Pantaleo et al., 2013; Ferreira et al., 2014). Ta je však částečně kompenzována vysokou životností, až 80 000 hodin.

Pro svoji jednoduchost jsou nejčastěji využívány MT v kogeneračních systémech, kde jsou spaliny využívány v dalších technologiích pro navýšení produkce elektrické energie nebo přímo pro vytápění prostor a předehřev vody za použití výměníku tepla. V trigeneračních systémech je spolu s elektřinou a teplem produkován i chlad. Typickým zařízením pro výrobu chladu ve spojení s MT jsou absorpční chladiče (Hwang, 2004).

Z výše uvedené rešerše odborné literatury vyplývá, že zhruba 50 % publikací je soustředěno na produkci elektrické energie. Podle všech publikací je MT slibným zdrojem energie s vysokou účinností, ať už se jedná o samostatné použití nebo v kombinaci s dalšími technologiemi. K nejvýznamnějším faktorům, které ovlivňují ekonomiku a efektivitu provozu MT patří:

- pracovní fond provozu,
- množství a formy využívané tepelné energie,
- výkupní ceny elektřiny a tepla,
- dotace na systémy a zelené bonusy,
- poměr ceny zemního plynu a elektrické energie,
- okolní podmínky (teplota, tlak, vlhkost).

## 2.2 Plynová mikroturbína a mikrosítě

*Kapitola je založena na publikaci KONEČNÁ E., SIN YONG, T.; MÁŠA V. New insights into the potential of the gas microturbine in microgrids and industrial applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, roč. 134, s. 110078. ISSN: 1364-0321.*

„Mikrosítě“ (microgrids) jsou lokálně propojená vedení, zařízení, generátory energie a úložiště, která fungují jako jediná kontrolovatelná entita ve vztahu k centrální síti (Lu et al., 2007). Mikrosítě je jednou z nejslibnějších technologií decentralizované výroby energie. V současné době dosahuje celková energetická účinnost lokálních KVET jednotek až 90 % (Rosen et al., 2005). Decentralizovaná výroba energie navíc umožňuje větší rozmanitost zdrojů energie v rámci sítě, včetně různých obnovitelných zdrojů energie (Zhang et al.,

2013). Zavedení mikrosítí může účinně snížit emise uhlíku o 5–15% (Zachar et al., 2014). Mikrosítě také slouží jako stabilizátor cen na trhu s energií (Chen et al., 2011).

Spojení plynové mikroturbíny a mikrosítě je dobře známý přístup pro dosažení efektivních systémů operujících na bázi zemního plynu, nicméně není zcela běžný. Pro jejich další využití v budoucnu je třeba otestovat a vyhodnotit reálné provozy využívající toto spojení (Basu et al., 2011). V rámci zaměření dizertační práce bylo téma mikrosítí s MT důležité pro zlepšení ekonomiky provozu díky využití tepelné energie. Na základě provedené rešerše lze konstatovat že vysoká podpora používání MT v mikrosítích je velmi žádoucí. Její přínosy jsou doloženy pro ekonomiku, energetickou bezpečnost, efektivní využití zdrojů, spolehlivost dodávky energie i životní prostředí.

### 2.3 Plynová mikroturbína v prádelnictví

*Kapitola je založena na následujících publikacích:*

KONEČNÁ E., MÁŠA, V.; MIKLAS, V.; SLOVÁK, R.; JÖRDENING, A.; BLAHA, V. *Gas Microturbine as a main source of energy for industrial laundry – feasibility study. Přijato k recenznímu řízení do časopisu Energy.*

BOBÁK, P.; TOUŠ, M.; KONEČNÁ, E.; MÁŠA, V. *Reduction of Energy Cost in Commercial Laundries by Applying Warm Rinsing Bath. 2018.*

Profesní údržba prádla je významný sektor, který je navázán na zdravotnictví a turismus. Ve světle aktuálních pandemických událostí lze předpokládat zvýšený důraz na hygienizaci prádla, která je ovšem spojena se zvýšenou teplotou prací vody nebo vyšší spotřebou detergentů. Protože se jedná o energeticky velmi náročný proces, výrazný nárůst cen energií v celosvětovém měřítku je dalším důvodem proč se zabývat energetickou efektivitou tohoto sektoru. Průmyslové prádelny však z hlediska výzkumu a vývoje zůstávají v pozadí. Jedná se tedy o jedinečný záměr s vysokým potenciálem pro zlepšení účinnosti procesu i životního prostředí. Při bližším pohledu na publikované práce je patrné, že větší pozornost směřuje k domácímu praní a novým možnostem sdílených prádelen. (Moon et al., 2020; Wasserbaur et al., 2020; Klint a Peters, 2021). Dalším aktuální tématem jsou odpadní vody z profesní údržby prádla., důvodem je vysoká spotřeba vody provozu. Aktuální technologické trendy v prádelnictví směřují především k eliminaci využití páry. Důvodem jsou vysoké investiční a provozní náklady parních systémů (Laundry Ledger, 2020).

Ve všech případech je každopádně nutné vybrat optimální zdroj energie, a to jak tepelné, tak elektrické, která bude hlavní hnací silou pro veškeré technologie prádelny, počínaje samotným zpracováním prádla, přes přehřev prací vody, až po případnou úpravu odpadní vody a její recyklaci. Právě kogenerační jednotky jsou vynikající odpovědí na tyto požadavky a plynové mikroturbíny je možné označit jako slibné zdroje pro prádelenské provozy (Máša et al., 2017). Integrací MT do prádelenského procesu by došlo k maximálnímu využití jejího potenciálu a zlepšení celkové účinnosti procesu. Další výhodou plynové mikroturbíny je její relativně snadná integrace do existujícího provozu, kdy lze využít stávajícího zařízení prádelny.

### 3 Metodika integrace plynové mikroturbíny do průmyslu

Vzhledem k tomu, že investice do pořízení MT je vysoká, je nezbytné správně navrhnout začlenění MT do sledovaného provozu. Ekonomicky a provozně nejefektivnější je MT využít jako **hlavní zdroj, který bude pokrývat veškerou tepelnou spotřebu provozu**. Metodika je soustředěna na identifikaci možností pro využití plynové MT a následnou systematizaci tohoto přístupu. Integraci plynové MT lze definovat jako komplexní úlohu, která sestává ze tří základních kroků:

1. *Sběr provozních dat a informací o cílovém provozu*
2. *Vyhodnocení získaných dat a optimalizace*
3. *Výběr výkonové varianty mikroturbíny a návrh její integrace*

Náročnost této metodiky může být různá podle zvoleného přístupu. Jednodušší varianta může spočívat v nahrazení stávajícího zdroje účinnějším jen na základě průměrné spotřeby. Na druhé straně se nabízí sofistikovaný přístup využívající komplexních/dynamických modelů, simulačních nástrojů apod. Ten je však časově, finančně i odborně náročný a vyžaduje velké množství provozních dat.

Cílem bylo najít **střední cestu**, která poskytne dostatečně přesné výsledky při využití dostupných dat, tj. takových, které zadavatel může poskytnout ihned, bez dalších rozsáhlých měření a analýz. S tímto záměrem byl navržen nový SW nástroj.

1. *Sběr provozních dat a informací o cílovém provozu*

Vhodně nastavený energetický systém s optimálním využitím primární energie a paliva je klíčovým prvkem provozu, který má vliv na fungování a konkurenceschopnost celého

podniku. Pro správný návrh zdroje energie je třeba provést výchozí posouzení sledovaného provozu, který by měl obsahovat následující údaje:

- celkové spotřeby provozu – elektrická energie, teplo, spotřeba paliva pro jejich výrobu,
- časové rozložení pracovní doby,
- stav současného energetického systému – účinnost výroby energie, přebytky energie, nákup energie, ceny za energie a paliva,
- identifikace největších konzumentů energie,
- identifikace odpadních proudů,
- určení specifických spotřeb energií sledovaného provozu.

Výstupem tohoto posouzení jsou potom úsporná opatření, která zvýší celkovou účinnost systému. Důležité je posouzení možnosti využít dostupné odpadní proudy, čímž se zefektivňuje využití primární energie.

### *2. Vyhodnocení získaných dat a optimalizace*

Výstupy energetického auditu jsou hodnoceny podle dosažených úspor vztažených k výši investice do daného opatření. Klíčovým krokem ve vyhodnocení získaných dat je identifikace odpadních proudů a jejich potenciálu. Jejich využití je stěžejním pro zefektivňování procesu a dosažení úspor primární energie. Navíc, realizace využití odpadních proudů je méně finančně náročné než pořízení nového zdroje energie a může přinést značné úspory. Přínos aplikace vybrané metody pro optimalizaci a dosažení úspor je třeba posuzovat pro každý konkrétní případ.

### *3. Výběr výkonové varianty mikroturbíny a návrh její integrace*

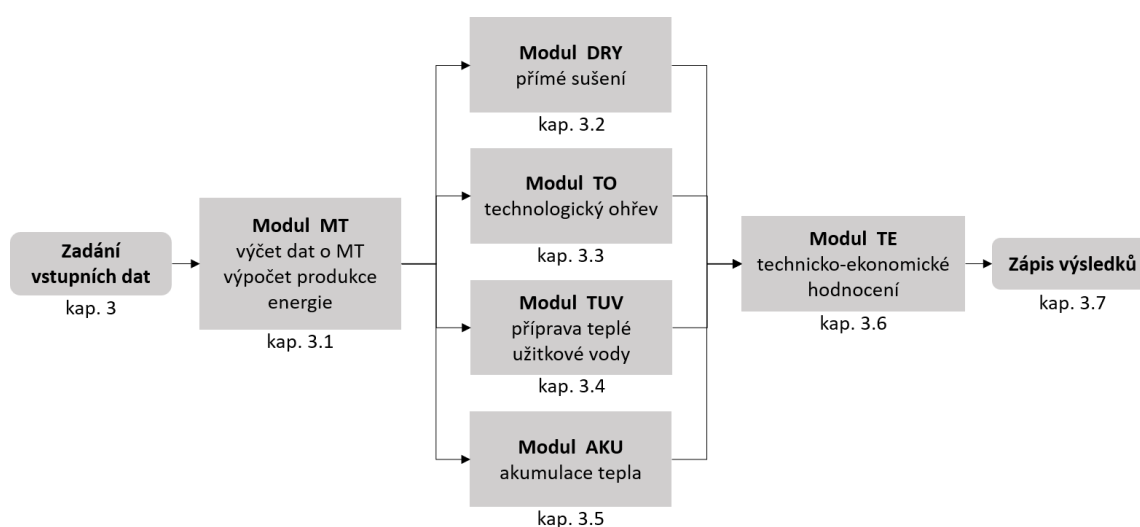
Dalším krokem je posouzení vhodnosti použití MT a výběru odpovídající výkonové varianty. Jak bylo zmíněno dříve, efektivního provozu MT lze dosáhnout pouze při plném využití horkých spalin, které produkuje. Ideálním procesem pro MT je kontinuální proces s vysokou spotřebou tepelné energie, kde je možné spaliny použít přímo.

Postup řešení integrace plynové MT je možné použít v širším spektru průmyslových procesů. Výše popsany postup je prvním krokem pro provoz, které odpadní proudy zatím nevyužívají. V případě, že provoz odpadní energii zužitkovává, je možné přistoupit k výběru plynové MT a její integraci.

## 4 Softwarový nástroj pro integraci plynové mikroturbíny

Navržený softwarový nástroj pro integraci plynové MT do průmyslových provozů je určen pro **vyhodnocení vhodnosti plynové MT jako nového hlavního zdroje existujícího provozu, který pokrývá jeho kompletní tepelnou spotřebu.**

Nástroj je tvořen kombinací jednotlivých výpočtových modulů představující jednotlivé operace, které nakládají s energií. Pro tvorbu výše popsaného nástroje byl využit z důvodu dostupnosti a jednoduchosti programovací jazyk Python™ v kombinaci s programem MS Excel.



Obr. 2 Grafické znázornění navrhovaného SW nástroje

Aby byl dodržen hlavní požadavek na tento SW, a to jeho univerzálnost, byly vytvořeny univerzální spotřebiče, které využijí tepelný potenciál plynové MT, proto je jeden ze spotřebičů zaměřen na přímé sušení spalinami (označení DRY). Další spotřebiče byly vybrány s ohledem na potřeby různých průmyslových odvětví. Jedná se tedy o technologický ohřev (označení TO), ohřev teplé užitkové vody (označení TUV) a akumulace tepelné energie (AKU). Protože v různých průmyslových provozech může mít každá operace jinou důležitost vzhledem k povaze provozu, bylo vytvořeno šest scénářů, které pokryjí možné varianty. Jejich přehled je uveden v Tab. 2. T tabulky je patrné, že akumulace ve všech případech zabírá poslední místo v pořadí spotřebičů. Důvodem je skutečnost, že akumulace je spíše provozním doplňkem ke spotřebičům energie.

Prvním krokem pro uživatele SW nástroje je doplnění vstupních dat o provozu, ve kterém má zájem integrovat plynovou MT. Tento krok je implementací prvního bodu metodiky: 1. *Sběr provozních dat a informací o cílovém provozu.* To je provedeno pomocí tabulky vytvořené v MS Excel.

Tab. 2 Navržené scénáře pro pořadí spotřebičů

|          |     |     |     |     |
|----------|-----|-----|-----|-----|
| scénář 1 | DRY | TO  | TUV | AKU |
| scénář 2 | DRY | TUV | TO  | AKU |
| scénář 3 | TO  | DRY | TUV | AKU |
| scénář 4 | TO  | TUV | DRY | AKU |
| scénář 5 | TUV | DRY | TO  | AKU |
| scénář 6 | TUV | TO  | DRY | AKU |

SW nástroj funguje na základě průměrných denních spotřeb. Výsledky tak budou přesnější pro stálé provozy, kdy se denní spotřeby v jednotlivých dnech mění jen minimálně. Na základě zadaných dat o stávajícím stavu provozu je provedeno technicko-ekonomické vyhodnocení, v rámci kterého je porovnán stávající stav s možností integrace MT. Tím je implementován druhý bod metodiky: 2. *Vyhodnocení získaných dat a optimalizace.* V následujících kapitolách jsou představeny jednotlivé moduly SW nástroje.

#### 4.1 Modul mikroturbíny

Zadaná data nejdříve využívá modul plynové MT, který je společný pro všechny scénáře. V této části jsou z vytvořeného excelovského katalogu načteny základní parametry o plynové MT, viz Tab. 3. Vzhledem k dominantní pozici na trhu s MT, jsou pro potřeby softwaru použity MT *Capstone Green Energy*. SW předpokládá instalaci pouze jedné MT vhodného výkonu, což vyplývá z vyšší pořizovací ceny plynových mikroturbín.

Dalším parametrem, který se odvíjí od generovaného výkonu a provozních hodin, je „zelený bonus“ za výrobu elektřiny ve zdroji kombinované výroby elektřiny a tepla, který samostatně spaluje zemní plyn.

Tab. 3: Základní charakteristiky modelové řady plynových MT Capstone (Capstone, 2021)

| typ MT | elektrický výkon<br>[kW] | elektrická účinnost<br>[%] | tepelný výkon<br>[kW] | teplota spalin<br>[°C] | průtok spalin<br>[kg/s] | cena<br>[Kč] |
|--------|--------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|--------------|
| C30    | 28                       | 25                         | 65,64                 | 275                    | 0,3                     | 900 000      |
| C65    | 65                       | 29                         | 118,46                | 309                    | 0,5                     | 1 625 000    |
| C200   | 190                      | 31                         | 281,01                | 280                    | 1,3                     | 5 000 000    |
| C600   | 570                      | 31                         | 864,65                | 280                    | 4,0                     | 15 000 000   |
| C800   | 760                      | 31                         | 1145,66               | 280                    | 5,3                     | 20 000 000   |
| C1000  | 950                      | 31                         | 1448,28               | 280                    | 6,7                     | 25 000 000   |

Následně jsou určeny denní produkce elektrické a tepelné energie a spotřeba zemního plynu. Klíčovou hodnotou je především produkované teplo, které vstupuje do dalších modulů. V neposlední řadě je z udaného počtu provozních hodin stanovena doba životnosti plynové MT do servisního zásahu výměny rotoru.

## 4.2 Modul přímého sušení

Stanovení spotřeby pro přímé sušení je zjednodušeno na určení tepla nutného k ohřevu a odpaření zadaného množství vody, viz (1):

$$Q_{suš} = (m_{suš} \cdot c_p \cdot (100 - T_0) + l_v \cdot m_{suš}) \quad (1)$$

kde  $Q_{suš}$  [kJ/den] je spotřebované teplo na sušení,  $m_{suš}$  [kg/den] množství vody k vysušení,  $c_p$  [kJ/kg·K] je měrná tepelná kapacita vody,  $T_0$  [°C] teplota vody na začátku sušení,  $l_v$  [kJ/kg] měrné skupenské teplo varu.

Jedná se tak o přibližnou spotřebu, která byla zjednodušena především proto, aby nebyl uživatel nucen zadávat velké množství podrobných dat. Hlavním parametrem pro výpočet spotřeby tepla na sušení je tedy množství vody, které je nutné ze sušeného materiálu odpařit.

### 4.3 Modul pro technologický ohřev

Pod pojmem technologický ohřev se rozumí ohřev, resp. předehřev procesních proudů nutných pro činnost samotného technologického provozu. V tomto modulu je výběr omezen na výrobu páry, ohřev/předehřev vody nebo termo oleje. (Tab. 4). Dle zadaných parametrů je stanovena spotřeba tepla pro tuto operaci.

Tab. 4 Specifické vstupy pro modul technologického ohřevu

| Pára                          | Teplá voda                   | Termo olej                          |
|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Teplota [°C]                  | Objem vody [m <sup>3</sup> ] | Objem termo oleje [m <sup>3</sup> ] |
| Tlak [MPa]                    | Požadovaná teplota [°C]      | Požadovaná teplota [°C]             |
| Teplota napájecí vody [°C]    |                              |                                     |
| Tlak napájecí vody [MPa]      |                              |                                     |
| Hmotnostní průtok páry [kg/h] |                              |                                     |

V případě páry je stanovena měrná entalpie vody a požadované páry a určena spotřeba tepla nutná k produkci požadovaného množství (2):

$$Q_{pára} = \dot{m}_{pára} \cdot (h_{pára} - h_v) \cdot 0,80 \cdot pf \quad (2)$$

kde  $Q_{pára}$  [kJ/h] je spotřebované teplo na produkci páry,  $\dot{m}_{pára}$  [kg/h] hmotnostní průtok páry požadovaný uživatelem,  $h_{ppára}$  [kJ/kg] měrná entalpie páry,  $h_v$  [kJ/kg] měrná entalpie vody, a  $pf$  [hod] je denní pracovní fond.

V případě vody je výpočet proveden dle (3)

$$Q_{TO} = m_v \cdot c_p \cdot (T_{TO} - T_0) \quad (3)$$

kde  $Q_{TO}$  [kJ/h] je spotřebované teplo na ohřev vody,  $m_v$  [kg] množství vody,  $c_p$  [kJ/kg·K] je měrná tepelná kapacita vody,  $T_{TO}$  [°C] je požadovaná teplota vody,  $T_0$  [°C] teplota vody z vodovodního řádu (stanovena na 12 °C). Stejný výpočet (3) je použit i pro spotřebu tepla na přípravu TUV. Poslední variantou v modulu technologického ohřevu je využití termo oleje.

### 4.5 Modul akumulace

Akumulace je v tomto SW nástroji uvažována jako finální technologie pro uchování veškerého zbytkového tepla. Z tohoto důvodu je v navrhovaných scénářích akumulace vždy na posledním místě. Cílem je uložit veškeré zbytkové teplo v akumulární nádrži pro



později využití. Protože není řešena dynamika provozu, není ani řešena problematika vybíjení nádrže. Výpočet staví na bilančním přístupu, což je adekvátní účelu nástroje (výběr MT).

#### 4.6 Technicko-ekonomické vyhodnocení

Přínos jednotlivých scénářů je třeba posoudit na základě vhodných technických a ekonomických ukazatelů. Technicko-ekonomické vyhodnocení je provedeno ve dvou částech – vyhodnocení stávajícího stavu, který je zadán uživatelem na samém začátku a budoucího stavu po nahrazení hlavního zdroje plynovou MT. Následně je stanoven ekonomický efekt, který změna přinese.

Pro vyhodnocení stávajícího stavu jsou stanoveny celkové roční náklady za energie a vodu [Kč]. Obdobné vyhodnocení je provedeno i pro plynovou MT. Z výkonu MT, denního pracovního fondu a počtu pracovních dní je určeno množství produkované elektrické a tepelné energie, a také odpovídající spotřeba zemního plynu. Dále jsou do provozních nákladů zahrnuty náklady na vodu a servisní náklady MT v podobě roční paušální částky. Následně je porovnána elektrická spotřeba zadaná a produkovaná MT. Dále je vyčíslena úspora primární energie ÚPE [%], kde je porovnán kogenerační zdroj s referenčními zdroji. V případě MT je tepelná účinnost porovnána s plynovým parním kotlem. Pro posouzení elektrické účinnosti je referenčním zdrojem elektrárna centrální sítě:

Kombinovaná účinnost MT  $\eta_o$  [%] (4) udává podíl produkované energie, elektrické  $P_{el}$  [kWh/rok] a tepelné  $Q_t$  [kWh/rok], k množství použitého paliva  $CON_{ZP}$  [kWh/rok]:

$$\eta_o = \frac{Q_t + P_{el}}{CON_{ZP}} \cdot 100 \quad (4)$$

Po získání provozních a investičních nákladů je provedeno ekonomické vyhodnocení. Protože je návrh uvažován pro nahrazení stávajícího zdroje za plynovou MT, jedinou investiční položkou je pořizovací cena MT.

Výše popsané parametry jsou zhodnoceny pomocí diskontního peněžního toku (DCF) (5) a diskontní doby návratnosti (DPB) (6). Diskontní sazba [%] byla stanovena na 5 % (ČNB, 2022). Diskontní peněžní tok je určen z rozdílu výnosů a nákladů se zohledněním diskontní sazby.

$$DCF = \sum_i^n \frac{(výnosy - náklady)_i}{(1 + r)^i} \quad (5)$$

$$DPB = \frac{inv_i - DCF_i}{DCF_i - DCF_{i+1}} \quad (6)$$

kde  $i$  je označení daného roku,  $r$  je diskontní sazba [%] a  $inv$  [Kč] je počáteční investice.

Jak bylo zmíněno v úvodu práce, pro dobrou návratnost plynové MT je kritický poměr cen elektrické energie a zemního plynu. Z tohoto důvodu je součástí SW nástroje i citlivostní analýza provedená pro každou výkonovou variantu plynové MT, kde hlavním parametrem je návratnost investice popsána výše a proměnné tvoří cena za elektřinu a zemní plyn.

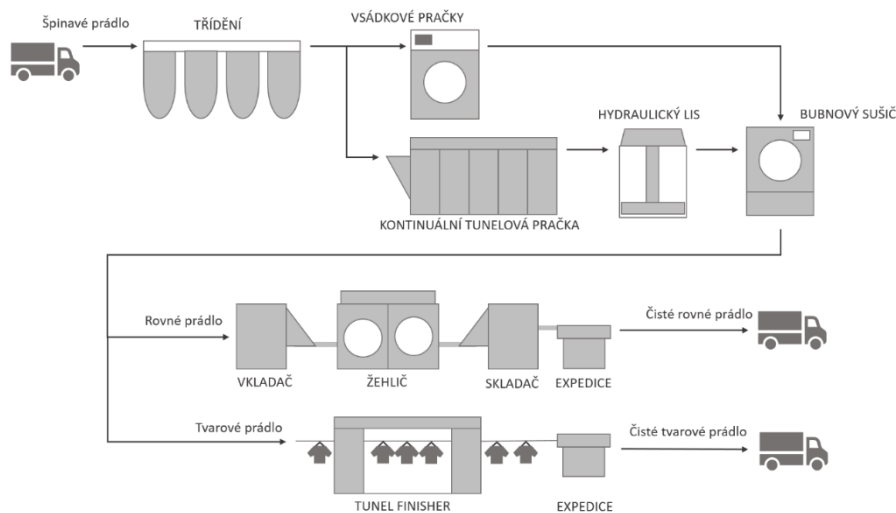
## 5 Příklad integrace mikroturbíny do prádelenského provozu

*Kapitola je založena na publikaci KONEČNÁ E., MÁŠA, V.; MIKLAS, V.; SLOVÁK, R.; JÖRDENING, A.; BLAHA, V. Gas Microturbine as a main source of energy for industrial laundry – feasibility study. Přijato k recenznímu řízení do časopisu Energy.*

Cílem prádelenského procesu je umožnit znovu využití textilií a prádla z nemocnic, pohostinství nebo domácností. Průmyslové prádelnictví se velmi liší od domácího praní, především ve zpracovaném množství prádla a maximálně možném nahrazení lidské práce pomocí strojního vybavení.

Schéma na Obr. 3 ukazuje celý proces údržby prádla, který je v různých modifikacích využíván celosvětově. Schéma také odpovídá případové studii, pro kterou byl zvolen provoz s kapacitou 10 t prádla/8 hod. Prádlo od zákazníka je vytríděno do kontinuální tunelové pračky, která je ve většině průmyslových prádelnách doplněna o vsádkové pračky, které slouží k odbavení malých objednávek a. Po vyprání, je odstraněna z prádla voda pomocí hydraulického lisu. K rozvolnění takto vzniklého "koláče" jsou využívány bubnové sušiče. Prádlo se zbytkovou vlhkostí zhruba 0,5 kg<sub>v</sub>/kg<sub>DL</sub> je dále sušeno nebo žehleno. Prádlo, které nevyžaduje žehlení je sušeno v bubnových sušičích. Strojové žehlení je prováděno bez předchozího sušení. Rovné prádlo je dál zpracováno v průmyslových žehličích, následně je prádlo baleno a odbaveno k expedici z prádelny zpět k zákazníkovi. Tvarové prádlo je žehleno v tzv. tunel finisheru, který využívá turbulentního proudu vzduchu s přímým nástřikem páry (120 °C) na prádlo.

Během praní je potřeba dodat velké množství vody o vysoké teplotě (až 90 °C). Navíc je prádlo následně mácháno v čerstvé vodě. Během sušení je všechna vlhkost z prádla odpařena v závislosti na druhu prádla a jeho dalšího zpracování. Odpařování je spojeno s velkým množstvím tepla a elektrickou energií pro otáčení bubny.



Obr. 3 Schéma jednotlivých operací v průmyslové prádelně

Případová studie odpovídá konkrétním spotřebám tepla a elektrické energie v současných prádelnách. Pro určení spotřeb pro jednotlivé operace byla sestavena skladba prádla, tak, aby co nejlépe reflektovala průměrnou prádelnu.

SW nástroj bude ověřen případové studii – moderní středně velký prádelenský provoz využívající odpadní teplo s kapacitou 10 t prádla/8 hod.

### 5.1 Případová studie – prádelenský provoz využívající odpadní teplo

Moderní prádelenské provozy využívají výměníků tepla pro zužitkování dostupných odpadních proudů. Nejčastěji se jedná o výměníky:

- voda-voda využívá odpadní vodu pracího tunelu k předehřevu máchací vody,
- vzduch-vzduch využívá vlhký vzduch ze sušiče pro ohřev vzduch do sušiče,
- vzduch-voda využívá vzduch z válcového žehliče pro ohřev prací vody,
- vzduch-vzduch využívá vzduch z tunel finisheru pro předehřev vzduchu do tunel finisheru. (Slovák, 2018)

Vstupní parametry pro středně velký prádelenský provoz jsou uvedeny v Tab. 5 uvedené níže.

Tab. 5 Vstupní data pro případovou studii

|                           |        |                       |
|---------------------------|--------|-----------------------|
| Zpracovatelská kapacita   | 10     | [tun/den]             |
| Provozní hodiny prádely   | 2000   | [hod/rok]             |
| Denní elektrická spotřeba | 1350   | [kWh/den]             |
| Denní spotřeba tepla      | 6100   | [kWh/den]             |
| Denní spotřeba plynu      | 10 000 | [kWh/den]             |
| Denní spotřeba vody       | 50     | [m <sup>3</sup> /den] |
| Cena elektřiny            | 5      | [Kč/kWh]              |
| Cena zemního plynu        | 0,9    | [Kč/kWh]              |
| Cena vody                 | 95     | [Kč/m <sup>3</sup> ]  |

Další část dat potřebná k vyhodnocení vhodnosti MT jako hlavního zdroje (viz Tab. 6), se vztahuje ke konkrétním spotřebičům tepla. Případová studie je zaměřena na přímé sušení, ohřev vody pro prací proces a žehlení.

Tab. 6 Vstupní parametry případové studie – spotřebiče

|  |     |                   |
|--|-----|-------------------|
| Objem vody pro ohřev                   | 81  | [m <sup>3</sup> ] |
| Požadovaná teplota vody                | 80  | [°C]              |
| Objem vody k sušení                    | 0,6 | [m <sup>3</sup> ] |
| Požadovaná teplota teplé užitkové vody | 50  | [°C]              |
| Objem teplé užitkové vody              | 5   | [m <sup>3</sup> ] |
| Teplota vody k akumulaci               | 90  | [°C]              |

### Výsledky případové studie

V případě této modelové prádely jsou klíčovými operacemi sušení a žehlení a také technologický ohřev vody pro prací proces. Z tohoto důvodu jsou z vyhodnocení nejdůležitější scénáře 1–4, které na první místo staví právě sušení nebo technologický ohřev. Přehled scénářů a základních parametrů pro každou výkonovou variantu MT jsou uvedeny v Tab. 7 a Tab. 8.

Tab. 7 Vybrané parametry technicko-ekonomického hodnocení

| typ MT | elektřina<br>produkce<br>[kWh/rok] | nákup/prodej<br>elektřiny<br>[Kč/rok] | teplo<br>produkce<br>[kWh/rok] | spotřeba<br>zemního<br>plynu<br>[kWh/rok] | provozní<br>náklady MT<br>[Kč/rok] |
|--------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---|------------------------------------|
| C30    | 42 000                             | -1 477 500                            | 131 285                        | 215 222                                   | -2 858 700                         |
| C65    | 89 460                             | -1 240 200                            | 236 913                        | 388 383                                   | -2 777 244                         |

|              |           |           |           |           |            |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| <b>C200</b>  | 262 200   | -376 500  | 562 021   | 921 346   | -2 393 211 |
| <b>C600</b>  | 763 800   | 763 503   | 1 729 295 | 2 834 910 | -2 975 415 |
| <b>C800</b>  | 1 018 400 | 1 219 492 | 2 291 316 | 3 756 255 | -3 348 638 |
| <b>C1000</b> | 1 273 000 | 1 675 481 | 2 896 569 | 4 748 474 | -3 785 646 |

Tab. 8 Vybrané scénáře pro moderní prádelenský provoz

| scénář 1 DRY, TO, TUV, AKU |                   |          |                   |       |                   |
|----------------------------|-------------------|----------|-------------------|-------|-------------------|
| typ MT                     | dostupné teplo po |          | dostupné teplo po |       | objem vody k      |
|                            | DRY               | TO       | TUV               | AKU   |                   |
|                            | [kWh]             | [kWh]    | [kWh]             | [kWh] | [m <sup>3</sup> ] |
| <b>C30</b>                 | 88,98             | -6208,52 | -6428,46          |       | -71,19            |
| <b>C65</b>                 | 511,49            | -5786,00 | -6005,95          |       | -66,51            |
| <b>C200</b>                | 1811,92           | -4485,57 | -4705,52          |       | -52,11            |
| <b>C600</b>                | 6481,02           | 183,52   | -36,43            |       | -0,40             |
| <b>C800</b>                | 8729,10           | 2431,61  | 2211,66           |       | 24,49             |
| <b>C1000</b>               | 11 150,12         | 4852,62  | 4632,67           |       | 51,31             |

| scénář 2 DRY, TUV, TO, AKU |                   |           |                   |       |                   |
|----------------------------|-------------------|-----------|-------------------|-------|-------------------|
| typ MT                     | dostupné teplo po |           | dostupné teplo po |       | objem vody k      |
|                            | DRY               | TUV       | TO                | AKU   |                   |
|                            | [kWh]             | [kWh]     | [kWh]             | [kWh] | [m <sup>3</sup> ] |
| <b>C30</b>                 | 88,98             | -130,97   | -6428,46          |       | -71,19            |
| <b>C65</b>                 | 511,49            | 291,54    | -6005,95          |       | -66,51            |
| <b>C200</b>                | 1811,92           | 1591,97   | -4705,52          |       | -52,11            |
| <b>C600</b>                | 6481,02           | 6261,07   | -36,43            |       | -0,40             |
| <b>C800</b>                | 8729,10           | 8509,15   | 2211,66           |       | 24,49             |
| <b>C1000</b>               | 11 150,12         | 10 930,17 | 4632,67           |       | 51,31             |

Je patrné, že MT typu C30, C65 a C200, nesplňují základní předpoklad pokrytí tepelných spotřeb jednotlivých spotřebičů. V případě MT C800 je akumulace přes 24 m<sup>3</sup>, což tvoří celkovou polovinu spotřeby vody pro prací proces, a pro MT C1000 s více než 50 m<sup>3</sup> která by pokryla kompletní spotřebu vody prádelny. Nicméně, by se jednalo o velké zásobníky teplé vody, které představují prostorově i ekonomicky náročné řešení. To může být jedním z rozhodujících kritérií, které hovoří ve prospěch využití MT typu C600.

U prádelenského provozu je nutné upozornit i na proces žehlení a jeho energetickou náročnost. Měrná spotřeba pro válcové žehlení je 0,61 kWh/kg<sub>DL</sub>, pro tunel finisher 0,96 kWh/kg<sub>DL</sub>. Podle skladby prádla je spotřeba na žehlení, jak na válcových žehličích i

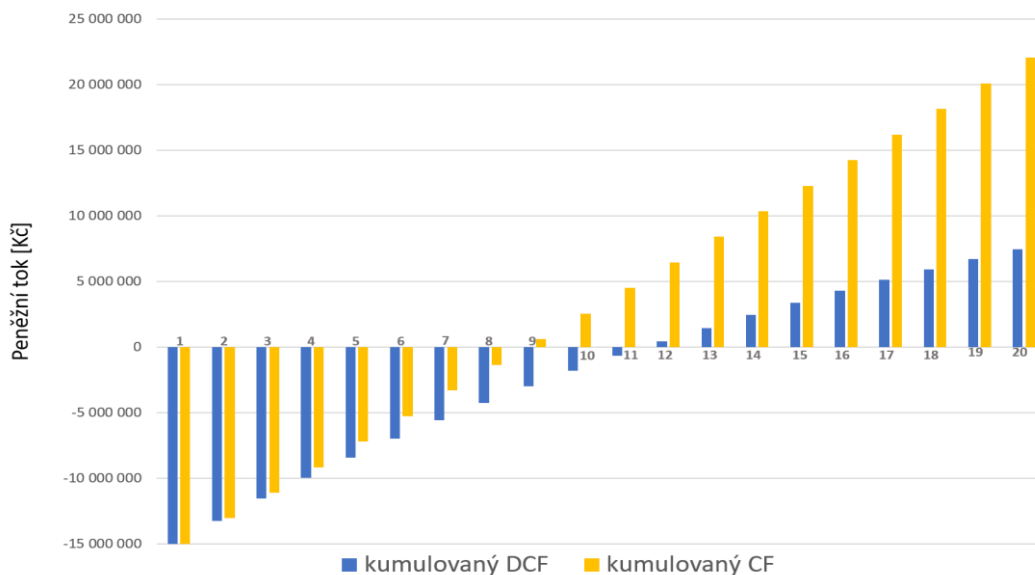
v tunel finisheru, stanovena na 6380 kWh/den. **Proto jsou nejvýhodnější scénáře 1 a 2, kdy po sušení zbývá dostatek tepla na pokrytí spotřeby žehlení.** Ohřev prací vody je potom nutné realizovat z odpadních proudů, které jsou v prádelenském procesu dostupné, jak bylo uvedeno v úvodu této kapitoly. Obdobně pak může být realizována i akumulace teplé vody.

Hlavním kritériem při takto nákladné investici je její návratnost. Ta souvisí s kombinovanou účinností zdroje. Z Tab. 9 je potom zřejmé, která výkonová varianta MT je nejvýhodnější. S pracovním fondem 8 hodin za den, 250 dní v roce to odpovídá právě 20 rokům do nákladného servisního zásahu po 40 000 hodinách. Z tohoto důvodu je doporučeno, aby návratnost nepřekročila tuto dobu. Tomuto požadavku vyhovuje MT typ C600, kde je návratnost 11,6 let. Všechny MT však vykazují vysokou kombinovanou účinnost, nad 87,5 % a úsporu primární energie nad 46 %.

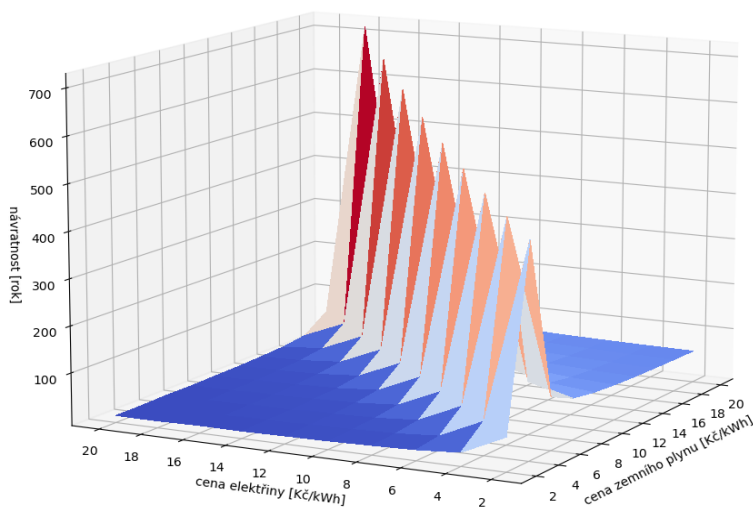
**Tab. 9** Technické a ekonomické parametry pro vybrané výkonové varianty MT

| typ MT | kombinovaná účinnost<br>[%] | ÚPE<br>[%] | návratnost<br>[rok] |
|--------|-----------------------------|------------|---------------------|
| C600   | 87,94                       | 46,31      | 11,6                |
| C800   | 88,11                       | 46,31      | 14,9                |
| C1000  | 87,81                       | 46,31      | 47,7                |

Na Obr. 5 je graficky znázorněn kumulovaný peněžní tok (CF) a kumulovaný diskontní peněžní tok (DCF). V případě MT je důležitým parametrem její návratnosti poměr ceny elektřiny a zemního plynu. Z tohoto důvodu byla provedena citlivostní analýza, jejíž grafické znázornění je na Obr. 4. S rostoucí cenou elektrické energie je MT, díky produkci elektrické energie pro pokrytí vlastní spotřeby, výhodnější. Tento efekt ovšem může potlačit cena za jednotku zemního plynu, která svou rostoucí cenou návratnost zvyšuje. S rostoucím rozdílem v cenách elektřiny a zemního plynu je návratnost MT lepší.



Obr. 5 Peněžní toky pro investici do MT C600



Obr. 4 Citlivostní analýza ro MT C600

V případě, že by stejnému vyhodnocení byla podrobena práderna se stejnými provozními parametry **bez využití odpadního tepla** výsledky budou výrazně jiné. Celková roční

spotřeba takové prádelny je 2834 MWh/rok, čemuž odpovídá pouze největší z nabízených variant, mikroturbína C1000. Ta sice pokryje všechny spotřebiče i akumulaci, ale její návratnost je 23,5 roku, což naráží na technické limity MT. Na tomto příkladu je jednoznačně patrná nutnost využití dostupného odpadního tepla, které se v provozu nachází, obzvláště před výběrem nového hlavního zdroje energie.

## 5.2 Shrnutí a diskuze výsledků

Nově vyvinutý SW nástroj poskytuje 36 scénářů integrace plynové MT do provozu. Tyto scénáře jsou sestaveny na základě 24 vstupních dat, které popisují možnosti plynové mikroturbíny a pokrytí spotřeb zvolených spotřebičů tepla. Finální rozhodnutí o investici je možné provést na základě technicko-ekonomického vyhodnocení jednotlivých scénářů. Výběr řešení však probíhá individuálně a zůstává v rukou uživatele tohoto SW nástroje. Předpokladem je odborná znalost sledovaného provozu a jeho potřeb, obzvláště v případech, kdy v provozu vystupují i další specifické spotřebiče tepla, které nejsou v připravených modulech a je potřeba je do SW zahrnout. Při detailní znalosti provozu však uživatel získá dostatečné údaje, aby mohl vyhodnotit vhodnost využití MT i v takovém případě.

Jak je patrné z případové studie v kap. 5.1, důležitým krokem k dosažení příznivých výsledků v případě prádelenského provozu je předchozí optimalizace a využití dostupného odpadního tepla. V opačném případě je integrace MT finančně nevýhodná a nemusí poskytovat očekávané úspory energie.

Výše prezentované výsledky ukazují, že MT je možný hlavní zdroj pro prádelenský provoz. Kombinovaná výroba elektřiny a tepla z MT pokryje většinu vlastní spotřeby provozu, u vyšších výkonů MT je možné přebytky prodávat do centrální sítě. Je však nutné zdůraznit, že při vysoké spotřebě tepla v procesu může dojít k pomyslné přeměně prádelny na výrobu elektrické energie, což není žádoucím výstupem. Navrhovaný přístup je z pohledu prádelenství přelomový tím, že maximalizuje využití paliva v kombinované výrobě s dobrými ekonomickými i ekologickými výhodami. MT je navíc flexibilní z pohledu paliva a může fungovat na bioplyn nebo skládkový plyn, čímž se z ní stává „zelený“ zdroj energie. Jak ukázala citlivostní analýza, aktuální poměr cen elektrické energie a zemního plynu je z pohledu MT velmi výhodný, a tak je návratnost investice příznivá.



Uváděný přístup je výstupem mnohaletého výzkumu, sběru dat a spolupráce několika průmyslových prádelen a inženýrských společností pro prádelenský průmysl. K efektivnímu přenesení SW nástroje do praxe je třeba prezentovat výsledky majitelům/operátorům prádelen a inženýrským společnostem z oboru. Následně je třeba hledat aplikace nejen pro prádelenské provozy, ale i jakékoliv další, kde je potenciál pro využití horkých spalin.

Výběr energetického zdroje pro prádelenský provoz je komplexní úloha, která musí být ve výsledku provedena pro konkrétní podmínky každé prádelny. Jedině tak je možné dosáhnout maximálního potenciálu úspor a optimálního fungování.

Novým příspěvkem k současným trendům a problematice integrace MT, který představuje tato dizertační práce, je SW nástroj poskytující úvodní zhodnocení možnosti využití plynové MT jako hlavního zdroje, které je rychlé, jednoduché a univerzální pro široké spektrum provozů.

## 6 Závěr

Snižování spotřeb primárních paliv, zvyšování účinnosti a využívání zdrojů kombinované výroby je dlouhodobě řešeným tématem s vytyčenými cíli na národní i evropské úrovni. Oblast průmyslu je dlouhodobě jedním z největších konzumentů elektrické energie a zemního plynu, kdy tvoří třetinu odběru těchto komodit. Obzvláště ve světle aktuálních událostí, které významně ovlivňují i trh s energiemi, je třeba věnovat pozornost snižování spotřeby primárních paliv a produkované energie. S tím je spojena i optimalizace existujících procesů, která se soustředí i na využití odpadního tepla dostupného v provozech. Další možností, jak zvýšit účinnost procesu, je využití zdrojů pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla.

Plynové mikroturbíny jsou moderní energetické jednotky kombinované výroby elektřiny a tepla vhodné pro komunální i průmyslovou oblast. Jejich využitím je podporován i koncept decentralizované výroby energie a budoucí možnost připojení do mikrosítě. Plynové mikroturbíny pracují s účinností až 90 % a mohou dosáhnout vysoké úspory primární energie.

Předností plynových mikroturbín jsou horké a čisté spaliny, které jsou cenným zdrojem tepelné energie. To dělá z mikroturbíny výborný zdroj pro energeticky náročné provozy s vysokou spotřebou tepla, kde je možné přímé využití spalin, jako je profesionální údržba prádla, který je specifický vysokou spotřebou vody a tepla.

Aby mohla být mikroturbína použita jako vhodný zdroj, je potřeba správně zvolit její výkon a způsob jejího začlenění do provozu. Metodika integrace plynové mikroturbíny se skládá ze (1) sběru dat o provozu, na jejichž základě je (2) vyhodnocen stávající stav a potřeby provozu, a (3) výběru vhodné výkonové varianty mikroturbíny. Tento postup je možné zobecnit pro libovolný proces, a s tímto záměrem byl vytvořen **softwarový nástroj pro vyhodnocení integrace plynové mikroturbíny** do sledovaného provozu.

Na základě dat o spotřebě energie a paliv, jejich cen a základních spotřebičích tepla se hodnotí využití mikroturbínou produkované energie pro jednotlivé spotřebiče – přímé sušení pomocí spalin z mikroturbíny, technologický, předehřev/ohřev teplé užitkové vody a akumulace přebytečného tepla, a je provedeno technicko-ekonomické vyhodnocení. Softwarový nástroj byl ověřen na případové studii středně velké průmyslové prádelny, kdy byly testovány dvě varianty – moderní optimalizovaná prádelna využívající dostupné odpadní teplo a starší prádelna.

Pro moderní prádelnu byla vybrána mikroturbína o výkonu 600 kW<sub>e</sub> s návratností kolem 11 let. Tato mikroturbína pokryje spotřebu na přímé sušení prádla a žehlení, ohřev vody může být realizován pomocí odpadního tepla z těchto spotřebičů. V případě starší prádelny by bylo nutné použití největší výkonové varianty mikroturbíny o 1000 kW<sub>e</sub>. V tomto případě mikroturbína pokryje spotřebu všech spotřebičů, které v prádelně jsou (ohřev prací vody, přímé sušení, žehlení, ohřev teplé užitkové vody) a přebytečné teplo je akumulováno. Nicméně, investice do této mikroturbíny je velmi vysoká a návratnost vychází přibližně na 23,5 let. Takto vysoká návratnost naráží na technické limity mikroturbíny a je zcela nerentabilním řešením.

Softwarový nástroj poskytuje jednoduché vyhodnocení, které může být použito k úvahám při výměně zdroje a pro seznámení se s možnostmi plynové mikroturbíny. Výše uvedené porovnání ale ukazuje důležitost energetické optimalizace průmyslových provozů, obzvláště před výběrem a integrací nového hlavního zdroje. Právě vysoká návratnost může být vhodným ukazatelem potřeby energetické optimalizace procesu, jehož vysoké nároky není možné výměnou zdroje energie efektivně zajistit.

Vzhledem k tomu, že návrh integrace plynové mikroturbíny je komplexní úlohou, existuje značný prostor pro další vývoj softwarového nástroje. Díky použití univerzálního programovacího jazyka Python je možné nástroj postupně rozšiřovat o další funkce, například:

- rozšíření o další zdroje (kombinace mikroturbíny s dalším zdrojem, kombinace více mikroturbíny pro přesný výkon, nová paliva)
- návrh doplňujících zařízení (nádrže, tepelné výměníky apod.)
- automatické hodnocení získaných scénářů (na základě návratnosti, účinnosti, zisků, emisí a dalších)
- volba jednotek a grafické rozhraní pro uživatele.

Softwarový nástroj může být také rozšiřován o nové spotřebiče energie na míru sledovaného provozu. Důležitým aspektem je však cílit na přednosti plynové mikroturbíny – přímé využití spalín – jedině tak je možné dosáhnout jejího optimálního využití.

## Seznam zdrojů

- AL MOUSSAWI, Houssein, Farouk FARDOUN a Hasna LOUAHLIA, 2017. Selection based on differences between cogeneration and trigeneration in various prime mover technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. **74**, 491–511. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/J.RSER.2017.02.077.
- BASU, Ashoke Kumar, S. P. CHOWDHURY, S. CHOWDHURY a S. PAUL, 2011. *Microgrids: Energy management by strategic deployment of DERs - A comprehensive survey* [online]. 1. prosinec 2011. B.m.: Pergamon. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2011.07.116.
- CHEN, C., S. DUAN, T. CAI, B. LIU a G. HU, 2011. Smart energy management system for optimal microgrid economic operation. *IET Renewable Power Generation* [online]. **5**(3), 258–267. ISSN 17521416. Dostupné z: doi:10.1049/iet-rpg.2010.0052.
- ČNB, 2022. *Jak se vyvíjela diskontní sazba ČNB? - Česká národní banka* [online] [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/casto-kladene-dotazy/Jak-se-vyvijela-diskontni-sazba-CNB/>.
- FERREIRA, Vitor R., Cátia M. AUGUSTO, José B. RIBEIRO, Adélio R. GASPAS a José J. COSTA, 2014. Increasing the efficiency of high temperature furnaces through a topping cycle cogeneration—a case study. *Energy Efficiency* [online]. **8**(1), 85–95. ISSN 15706478. Dostupné z: doi:10.1007/s12053-014-9278-2.
- HWANG, Yunho, 2004. Potential energy benefits of integrated refrigeration system with microturbine and absorption chiller. *International Journal of Refrigeration* [online]. **27**(8), 816–829. ISSN 0140-7007. Dostupné z: doi:10.1016/J.IJREFRIG.2004.01.007.
- ISMAIL, M. S., M. MOGHAVVEMI a T. M.I. MAHLIA, 2013. Current utilization of microturbines as a part of a hybrid system in distributed generation technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. **21**, 142–152. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2012.12.006.
- KALANTAR, M. a S. M. MOUSAVI G., 2010. Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage. *Applied Energy* [online]. **87**(10), 3051–3064. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/J.APENERGY.2010.02.019.
- KANCHEV, Hristijan, Di LU, Frederic COLAS, Vladimir LAZAROV a Bruno FRANCOIS, 2011. Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. **58**(10), 4583–4592. ISSN 02780046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2011.2119451.
- KLINT, Erik a Gregory PETERS, 2021. Sharing is caring—the importance of capital goods when assessing environmental impacts from private and shared laundry systems in Sweden. *The International Journal of Life Cycle Assessment* [online]. **1**, 3 [vid. 2021-06-29]. Dostupné z: doi:10.1007/s11367-021-01890-5.
- LEDGER, Laundry, 2020. *JENSEN CleanTech-For the Future | Laundry Ledger* [online] [vid. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://laundryledger.com/jensen-cleantech-for-the-future/>.
- LU, Z, C WANG, Y MIN, S ZHOU, J LU a Y WANG, 2007. Overview on Microgrid Research. *Automation of Electric Power Systems* [online]. **31**(19), 100–107 [vid. 2020-06-04]. Dostupné z: <http://www.aeps-info.com/aepsen/article/abstract/200705072>.

- MÁŠA, Vítězslav, Petr BOBÁK a Marek VONDRA, 2017. Potential of gas microturbines for integration in commercial laundries. *Operational Research* [online]. **17**(3), 849–866. ISSN 18661505. Dostupné z: doi:10.1007/s12351-016-0263-8.
- MOON, Dami, Eri AMASAWA a Masahiko HIRAO, 2020. Consumer Motivation and Environmental Impact of Laundry Machine-Sharing: Analysis of Surveys in Tokyo and Bangkok [online]. Dostupné z: doi:10.3390/su12229756.
- NELSON, James, Nathan G. JOHNSON, Pinchas DORON a Ellen B. STECHEL, 2018. Thermodynamic modeling of solarized microturbine for combined heat and power applications. *Applied Energy* [online]. **212**, 592–606. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2017.12.015.
- PANTALEO, A. M., S. M. CAMPOREALE a N. SHAH, 2013. Thermo-economic assessment of externally fired micro-gas turbine fired by natural gas and biomass: Applications in Italy. *Energy Conversion and Management* [online]. **75**, 202–213. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2013.06.017.
- ROSEN, Marc A., Minh N. LE a Ibrahim DINCER, 2005. Efficiency analysis of a cogeneration and district energy system. *Applied Thermal Engineering* [online]. **25**(1), 147–159. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2004.05.008.
- SLOVÁK, Rostislav, 2018. *Technicko-ekonomické hodnocení systému pro využití odpadního tepla z plynové mikroturbíny*. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 83 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.
- WASSERBAUR, Raphael, Tomohiko SAKAO, Maria LJUNGGREN SÖDERMAN, Andrius PLEPYS a Carl DALHAMMAR, 2020. What if everyone becomes a sharer? A quantification of the environmental impact of access-based consumption for household laundry activities. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. **158**, 104780. ISSN 18790658. Dostupné z: doi:10.1016/j.resconrec.2020.104780.
- ZACHAR, Michael, Milana TRIFKOVIC a Prodromos DAOUTIDIS, 2014. Policy effects on microgrid economics, technology selection, and environmental impact. *Computers and Chemical Engineering* [online]. **81**, 364–375. ISSN 00981354. Dostupné z: doi:10.1016/j.compchemeng.2015.03.012.
- ZHANG, Yu, Nikolaos GATSIIS a Georgios B. GIANNAKIS, 2013. Robust energy management for microgrids with high-penetration renewables. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* [online]. **4**(4), 944–953. ISSN 19493029. Dostupné z: doi:10.1109/TSTE.2013.2255135.

# Životopis

**Ing. EVA KONEČNÁ**

**\*1993**

**Brno**

**Konecna.eva.1@gmail.com**

---

## VZDĚLÁNÍ

2017 – 2022 Konstrukční a procesní inženýrství (Ph.D.), Vysoké učení technické v Brně

2015 – 2017 Procesní inženýrství (Mgr.), Vysoké učení technické v Brně

2012 – 2015 Základy strojínského inženýrství (Bc.), Vysoké učení technické v Brně

2008 – 2012 Gymnázium J. G. Mendela, Brno

---

## PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

2017 – 2022 vědecký/technický pracovní Vysoké učení technické v Brně

- publikování odborných článků a recenzní činnost (odborné články, závěrečné práce)
  - spolupráce na přípravě a řešení projektů
  - výuka přednášek a cvičení bakalářského a magisterského
  - vedení závěrečných prací (prezenční i distanční forma)
  - vykonávání funkce tajemník komise pro státní závěrečnou zkoušku
  - vedení studentských exkurzí v odborných laboratořích, spoluorganizace studentských pobytů
  - koordinace stáží zahraničních studentů
  - aktivní účast na odborných konferencích (ústní prezentace, poster)
  - účast na organizaci vědeckých konferencí
  - tvorba manuálu kvality a provozního řádu odborného pracoviště
  - práce v odborné laboratoři a její organizace
- 

## IT ZNALOSTI

Microsoft Office – pokročilý uživatel

Libre Office – pokročilý uživatel

Python – základní uživatel

AutoCAD – základní uživatel

## JAZYKOVÉ ZNALOSTI

český jazyk – rodilý mluvčí

anglický jazyk – úroveň C1

německý jazyk – začátečník

## **Abstrakt**

Vzhledem k současné napjaté energetické situaci vzniká potřeba vysoce efektivního využívání primárních zdrojů energie. Jako jedna z cest se nabízí využití plynových mikroturbín, které pracují s elektrickou účinností okolo 30 % a dalších 50 % energie nabízí v horkých spalinách. Právě využití tohoto odpadního tepla je klíčové k dosažení vysoké kombinované účinnosti výroby a úspor primární energie. Práce představuje metodiku integrace plynových mikroturbín do průmyslových provozů, na jejímž základě je vytvořen unikátní softwarový nástroj pro výběr plynové mikroturbíny a efektivní využití odpadního tepla z produkovaných spalin, jehož hlavní výhodou je univerzální charakter a snadná adaptovatelnost na další průmyslové procesy. Funkčnost nástroje byla ověřena na případové studii průmyslové prádely. Obecně platí, že je třeba nejdříve provést energetickou optimalizaci a až poté začít s výběrem vhodného zdroje energie. Při správné integraci je možné dosáhnout kombinované účinnosti plynové mikroturbíny až 90 % a přijatelné návratnosti. Navržený softwarový nástroj je jednoduchou, rychlou, a především univerzální možností pro zhodnocení vhodnosti plynové mikroturbíny na základě běžných provozních znalostí o sledovaném procesu.

## **Abstract**

Current challenging energy situation gives rise to the need for highly efficient use of primary energy sources. Gas microturbines are a potential solution to this situation as they work with electric efficiency around 30 % and another 50 % is available in hot flue gas. Using this waste heat is essential for achieving high overall efficiency of production and minimizing the use of primary energy. This thesis introduces a methodology for integration of gas microturbines into industrial operation, served as a basis for creating a unique software tool for selecting an optimal gas microturbine and efficient use of the waste heat from the produced flue gas. The biggest advantage, is its universality which allows adapting this software for other industrial processes. A laundry operation was selected for this case study. In general, it is necessary to firstly undergo an energy optimization before selecting a suitable power source. If integrated correctly, it is possible to achieve overall efficiency of the gas microturbine of up to 90 % and an acceptable payback period of the investment. The proposed software is an easy, quick, and most importantly universal tool for evaluating suitability of a gas microturbine based on common operational knowledge of the respective process.