



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

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Eva Konečná

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

BRNO 2022

Abstrakt

Vzhledem k současné napjaté energetické situaci vzniká potřeba vysoce efektivního využívání primárních zdrojů energie. Možným řešením této situace jsou plynové mikroturbíny, které jsou progresivním zdrojem kombinované výroby energie. Plynová mikroturbína pracuje s elektrickou účinností okolo 30 % a dalších 50 % se nachází v horkých spalínách. Právě využití tohoto odpadního tepla je klíčové k dosahování vysoké kombinované účinnosti výroby a úspor primární energie. Práce představuje metodiku integrace plynových mikroturbín do průmyslových provozů, na jejímž základě je vytvořen softwarový nástroj pro výběr plynové mikroturbíny a efektivní využití odpadního tepla z produkovaných spalin. Efektivním využitím se myslí především přímé sušení, technologický ohřev procesních proudů, příprava teplé užitkové vody a akumulace tepla. Metodika integrace plynové mikroturbíny do průmyslového provozu zahrnuje i technicko-ekonomické vyhodnocení investice.

Metodika je zpracovaná do podoby unikátního softwarového nástroje, který posoudí různé varianty integrace plynové mikroturbíny ve středně velké průmyslové prádelně a doporučí tu nejvýhodnější. Pro tvorbu nástroje byl použit programovací jazyk Python v kombinaci s MS Excel tak, aby byl nástroj jednoduše použitelný i bez specializovaných softwarů. Hlavní výhodou však je, že má univerzální charakter a lze ho snadno adaptovat na další průmyslové procesy. Uživatelé přitom stačí pouze běžné provozní znalosti o cílovém procesu. Jako případová studie byl vybrán prádelenský proces. Byla zpracována data z řady průmyslových prádelen v České republice. Ukázalo se, že důležitým kritériem pro volbu plynové mikroturbíny jako hlavního zdroje energie je poměr mezi potřebnou elektrickou a tepelnou energií. Zejména pro starší prádelenské provozy platí, že je třeba nejdříve provést jejich 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. Vhodný cílový proces pro integraci plynové mikroturbíny je takový, který využije největší přednost plynové mikroturbíny, kterou je produkce horkých a čistých spalin. Je třeba hledat procesy, kde lze maximum těchto spalin použít přímo, bez dalších nákladných aparátů pro přenos tepla. Sušení prádla v průmyslových prádelnách takovým procesem bezpochyby je.

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 represent a progressive source of combined heat and power production. Gas turbines work with electric efficiency around 30 % and another 50 % is hidden in hot flue gas. Leveraging 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. This methodology served as a basis for creating a software tool for selecting an optimal gas microturbine and setting up an efficient use of the waste heat from the produced flue gas, specifically direct drying, technological heating of process streams, preparation of warm utility water, and heat accumulation. It also includes technical-economic evaluation of the investment.

The methodology is represented by a unique software tool which evaluates various alternatives of a gas microturbine integration into a mid-sized industrial laundry, and recommends the most favourable option. The tool was built using programming language Python in combination with MS Excel to offer great ease of use without a need for any specialized software. The biggest advantage, however, is its universality which allows adapting this software for other industrial processes. It is sufficient for the user to only have a standard operational knowledge of the target process. A laundry operation was selected for this case study, and data from several industrial laundries in Czech republic was collected. Its analysis revealed that the ratio of required electrical and heat energy is an important criterium when selecting a gas microturbine as the main power source. Specifically for older laundry operations, 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. A suitable target process for integrating the gas microturbine is one that leverages the gas microturbine's biggest advantage – production of hot and clean flue gas. It is necessary to look for those processes where a maximum of this flue gas can be used directly without a need for any other costly devices for heat transfer. Drying in laundries certainly represents such a process.

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.

Klíčová slova

plynová mikroturbína, kombinovaná výroba energie, odpadní teplo, softwarový nástroj, prádelenský proces

Key words

gas microturbine, combined heat and power, waste heat, software tool, laundry process

Bibliografická citace

KONEČNÁ, Eva. *Simulační nástroj pro integraci plynové mikroturbíny do průmyslových provozů*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137814>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Vítězslav Máša.

Poděkování

Ráda bych na tomto místě poděkovala všem, kteří i v průběhu studia byli oporou po odborné i osobní stránce, bez nichž by tato práce nevznikla. Děkuji mému školiteli doc. Ing. Vítězslavovi Mášovi, Ph.D. za možnost být součástí týmu Laboratoře energeticky náročných procesů, cenné připomínky a odborné rady, nejen k této práci. Děkuji mému školiteli specialistovi Ing. Mgr. Marku Vondrovi, Ph.D., kolegovi Ing. Michalu Toušovi, Ph.D., který řešil nejméně „error“. Děkuji kolegyním Ing. Dominice Babičce Fialové a Ing. Michaele Procházkové za psychickou podporu, stylistické rady a nekonečné přívaly smíchu. Děkuji všem kolegům z Ústavu procesního inženýrství za přátelské vztahy a dobrou náladu na pracovišti, a vedení ústavu za poskytnutí zázemí pro odbornou činnost.

Zvláštní poděkování patří mé rodině – rodičům, starší sestře a mému partnerovi, kteří moje studium podporovali od samého začátku.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracovala samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Vítězslava Máši, Ph.D., na základě vlastních poznatků získaných při studiu a konzultací s odborníky a že jsem veškeré literární a obrazové prameny správně a úplně citovala.

V Brně dne 16. 5. 2022

Ing. Eva Konečná

Obsah

1	Úvod a cíle práce	5
2	Plynová mikroturbína jako kombinovaný zdroj.....	11
2.1	Využití plynové mikroturbíny v průmyslu.....	11
2.1.1	Plynová mikroturbína v kogeneračních a trigeneračních systémech	15
2.1.2	Plynová mikroturbína a mikrosítě	17
2.1.3	Plynová mikroturbína v prádelenství	24
2.2	Metodika integrace plynové mikroturbíny do průmyslu	30
3	Softwarový nástroj pro integraci plynové mikroturbíny.....	33
3.1	Modul mikroturbíny	37
3.2	Modul přímého sušení.....	39
3.3	Modul pro technologický ohřev	39
3.4	Modul pro přípravu TUV.....	42
3.5	Modul akumulace	42
3.6	Technicko-ekonomické vyhodnocení.....	43
3.7	Výpis výsledků	45
4	Integrace mikroturbíny do prádelenského provozu	47
4.1	Moderní prádelenský provoz využívající odpadní teplo.....	49
4.1.1	Výsledky pro moderní prádelenský provoz využívající odpadní teplo ...	51
4.2	Starší průmyslová prádelna bez využití odpadního tepla	56

4.2.1	Výsledky pro starší průmyslovou prádelnu bez využití odpadního tepla	57
4.3	Shrnutí a diskuze výsledků.....	61
5	Závěr	65
	Seznam zdrojů	69
	Přehled publikační, pedagogické a tvůrčí činnosti	81
	Přílohy.....	87

Seznam použitých symbolů a zkratk

zkratky

AKU	akumulace
BOD	biochemická spotřeba kyslíku
CAGR	roční tempo růstu (compound annual growth rate)
DRY	sušení
ERÚ	Energetický regulační úřad
EPC	Energy performance contracting
EU	Evropská unie
IAPWS	International Association for the properties of water and steam
KVET	kombinovaná výroba elektřiny a tepla
LENP	Laboratoř energeticky náročných procesů
LFC	linear Fresnel collector
LPG	zkapalněný plyn (liquid petroleum gas)
MT	mikroturbína
OP TAK	Operační program Technologie a aplikace pro konkurenceschopnost
ORC	organický Rankinův cyklus
OZE	obnovitelný zdroj energie
SOFC	Solid oxide fuel cells
SW	software/softwareový
TO	technologický ohřev
TUV	teplá užitková voda

symboly

CF	Kč	peněžní tok (cash flow)
CON	kWh/den	spotřeba
c_p	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	měrná tepelná kapacita
DCF	Kč	diskontovaný peněžní tok (discounted cash flow)
inv	Kč	investice
l_v	kJ/kg	měrné skupenské teplo varu
m	kg	hmotnost

\dot{m}	kg/h	hmotnostní průtok
η	%	účinnost
P	kW	výkon
pf	hod	denní pracovní fond
Q	kWh	tepelná energie
r	%	diskontní sazba
ρ	kg/m ³	hustota
T	°C	teplota
ÚPE	%	úspora primární energie
V	m ³	objem

indexy

0	voda z řádu
AKU	akumulace
DL	suché prádlo
e^T	elektrická účinnost mikroturbíny
el	elektrická
i	i-tý
olej	termo olej
pára	pára
q^T	tepelná účinnost mikroturbíny
r^E	referenční hodnota elektrické účinnosti
r^V	referenční hodnota tepelné účinnosti
suš	sušení
t	tepelný
TO	technologický ohřev
v	voda
zb	zbytkový
ZP	zemní plyn

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. Plnění těchto dílčích cílů vede ke konceptu nízko uhlíkové ekonomiky naplánovaném pro rok 2050 (Ciucci, 2021). Současně je také prosazován koncept decentralizované výroby energie. Ten přináší především zlepšení fungování energetické sítě z pohledu stability a zatížení. Další přednosti spočívají ve snížení emisí CO₂, 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.

Dle Malinauskaite et al. (2019) došlo v Německu a Spojeném království zvýšením účinnosti využívání primárních zdrojů ke snížení spotřeby zemního plynu o 30 %. Tato úspora přispěla i ke snížení odběrových špiček a tím i spotřeby, která by odpovídala jejich pokrytí, a také ke zlepšení stability energetického systému. Nicméně i přes tyto snahy a mírně klesající trend zůstává oblast průmyslu 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. Takovéto systémy potom dosahují celkové účinnosti výroby energie 85-90 %. Jejich zavádění je podporováno systémem dotací pro energeticky efektivní zdroje kombinované výroby elektrické a tepelné energie (KVET). Mohou také přispět k dosažení cílů v integraci chytrých sítí (*smart grid*) (Isa et al., 2018).

Kogenerační jednotky mohou být součástí energetické sítě nebo fungovat i nezávisle na ní. Mohou být provozovány jen pro pokrytí nejvytíženějších částí dne, kdy je spotřeba energie vysoká, nebo mohou sloužit jako primární zdroje energie provozované kontinuálně. Tím jsou kogenerační jednotky maximálně variabilními pro různé druhy použití. Mezi kogenerační zdroje kromě plynových mikroturbín (MT) do výkonu až 500 kW, patří i parní turbíny, pístové motory, nebo palivové články.

Přestože vývoj plynových mikroturbín se datuje už do 50. let 20. století, řadí se mikroturbíny stále mezi progresivní zařízení. Jedná se o dobře známou technologii, která poskytuje celou řadu možností pro její aplikaci a použití. 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.

Práce se zaměřuje na malé a střední podniky, které tvoří 99 % všech podniků Evropské unie (Gouardères, 2021). Z dostupných podkladů vyplývá, že spotřeba takových podniků se obvykle pohybuje v rozmezí desítek kW až jednotek MW (Viesi et al. 2017). Evropská unie těmto podnikům umožňuje snížit finanční zátěž spojenou s modernizací energetických systémů řadou dotačních programů. V současnosti je to například – Operační program Technologie a aplikace pro konkurenceschopnost (OP TAK) nebo program EFEKT III (OPTAK, 2022). Dalším benefitem jsou „zelené“ bonusy pro KVET, na které je možné dosáhnout i s plynovou MT.

Pro dosažení vysoké efektivity procesu je důležité využít všechny dostupné proudy a technologie. V případě KVET je klíčové využití tepla pro dosažení vysoké kombinované účinnosti a nesmí být opomenuty ani 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. Existují SW řešení, která jsou schopna vytvářet komplexní modely a simulace, avšak pro úvodní vyhodnocení zvoleného řešení se jedná o finančně a časově náročné postupy. Pro správné fungování modelu je často nutné dodat velké množství dat, která provozovatel v mnoha případech nemá k dispozici.

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

zdroje energie. Hlavním požadavkem na tento nástroj je především univerzálnost, tak aby byl použitelný s minimálními zásahy pro větší rozsah průmyslových procesů. Dalším požadavkem pak je dostupnost tohoto nástroje, proto byl využit programovací jazyk Python v kombinaci s Microsoft Excel. Cílem je vytvořit jednoduchý výstup pro provozovatele, na jehož základě může dále rozvíjet zájem o dané řešení.

Jak bylo zmíněno výše, pro vysokou účinnost KVET je v případě MT nutné maximálně využít horké spaliny, proto je MT vhodnou jednotkou pro energeticky náročné procesy, které spotřebovávají velké množství tepla. Příkladem takového procesu je profesní péče o prádlo. Prádelenské provozy využívají velké množství tepla, vody a ve většině případů je jako hlavní palivo využíván zemní plyn. Tyto skutečnosti přispívají k předpokladu, že MT může být slibným zdrojem právě pro tento proces. Navíc, sektor profesní péče o prádlo je pevně navázán na zdravotní péči a turismus. Celosvětová tržní cena čistíren a prádelen je přibližně 70 mild. \$ (Wood, 2019) a předpokládá se růst o 4 % CAGR v následujících pěti letech (Globenewswire, 2020). Dalším argumentem ke zvýšení zájmu o energetickou efektivitu prádelenství, je již zmíněné globální zvyšování cen za energii a zemní plyn. S energeticky efektivními operacemi je možné zachovat vysokou kvalitu zpracování prádla a zvýšit udržitelnost procesu. Na základě těchto důvodů, a také předchozí zkušenosti z výzkumu v prádelenském sektoru, je průmyslová prádelna vybrána jako hlavní případová studie pro ověření softwarové (SW) nástroje.

Hlavním cílem práce je tvorba softwarového nástroje, který vyhodnotí vhodnost integrace plynové mikroturbíny do průmyslových provozů. 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. Disertační práce si klade za cíl tuto metodiku zformulovat a implementovat ji v softwarovém nástroji, který umožní integraci MT do vybraného systému, aby bylo dosaženo vysoké energetické účinnosti celého systému, maximálního využití potenciálu plynové mikroturbíny a příznivé doby návratnosti investice.

Dílním cílem práce je vytvoření jednoduchého nástroje, který provede základní zhodnocení použití MT jako hlavního zdroje procesu, bez drahých komerčních softwarů. Ty jsou ve většině případů velmi komplexní a licence je proto velmi nákladná. Pokud bude existovat jednoduchý, a především dostupný nástroj na vyhodnocení investice do

MT, dojde ke zlepšení dostupnosti MT pro průmysl a tím i zavádění kombinované výroby energie do průmyslových provozů.

Práce byla systematicky rozdělena na dílčí cíle. Jejich přehled, spolu s použitými metodami jejich řešení a odkazy na jednotlivé kapitoly práce, je uveden v Tab. 1.

Tab. 1 Popis dílčích cílů práce s použitými metodami

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

Z rešerše odborné literatury a konzultace s odborníky z oboru byly získány postupy o současném přístupu integrace MT do průmyslových provozů a způsobu modelování těchto systémů. Hlavní výstupy z této rešerše jsou dále uvedeny v kap. 2. Z těchto informací také vychází metodika efektivní integrace MT. Ta uvádí parametry, které je nutné sledovat při samotném návrhu, aby byla MT atraktivním zdrojem energie pro sledovaný provoz.

Struktura SW nástroje je vybrána s ohledem na variabilitu využívání odpadního tepla ze spalin a možné rozšiřování jeho použití v dalších systémech. Proto je nástroj navrhován v podobě modulárního systému, který je blíže popsán v kap. 3, a to včetně podrobného popisu jednotlivých výpočetních modulů.

Potřebná data jsou získána na základě provozu vybrané plynové MT v Laboratoři energeticky náročných procesů (LENP), výzkumného centra NETME Centre při Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Tato laboratoř byla hlavním experimentálním zázemím celé práce.

Vytvořený model je ověřen na příkladu průmyslové prádelny. Tento druh provozu byl vybrán vzhledem k velkému množství experimentálních a provozních dat, funkčnímu zázemí v LENP, a v neposlední řadě kvůli 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.

2 Plynová mikroturbína jako kombinovaný zdroj

Jedním z možných použití mikroturbíny je role kogeneračního zdroje pro kombinovanou výrobu energie. Primární palivo je maximálně využito k výrobě elektrické a tepelné energie nebo chladu. Takovéto systémy potom dosahují celkové účinnosti výroby energie až 90 %. Jejich zavádění je podporováno systémem dotací pro energeticky efektivní zdroje kombinované výroby elektrické a tepelné energie. Mezi kogenerační zdroje se řadí celá řada technologií, zejména větší parní nebo plynové turbíny, menší pístové motory nebo progresivní palivové články.

Mikroturbíny je možné využít jak pro menší komerční objekty, tak i ve větších průmyslových provozech vzhledem k dostupnosti různých výkonových řad a možnosti agregace výkonů. V některých případech může být cílem i možnost ostrovního provozu.

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.

Kogenerační jednotky lze obecně definovat jako systémy, které vyrábí elektrickou a tepelnou energii s využitím jednoho paliva, čímž je dosahováno vysoké účinnosti výroby energie. Podle toho, zda je kladen důraz prioritně na produkci elektrické energie nebo tepelné energie, rozlišuje se *topping cycle* resp. *bottoming cycle* (Al Moussawi et al., 2017).

Další možností pro využití tepelné energie je výroba chladu, čímž vznikají trigenerační systémy.



Obr. 1 Mikroturbína Capstone C30 integrována do infrastruktury LENP

Plynové mikroturbíny se řadí mezi dobře známé technologie s výkonem mezi 30–500 kW (Al Moussawi et al., 2017). MT mohou být dále paralelně zapojovány a vytvořit tak systémy s výkonem v řádu jednotek až desítek megawattů. Plynové mikroturbíny se dělí na jedno hřídelové a dvou hřídelové. Výhodou jedno hřídelového provedení je pouze jedna pohyblivá část, protože generátor je umístěn na stejné hřídeli jako samotná turbína. Dvou hřídelové turbíny jsou navíc vybaveny převodovou skříní. MT pracují na základě Braytonova cyklu. Okolní vzduch je stlačen a následně spálen spolu s palivem ve spalovací komoře. Horký plyn expanduje skrz turbínu, čímž produkuje mechanickou energii pro generátor. Rekuperátor turbíny předehřívá vzduch na vstupu před jeho stlačením (Gillette, 2010). Plynové mikroturbíny mohou spalovat různé druhy paliv: zemní plyn, bioplyn, skládkový plyn, propan, flérový plyn apod. Značnou předností v souvislosti s palivem MT je i jejich nízká citlivost na složení paliva a nečistoty v něm obsažené (Bruno et al., 2009). Díky tomu jsou MT velmi variabilní pro různé aplikace. Základní technické údaje o mikroturbíně jsou shrnuty v Tab. 2

Tab. 2 Základní technické údaje o mikroturbíně Capstone C30 (Capstone, 2021)

Výkon	30 kW
Kombinovaná účinnost	až 90 %
Elektrická účinnost	26 %
Teplota spalin	275 °C
Průtok spalin	0,31 kg/s
Hlučnost	65 dBA
Váha	405 kg

Velkou výhodou MT je vysoká čistota spalinových plynů s vysokým přebytkem kyslíku. MT vykazují velmi nízké emise NO_x (méně než 9 ppm, při 15% přebytku O₂) díky kontinuálnímu spalování palivového mixu. Není tak třeba řadit další technologie pro čištění spalin, aby byly dodržovány emisní limity. Spaliny na výstupu z MT mají teplotu okolo 300 °C a jsou tak velmi kvalitním zdrojem tepla pro další aplikace: ohřev teplé užitkové vody (TUV), výroba chladu, přímé sušení, předehřev provozních proudů apod. Tyto vlastnosti dělají z MT perspektivní zdroj pro kogenerační ale i trigenerační jednotky. Mikroturbíny, v porovnání s dalšími kogeneračními technologiemi, disponují nízkou hmotností a kompaktními rozměry (poměrově k jejich výkonu), nízkými nároky na údržbu, nízkou hlučností a nízkou hladinou vibrací, vysokou životností, rychlou odezvou, a v neposlední řadě i celkovou účinností mezi 80–90 % (Al Moussawi et al., 2017; Isa et al., 2018).

Nevýhodou MT zůstává vyšší investiční cena 1000–1800 \$/kW (Pantaleo et al., 2013; Ferreira et al., 2014). Ta je však částečně kompenzována právě vysokou životností, až 80 000 hodin. Nicméně, výměna rotorového ústrojí je zpravidla prováděna po 40 000 provozních hodinách a představuje další investici ve výši třetiny původní investice. Dalším negativem zůstává citlivost výkonu mikroturbíny na okolní podmínky, především teplotu okolního vzduchu.

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.

Jak bylo zmíněno, MT jsou velmi variabilní a efektivní zařízení. Zařazením dalších technologií je však možné účinnost výroby energie ještě zvýšit a zásobovat teplem celou

řadu objektů a procesů dle jejich konkrétních potřeb. Pro svoji jednoduchost jsou nejčastěji využívány MT v kogeneračních systémech, kde jsou spaliny využívány v dalších technologiích pro navýšení produkce elektrické energie. Obecně lze říci, že teplo je přímým způsobem využíváno jen minimálně. Nejčastěji pro vytápění prostor nebo přehřev vody za použití výměníku tepla.

Další možností jsou trigenerační systémy. S elektřinou a teplem je produkován i chlad, tím je pokryta většina základních nároků průmyslových i komerčních provozů. Typickým zařízením pro výrobu chladu ve spojení s MT jsou absorpční chladiče. Ty se dělí na jednostupňové nebo dvoustupňové, a podle druhu použité absorpční směsi – $\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3$ nebo $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ (Hwang, 2004).

Nejčastějším případem zvýšení účinnosti výroby elektrické energie je v literatuře uváděno využití MT ve spojení s palivovými články s oxidem (SOFC). Z rešerše literatury vyplývá převažující zapojení SOFC a MT v konfiguraci *topping cycle*, kdy je produkce soustředěna na elektrickou energii.

Je patrné, že kogenerační jednotky s MT mohou být vysoce efektivním zdrojem energie. Je však důležité zohlednit stav a potřeby konkrétních provozů spolu s řadou dalších faktorů, aby byly jednotky ekonomicky efektivní a dosahovaly požadovaných výkonů. K nejvýznamnějším faktorům 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).

Tyto faktory je třeba zohlednit už v samotném návrhu na integraci plynové MT, aby byla správně stanovena její rentabilita.

2.1.1 Plynová mikroturbína v kogeneračních a trigeneračních systémech

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 jsou ve většině případů využívány především pro produkci elektrické energie a tepla pro vytápění prostor. Pro tuto konfiguraci lze najít příklady především z komunální sféry. Příkladů průmyslových aplikací MT je v literatuře méně a velmi často se jedná o velké komplexní systémy zaměřené na výrobu elektrické energie. Nicméně jak bylo uvedeno dříve, MT je i pro průmysl slibným zdrojem elektřiny, tepla ale i chladu. V následující části jsou uvedeny příklady takových průmyslových aplikací plynové MT.

Caresana et al. (2011) poskytli srovnání vnitřních spalovacích motorů a MT pro zpracování skládkového plynu. Celková ekonomická výhodnost systému záleží především na výkupních cenách vyprodukované elektřiny a tepla, a také na finančních dotacích, které poskytují státní instituce. K obdobnému závěru došli i Vera et al. (2012), kteří představili model zplyňovací jednotky s MT pro biomasu ze zpracování oliv.

Pantaleo et al. (2018) sledovali možnost rekuperace tepla pro pražírnu kávy. Byl srovnáván motor s organickým Rankinovým cyklem (ORC) a dvě různé konfigurace MT. Ani jedna z těchto možností však nebyla vhodná pro konkrétní případ, a to kvůli nízké pracovní době (6 h denně). Ekonomicky výhodnými se tyto systémy stávají pro provozy s větší časovou vytížeností (min. 12 h denně).

Spojení výše zmíněných jednotek (ORC a MT) analyzovali Invernizzi et al. (2007), spaliny z 100 kW MT byly použity jako zdroj tepla pro 40 kW ORC turbínu. Bylo získáno dalších 45 kW elektrické energie a elektrická účinnost se zvýšila o 10 %. Malé ORC jednotky se jeví jako slibná možnost pro využití odpadního tepla ze spalin, proto je třeba věnovat pozornost jejich vývoji. Nepříznivým faktorem zůstává již zmíněná vysoká pořizovací cena této technologie.

Naopak velmi výhodné využití tepla ze spalin MT ve strojírenském průmyslu našli Ferreira et al. (2015). V jejich studii byla MT zaintegrována do procesu tepelného zpracování kovových součástí. Proces se skládal z několika technologických operací (kalení, žíhání, odmašťovací lázně, sušení), které jsou energeticky velmi náročné. V rámci nejlepší varianty použili autoři Ferreira et al. (2015) MT typu C30, která pokrývá tepelnou spotřebu lázní a sušičů. Případný přebytek tepla je využit pro předehřev žíhacích pecí. Tímto řešením je snížena spotřeba primárního paliva o 17 %. Navíc je snížena elektrická spotřeba celého provozu.

Bruno et al. (2009) představili koncept MT s absorpčním chladičem v čistírně odpadních vod. MT využívá bioplyn (případně zemní plyn), spaliny jsou využity pro chladič a vyprodukovaná chladná voda se využívá v jednotce pro úpravu bioplynu a pro chlazení spalovacího vzduchu na vstupu do MT. V této studii (Bruno et al., 2009) bylo srovnáno několik scénářů. Použití MT typu C30 s jednostupňovým chladičem zcela pokrývá energetické nároky provozu a díky krátké době návratnosti (menší než 5 let) se jedná i o ekonomicky příznivou variantu. Velumani et al. (2010) využívá kromě MT a absorpčního chladiče i SOFC. Celková kapacita je 230 kW_{el} s chladicí jednotkou o výkonu 55 kW_{el}. Efektivita takového systému je pak odhadnuta na více než 70 %.

Dalším rozšířením je výměník tepla pro ohřev teplé vody. Tento systém představili Tassou et al. (2007) a Huicochea et al. (2011) se zaměřením na potravinářský průmysl. V obou případech byl systém vyhodnocen jako slibná možnost pro toto konkrétní využití. Aby byl systém ekonomicky výhodný a doba návratnosti nízká, je třeba zvážit poměr ceny elektřiny a zemního plynu, jak upozorňuje Tassou et al. (2007).

Další model trigenerace pro potravinářský průmysl navrhl Ge et al. (2013), za použití 80 kW_{el} MT a chladící CO₂ kaskády. V této konfiguraci model pokrývá 90 % celkové elektrické spotřeby, ale za cenu zvýšené spotřeby zemního plynu. Navíc zůstává nevyužita tepelná kapacita navrženého systému. Komplexní trigenerační jednotku představili Buckem a Friedmann (2007), kde byla připojena k solárnímu zdroji MT a systému rekuperace tepla (absorpční chladič a výměník tepla). Jak sami autoři uvádějí, tento systém je vhodný pro komerční použití v lokalitách s velkým slunečním zářením. Jak je z výše uvedených studií patrné, trigenerační systémy s použitím MT mohou být stabilními zdroji elektrické energie, tepla a chladu. Díky různým aparátům a jejich

vzájemné integraci je možné sestavit jednotku na míru konkrétních potřeb provozu. Jedná se však o systémy s vyšším počtem aparátů. To se odráží na náchylnosti celého systému k poruchám, zvýšené servisní požadavky a v neposlední řadě i na investiční náročnosti.

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 MT nebo v kombinaci s dalšími technologiemi. Rešerše potvrdila význam faktorů ovlivňujících rentabilitu integrace MT. Připomeňme, že šlo především o:

- 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).

Dále bylo potvrzeno, že vhodným cílovým procesem je ten, který využije maximum produkovaného tepla ve spalinách.

2.1.2 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). Zejména s použitím přerušovaných zdrojů obnovitelné energie do energetického mixu vykazují mikrosítě vysoký potenciál pro udržení spolehlivého provozu a řízení na udržitelné úrovni (Olivares et al., 2014). Mikrosít je jednou

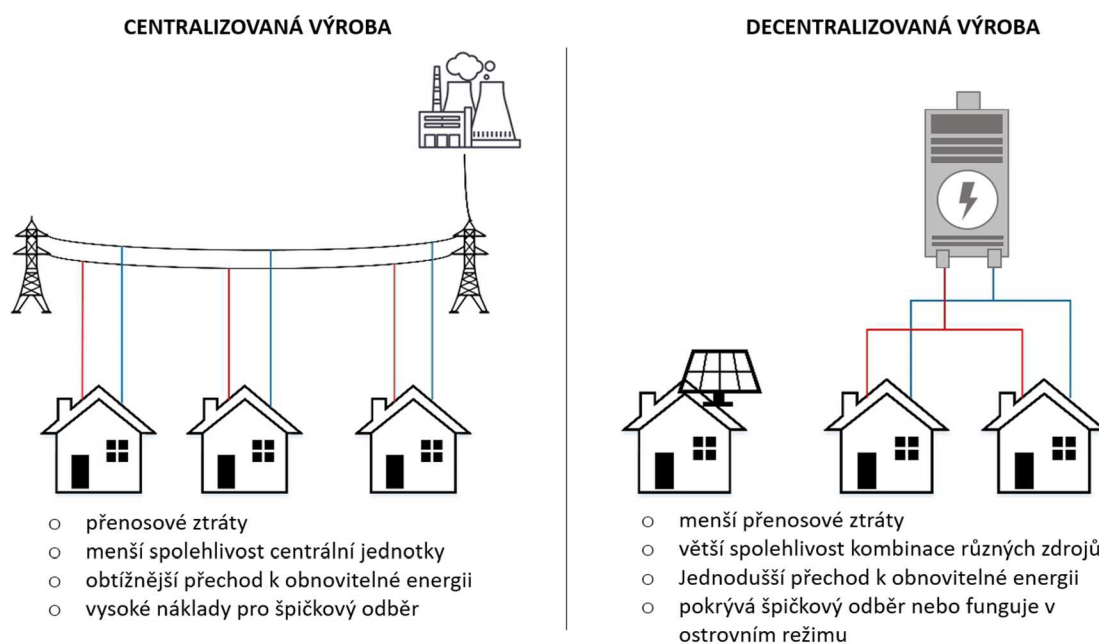
z nejslibnějších technologií decentralizované výroby energie. Na rozdíl od tradičních centralizovaných sítí, decentralizace šetří investiční náklady na přenosovou a distribuční soustavu. Allan et al. (2015) odhadují investiční náklady 4 500 \$/kW, zatímco decentralizované sítě nemají téměř žádné náklady spojené s přenosem energie na dlouhé vzdálenosti. Peter a Lehmann (2008) poukazují právě na přenosové ztráty, které mohou dosahovat až 7 %, což značně narušuje ekonomickou bilanci centralizované energetické sítě. Mezitím s rozvojem energetické účinnosti, „mikrozařízení“ pro distribuovanou výrobu nyní dosahují srovnatelné účinnosti jako vzdálená výroba energie. V současné době dosahuje celková energetická účinnost lokálních KVET jednotek pro přeměnu až 90 % (Rosen et al., 2005), zatímco regionální kogenerační zdroje dosahují pouze 60 %. Decentralizovaná výroba energie navíc umožňuje větší rozmanitost zdrojů energie v rámci sítě, včetně různých obnovitelných zdrojů energie (Zhang et al., 2013). Dle (Zachar et al. (2014) zavedení mikrosítí může účinně snížit emise uhlíku o 5 až 15% ve srovnání s centralizovanou výrobou konvenčním zemním plynem a uhlím. Vzhledem k tomu, že v mikrosítích se nachází menší subjekty, je rozhodnutí o implementaci obnovitelných zdrojů často mnohem rychlejší než u centrální technologie, které obvykle vyžadují změny politiky a organizačních závazků. Mikrosítě také slouží jako stabilizátor cen na trhu s energií a vyhýbají se drahé energii z centralizovaných sítí s distribuovanými zdroji energie (Chen et al., 2011). Určité srovnání mezi centralizovanou a decentralizovanou výrobou lze nalézt na Obr. 2 Za zmínku stojí také dva režimy, ve kterých mikrosítě pracují, a to ostrovní režim a špičkový režim (Stadler et al., 2016). Ostrovní režim funguje tak, že odpojuje místní síť od centrální sítě tím, že všechny energetické potřeby pokryje z lokálních zdrojů (Katiraei et al., 2005). Alternativně mikrosítě se špičkovým režimem aktivně reagují na centralizovanou síť a dodávají energii pouze tehdy, když jsou náklady vysoké nebo dochází ke špičkovému odběru energie (Shen et al., 2016).

V mikrosítích se jednotka zdroje energie obvykle skládá z fotovoltaických panelů, větrné turbíny, palivových článků, vznětového motoru a mikroturbíny (Mohammadi et al., 2014). Současný návrh mikrosítí kombinuje méně spolehlivý obnovitelný zdroj s osvědčenou technologií, např. fotovoltaické články a mikroturbína (Degobert et al., 2006).

Spojení plynové mikroturbíny a mikrosítě je sice 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).

Romankiewicz et al. (2014) studoval provoz mikrosítě Sendai v Japonsku využívající jednotky na zemní plyn, palivové články a solární fotovoltaické panely pro ostrovní provoz místní nemocnice, kde přebytek energie byl použit pro další lokální zařízení. Emise CO₂ systému byly sníženy o 12 % a náklady za energii o přibližně 14-30 %. Autoři zdůraznili i důležitost dotací pro výstavbu takto úspěšného provozu.



Obr. 2 Porovnání centralizované a decentralizované výroby

Optimalizace mikrosítí je tématem případové studie v Chile (Bustos a Watts, 2017), kde byla pro izolovanou vesnici vytvořena komplexní mikrosít s dieslovým generátorem, mikroturbínou, větrnou turbínou, solární fotovoltaikou a bateriemi. Optimalizace byla provedena pro odhadované zatížení obce, které bylo stanoveno na základě dostupných dat. Následně byly minimalizovány náklady na dodanou energii a palivo pro vlastní produkci energie. Představený systém byl úspěšně zpuštěn, nicméně se odhaduje nutnost připojení mikrosítě k centrální síti kvůli rostoucí spotřebě elektřiny obyvatel obce.

Zachar a Daoutidis (2018) diskutovali o vhodnosti mikroturbíny jako primárního zdroje v mikrosítí pro komerční budovy (kancelářské budovy, nemocnice, školy, maloobchodní

prodejny apod.) se systémy rekuperace odpadního tepla pro vytápění vnitřních prostor. Tyto typy budov se liší svojí vytížeností v používání (ve dne, resp. týdnu a také v ročním období) a mohou být využity jako testovací zařízení pro mikrosítě s mikroturbínou. Dle autorů není elektrické vytápění vnitřních prostor účinné a mělo by tak být spíše založeno na plynových technologiích, jako je právě MT. V nové studii autorů (Zachar a Daoutidis, 2019) je blíže rozebráno plánování provozu plynové mikroturbíny. V případové studii je dodržován přísný rozvrh, který zabraňuje cyklování spínání mikroturbíny a také nákladům na případné porušení smluvené kapacity. Náklady na provoz mikroturbíny jsou navíc pouze za spotřebu paliva. V případě výhodné sazby pro plynné palivo je MT dobrým řešením jako vysoce účinný primární zdroj celé mikrosítě.

Na základě literatury jsou mikrosítě využívající různé technologie kombinované výroby energie a obnovitelné zdroje šetrné k životnímu prostředí a nejsou tak drahé pro různé typy koncových uživatelů v pozorovaných lokalitách, jak potvrdili Zhang et al. (2015). Ti studovali využití zemního plynu pro distribuované zdroje energie. Mikrosít s mikroturbínou byla úspěšně testována, zejména v komerčních a izolovaných provozech. Dalším krokem je využití těchto systémů v průmyslových oblastech, kde jejich použití přispěje k decentralizované výrobě energie.

Práce od Vachirasricirikul et al. (2009) studuje účinky stabilizace systému mikrosítě a zlepšení spolehlivosti právě začleněním plynové mikroturbíny. To umožňuje vyšší poměr využití obnovitelných zdrojů v energetickém mixu při zachování spolehlivosti systému. V tomto ohledu je mikroturbína obzvláště vhodnou jednotkou, která působí jako zdroj energie pro redundanci. Výhodou mikroturbíny je kompaktní velikost a vysoká energetická účinnost. Kromě toho mikroturbína využívá méně pohyblivých částí, které vedou ke snížení požadavků na údržbu, a produkuje méně hluku (Lav et al., 2013). Nascimento et al. (2013) také přezkoumali spolehlivost provozu mikroturbíny, který může být až 25 000 hodin s proměnnou rychlostí mezi 30 000 a 120 000 ot/min. Pokročilejší mikroturbíny mohou také poskytovat dálkové monitorování, čisté teplo spalín na odtahu MT, a mohou využívat nejen zemní plyn, ale i další související paliva, např.: zkapalněným ropným plynem (LPG), propan, flérový plyn, skládkový plyn, bioplyn, nafta, letecké palivo nebo petrolej (Capstone, 2021).

V rámci výzkumných oblastí integrace mikroturbíny Rachtan a Malinowski (2013) studovali rekuperaci tepelné energie z MT provozované jako kogenerační jednotka. V tomto ohledu (Kaikko a Backman 2007) provedli technicko-ekonomickou analýzu a ukázali, že rekuperace tepla pomocí velkých rekuperátorů je rozhodující pro celkovou ekonomiku provozu. Přístup použití vstřikování vody a páry k rekuperaci tepelné energie z rekuperované cyklické mikroturbíny byl také studován (Lee et al. 2010). Bylo zjištěno, že vstřikování páry na vstupu rekuperátoru může zvýšit účinnost výroby energie, ale je třeba antikoročních opatření. Nový rekuperátor Swiss-Roll byl také navržen Tsaiem a Wangem (2009) pro zvýšení účinnosti rekuperace tepla o 57,2 % a výkon na spotřebu paliva o 57,4 %. Integrace MT a organických Rankinových cyklů (ORC) byla také studována Magem a Luckem (2013), které byly použity pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla systémů MT. Tento směr ukázal mnohem větší možnost zlepšení geometrie oběžného kola radiální mikroturbíny v rámci integrovaného systému ORC (Kaczmarczyk et al., 2017).

S požadavky na produkci chladu byla výzkumníky Seyfouriem a Amerim (2012) studována integrace MT s absorpčními chladičnými systémy. Pro takový trigenerační systém – chlazení, tepla a elektřiny, Basrawi et al. (2016) analyzovali účinky provozní strategie na ekonomiku a environmentální výkonnost. Navržený systém však generoval zisk až na konci 25leté životnosti za předpokladu nedotované elektřiny. Pro vyšší požadavky na chlad (Huicochea et al. 2011) byla studována možnost využití absorpčního chladiče s dvojitým účinkem s MT. Ke zlepšení situace v tomto systému je nutný další technologický vývoj. Jedním z nejslibnějších snah je použití solarizované MT (tzv. solar-assisted gas microturbine) ke zlepšení termodynamiky a celkové účinnosti systému (Nelson et al., 2018). Tyto solarizované MT pak mohou být implementovány v rámci výše zmíněného trigeneračního systému pro zlepšení ekonomických a environmentálních výsledků (Dabwan a Pei, 2020). Práce vykazovala vyrovnané náklady na elektřinu ve výši 5,75 \$ centů za kWh a snížení emisí uhlíku o 114 000 tun za rok. Mezi další snahy o zlepšení trigeneračního systému patří použití palivových článků s pevnými oxidy, spalování biomasy nebo solární systémy, které zlepšují i trigenerační systémy na základě MT (Baghernejad et al., 2016).

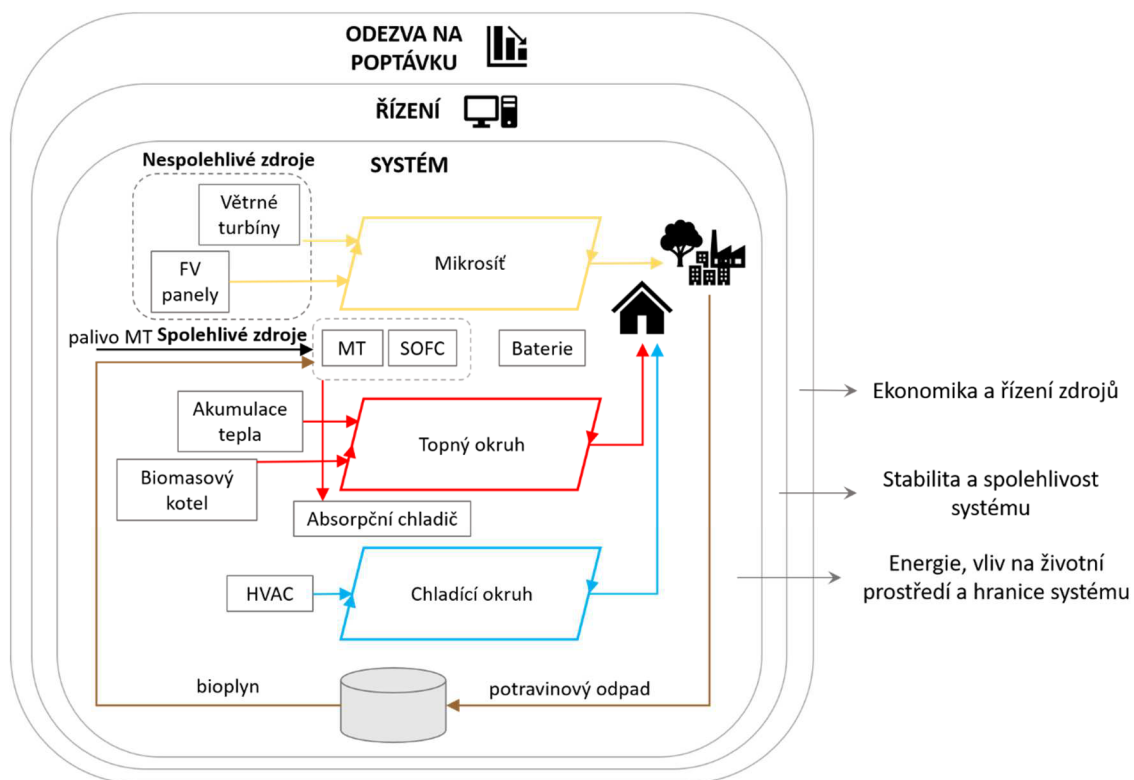
Díky flexibilitě MT byl trh v roce 2015 oceněn na 40,5 mil. \$ a do roku 2024 se předpokládá růst na 101,3 mil \$ s CAGR 10,8 % (Grandviewresearch.com, 2016). Při

využití dotací na kombinovanou výrobu tepla a elektřiny v různých zemích a regionech, jako USA (Zhou et al., 2006), Japonsko (Aki, 2007), Evropa (Montero Carrero et al., 2019), Nový Zéland (Atkins et al., 2017), Čína (Wu et al., 2016), Malajsie (How et al., 2019), je potenciál mikrokogenerační jednotky zřejmý díky nízkým investičním nákladům, vysoké energetické účinnosti a snadné instalaci (do Nascimento et al., 2013). Integrací MT do mikrosítí mohou navíc spotřebitelé využívat obrovských úspor díky tomu, že nedochází k výpadkům přenosového výkonu, mohou si ponechat vlastnictví zařízení na výrobu energie, která nejsou ovlivněna problémy s centralizovanou sítí, řídit místní napětí, zlepšit energetickou bezpečnost a umožnit vyšší podíl výroby energie z obnovitelných zdrojů (Sinha et al., 2008). Rychlé přizpůsobení mikrosítí založených na MT je další výraznou výhodou. Vzhledem ke krátké dodací lhůtě MT (Lav et al., 2013) mohou mikrosítě na jejich bázi pracovat velmi efektivním způsobem – mikrosítě založené na MT mohou operativně přepínat mezi ostrovním režimem a špičkovým režimem, aby využily maximální ekonomický potenciál sítě (Zhang et al., 2013; Uddin et al., 2020), a to i při malých kapitálových investicích.

Kromě dobře navrženého systému mikrosítě je důležitý také systém řízení a odezvy na straně poptávky v rámci mikrosítě (viz Obr. 3). Wang et al. (2013) uvedli, že spolehlivost a ekonomika mikrosítí může být drasticky ovlivněna protiproudovými poruchami, nesprávnou strategií řízení a nejistotou zatížení. Tyto problémy v řízení mikrosítí mohou způsobit nedostatek energie a nestabilní napájení, které ve výsledku ovlivňují ekonomiku celého systému. Rajarajeswari et al. (2019) diskutovali nestabilitu mikrosítě, která může zvýšit náklady na výpadky zákazníků a provoz, což ovlivňuje přibližně 9 % celkových úspor. Xiu et al. (2011) ukázali, že MT lze snadno ovládat v rámci dynamické povahy mikrosítí i se strategií řízení prostého poklesu výkonu. Podobně Wei et al. (2008) navrhli strategii řízení dvojité sinusové pulzní šířkové modulace pomocí dynamické simulace, která ukazuje, že MT může udržovat stabilní provoz při nejistotě zatížení v mikrosíti. To zdůrazňuje dobrou ovladatelnost MT díky rychlé odezvě, stabilnímu provozu a spolehlivým výstupům. Práce Vachirasricirikul a Ngamroo (2012) využily tuto vlastnost MT a navrhly robustní konstrukci ovladače pro mikrosítě, která se zabývá nejistotou způsobenou plug-in hybridními elektrickými vozidly. Klíčovou výzvou pro řízení procesů v mikrosítích je přechod mezi ostrovním režimem a špičkovým režimem a naopak (Zoka et al., 2004), kdy je výpadek proudu nejpravděpodobnější. Výzkumníci

Madureira et al. (2005) navrhli použití sekundárního řízení zátěže a frekvence k vyřešení tohoto problému. S vyššími úrovněmi řízení zátěže a frekvence Che a Shahidehpour (2014) prokázali, že provozní ekonomiku lze zlepšit hierarchickým řízením pro stejnosměrné mikrosítě. Později Palizban a Kauhaniemi (2015) demonstrovali účinnost použití hierarchické kontroly mezi ostrovním a špičkovým režimem v mikrosítích. Implementace řídicího návrhu pro mikrosítě na ostrově Hailuoto (Laaksonen et al., 2014) ukázala funkci adaptivní ochrany, která přidává krok synchronizace sítě do řídicí logiky pro přechod mezi ostrovním a špičkovým režimem. Díky vynikající dynamice MT může být říditelnost za takových nejistot v mikrosíti velmi přesná (Degobert et al., 2006).

Systém odezvy na straně poptávky v rámci mikrosítě rozhoduje, kdy ukládat energii, připojovat se k ostatním sítím, přepínat do ostrovního režimu a další úkony pro lepší využití zdrojů (Vandoorn et al., 2013). Výhody využití mikrosítě založené na MT nejsou jen na úrovni řízení, ale rozšíří se i na sledování odezvy na straně poptávky. (Che et al., 2014) prokázali, že mikrosítě založené na MT jsou vynikající v ostrovním provozu, v reakci na nouzovou poptávku, obnově zatížení a synchronizaci mikrosítě s rozvodnou



Obr. 3 Systém mikrosítě, jejího řízení a odezvy

sítí. MT v mikrosítí může také fungovat jako rychlý záložní zdroj energie (Moghaddam et al., 2011). Ve víceúčelové optimalizační studii Mohameda a Koiva (2007) byly zohledněny emise (NO_x, SO₂ a CO₂), bezpečnost, požadavky zákazníků a ekonomika v mikrosítí založené na MT, která umožňovala skladování energie. Evoluční optimalizační techniky, jako je adaptivní modifikovaný algoritmus Firefly, byly také použity ke zlepšení mikrosítě založené na MT (Mohammadi et al., 2014), kde lze nejistotu modelovat stochasticky a provozní ekonomiku lze dlouhodobě zlepšit. Mikrosít založená na MT, která zahrnuje palivové články, větrnou turbínu a fotovoltaické pole, je také optimalizována pomocí genetických algoritmů pro rychlejší výpočetní čas (Deng et al., 2011).

V rámci zaměření dizertační práce bylo téma mikrosítí s MT důležité pro zlepšení ekonomiky provozu díky využití tepelné energie. Na základ 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.

2.1.3 Plynová mikroturbína v prádelenství

Kapitola je založena na následujících publikacích:

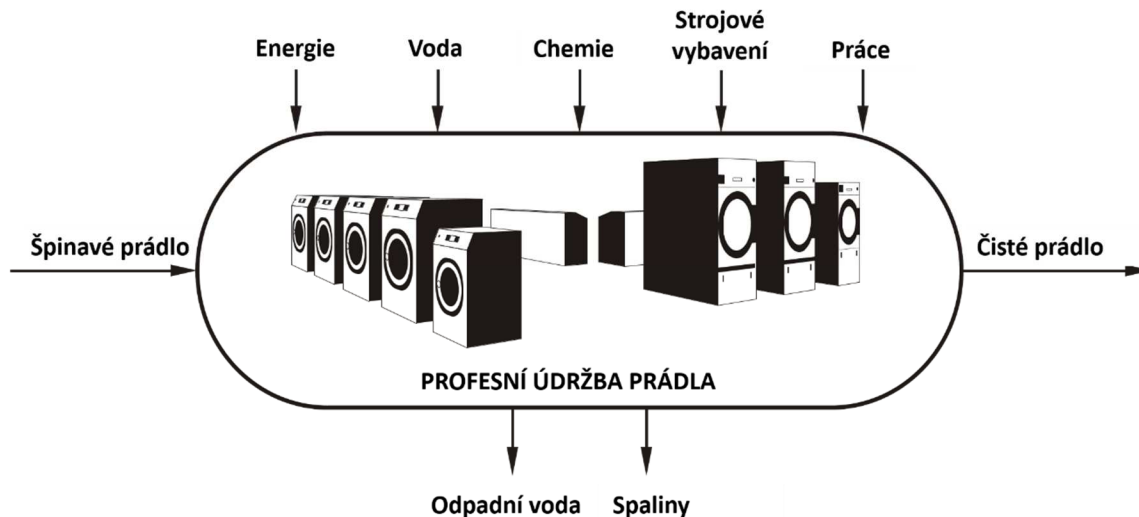
KONEČNÁ E., MÁŠA, V.; MIKLAS, V.; SLOVÁK, R.; JÖRDENING, A.; BLAHA, V. *Gas Microturbine as a main source of energy for industrial laundry – feasibility study. Přijato k recenznímu řízení do časopisu Energy.*

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

Prádelenský proces byl vybrán jako vhodný adept pro studium integrace plynové MT (dále v kap. 4) v návaznosti na dlouhodobý výzkum Ústavu procesního inženýrství FSI VUT v Brně v oblasti energetické efektivity průmyslových procesů. Dříve, než se kapitola zaměří na zapojení MT v prádelenství, je představeno prádelenství samotné a aktuální výzkumné a vývojové trendy, které se v něm uplatňují.

Iniciativy vedoucí ke snižování spotřeb mají dopady na všechna průmyslová odvětví, především na energeticky náročné procesy. Výjimkou není ani profesní údržba prádla.

Cílem prádelenského procesu je umožnit opakované použití textilií, prádla z nemocnic, hotelů i domácností. Průmyslový proces údržby prádla se liší od toho v domácnosti především množstvím zpracovaného prádla a co největším nahrazením lidské práce strojním vybavením (Obr. 4). Na začátku procesu je znečištěné prádlo, na jeho konci je čisté, přičemž je vyžadováno relativně velké množství energie, vody a chemický látek. Studie Máša et al. (2013) uvádí měrnou spotřebu tepla 0.91 kWh/kg_{DL} a měrnou spotřebu elektrické energie 0.15 kWh/kg_{DL}. Spotřeby jsou vztaženy k jednomu kilogramu suchého prádla. Pro praní je třeba využívat vodu o teplotě v rozmezí 30-90 °C. Nejčastějším zdrojem energie pro prádelenské provozy jsou parní kotle a vyvíječe. Produkováná pára je použita nejen pro ohřev prací vody, ale i pro žehlící stroje a dokončovací operace. Výstupními proudy procesu jsou plynné emise a odpadní voda. Emise vznikají ve spojitosti s tepelnou spotřebou procesu a existuje řada možností, jak tyto odpadní proudy v procesu znovu využít (Máša et al. 2013).

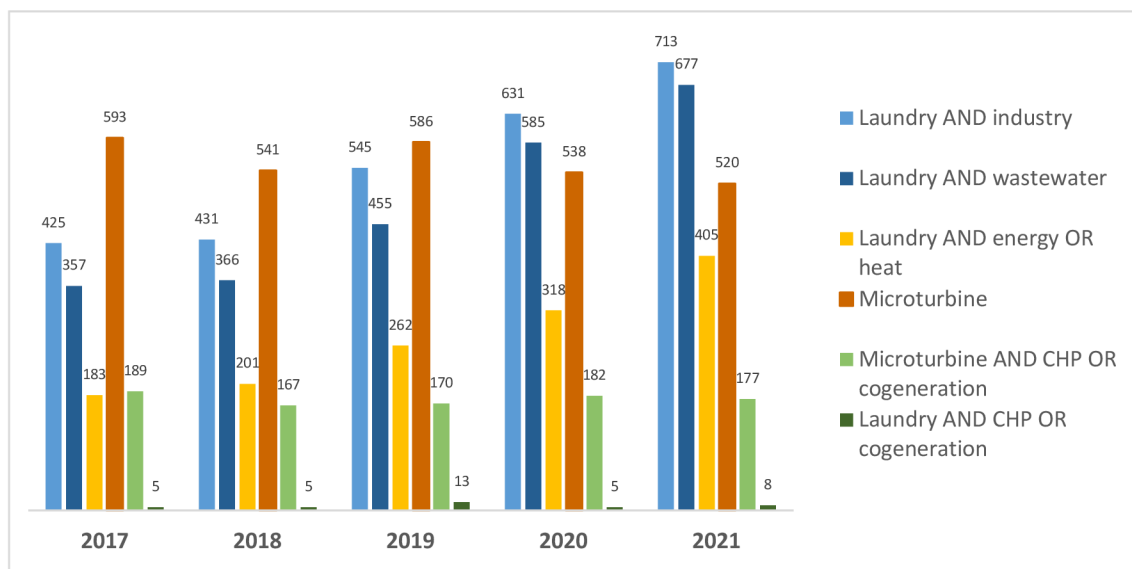


Obr. 4 Schéma profesní údržby prádla (Máša et al., 2013)

Profesní údržba prádla je významný sektor, který je navázán na zdravotnictví a turismus. Hodnota sektoru čistíren a prádelenství na trhu je přibližně 70 miliard \$ (Wood, 2019) a očekává se růst o 4 % CAGR po dobu následujících 5 let (Globenewswire, 2020). 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. V poslední době také sledujeme výrazný nárůst cen energií v celosvětovém měřítku. Průmyslovým prádelnám je proto třeba věnovat zvýšenou pozornost, a to tím spíše, že zde existuje značný potenciál pro zefektivnění celého provozu. Hlavní prioritou musí být zvyšování energetické efektivity procesu, přičemž klíčovým krokem je správný návrh energetického systému prádelny. S energeticky efektivním provozem je možné udržet vysokou kvalitu péče o prádlo, a přitom zvýšit udržitelnost procesu.

Průmyslové prádelny z hlediska výzkumu a vývoje zůstávají v pozadí, jak nasvědčuje počet publikovaných prací na toto téma (Obr. 5). Téma KVET nebo MT v kombinaci s prádelnictvím stagnuje. Jedná se o jedinečný záměr s vysokým potenciálem pro zlepšení účinnosti procesu i životní prostředí. Při bližším pohledu na publikované práce je patrné, že větší pozornost směřuje k domácímu praní a novým možnostem sdílených prádelen. Právě sdílení je jedním z aktuálně nejvíce diskutovaných témat, které má vliv na více oblastí lidské činnosti, a praní prádla není výjimkou (Moon et al., 2020; Wasserbaur et al., 2020; Klint a Peters, 2021). Tento přístup má mnohé ekologické a



Obr. 5 Výsledky vyhledávání vybraných klíčových slov v databázi SCOPUS

ekonomické benefity, zacílen je ale na koncové spotřebitele a jen stěží bude přenositelný do průmyslového měřítko. I v méně rozsáhlých aplikacích, např. v komerčních nebo bytových komplexech, lze inovovat energetický systém integrací kogeneračního zdroje energie, který bude elektřinou i teplem zásobovat sdílenou prádelnu v objektu.

Vývoj nových technologických řešení je také zaměřen především na oblast domácího praní. Příkladem progresivních technologií jsou termo-elektrické sušiče nebo LFC kolektory (linear Fresnel collector), které v budoucnu mohou být potenciálně použity i ve větším měřítku průmyslových prádelen. Sepúlveda et al. (2019) hodnotili potenciál LFC kolektorů, které využívají pro produkci páry solární ohřev v různých typech a velikostech provozů, včetně prádelen. LFC je jedním ze dvou základních typů lineárních kolektorů, které využívají velké plochy pro sběr solárního záření, čímž dosahují vyšších teplot. A právě prádelna o střední kapacitě (1650 t/rok) byla vyhodnocena jako nejvhodnější ze sledovaných provozů. Tato technologie je v počátcích a její využití je omezené množstvím solárního záření v oblasti, nicméně prádelny s dostatečnou plochou pro umístění solárních panelů mohou v budoucnu využívat pro produkci páry právě tohoto obnovitelného zdroje. Termo-elektrické sušiče jsou založeny na principu kondenzačních sušičů. Rozdílem je nahrazení standardního elektrického ohřívače horkou stranou termoelektrického výměníku s termoelektrickým modulem, který absorbuje větší množství tepla a tím dochází k lepší kondenzaci vody (Somdalen a Köhler, 2018). Tyto sušiče jsou zacíleny především na domácí použití, zde je klíčovým parametrem poměr sušícího času a vlhkosti prádla. Cykly těchto zařízení jsou v poměru k sušícím cyklům průmyslových prádelen v nejlepším případě třikrát delší. Pro potenciální použití této technologie v průmyslovém měřítku je třeba optimalizace délky sušících cyklů a spotřeby elektrické energie. Zařízení může být teoreticky výhodné jen v případě velmi nízké ceny elektrické energie. I zde je tedy prostor pro integraci účinného kogeneračního zdroje nebo obnovitelných zdrojů energie.

Udržitelnost je dalším aktuálním tématem publikovaných prací. V případě prádelenství je diskutována udržitelnost spíše z pohledu rizik a ekonomické situace než s ohledem na energetickou efektivitu (Lopes et al., 2019). Světlou výjimkou je práce Cotton et al. (2020), kde jsou navrženy opatření pro snížení pracovních teplot a zkrácení cyklů, čímž dojde ke snížení spotřeb energií. Dále ke snižování dávek detergentů a menšímu otěru materiálu, čímž je dosaženo čistší odpadní vody. Tato opatření je možné opět aplikovat pro domácí praní nebo prádelny se specifickou skladbou prádla. Větší průmyslové prádelny mají ovšem nastavené podmínky pro kvalitu vypraného materiálu ze strany zákazníka, a proto zásah do cyklů není možný bez rozsáhlejších prací testů apod. Snižování teploty by bylo problematické i z pohledu hygienizace prádla, která byla

zmíněna výše. Alternativně by mohla být hygienizace podpořena zvýšeným dávkováním detergentů a chemických látek, což by ovšem zvýšilo emise nežádoucích látek v odpadních vodách.

Právě odpadní vody jsou aktuální téma řešené v oblasti profesní údržby prádla. Důvodem je vysoká spotřeba vody provozu. Dle Ho et al. (2021) průměrná prádelna spotřebuje 15 l vody na 1 kg zpracovaného prádla. V případě prádelny o kapacitě 2000 t/rok se může jednat až o 26 000 m³ čisté vody a jakákoliv recyklace vody zpět do procesu tak může přinést významnou úsporu provozních nákladů. Za směrodatné ukazatele pro posouzení odpadní prádelenské vody lze vybrat chemickou a biochemickou spotřebu kyslíku (BOD), celkové nerozpuštěné látky, pevné látky nebo obsah fosforu. Existuje celá řada metod pro úpravu vody, které byly navrženy jako řešení i pro prádelenské vody – ultrafiltrace, koagulace, membrány, biofiltrace, anaerobní a aerobní metody. Tyto jednostupňové metody však nevykazují pro prádelenské vody požadovanou účinnost, proto se studují jejich kombinace. Výbornou účinnost při snížení BOD (až 95%) prokázal membránový reaktor (Ho et al., 2021). Hlavním bariérou pro širší implementaci těchto systémů v prádelnách je velká citlivost na množství otěru z prádla v odpadní vodě. Obecně lze říci, že zatím neexistuje univerzální metoda nebo technologie pro zpracování odpadní vody z prádelenství. Při výběru vždy bude záležet na konkrétním provozu, parametrech vody a prostorových možnostech.

Aktuální technologické trendy v prádelenství směřují především k eliminaci využití páry. Důvodem jsou vysoké investiční a provozní náklady parních systémů. Za tímto účelem vznikají prádelenské stroje (sušiče, žehliče i pračky) využívající ohřev pomocí zemního plynu namísto doposud zcela běžného parního ohřevu (Laundry Ledger, 2020). A přestože je tento energetický systém decentralizovaný, dosahuje nižších spotřeb než původní parní. Eliminace páry může být podpořena zavedením olejového hospodářství (Dutra et al., 2017). Odborná literatura je v tomto odvětví velmi strohá, nicméně výrobci termo olejů nabízejí možnosti pro využití i v prádelenství. Hlavními výhodami olejového hospodářství jsou: stále zatopený systém s rychlým nájездem na provozní parametry, levnější potrubní trasa a její údržba (v porovnání s parním hospodářstvím) a vyšší dostupná teplota pro sušení a žehlení. Naopak riziko úniku termo oleje na prádlo a nutnost skladování velkého množství oleje a jeho degradace patří k nedostatkům, které v případě páry není potřeba uvažovat.

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 předehřev 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). Hlavním pozitivem MT jsou vysoce čisté spaliny s vysokým přebytkem vzduchu, které je možné využít pro všechny jednotkové operace v prádelnách a eliminovat tak nutnost parního hospodářství. Integrací MT do prádelenského procesu by došlo k maximálnímu využití potenciálu plynové mikroturbíny a zlepšení celkové účinnosti procesu. Další výhodou plynové mikroturbíny je její relativně snadná integrace do existujícího provozu, kdy lze využít stávajícího zařízení prádelny. Není tak třeba pořizovat nové stroje s plynovým ohřevem nebo zařízení uzpůsobená pro termo olej, aby byla pára eliminována. Dosud byla integrace MT do prádelenského provozu dle případových studií realizována pouze v menších prádelnách, kde byly spaliny použity výhradně pro ohřev vody. Aplikaci pro hotelovou prádelnu např. představil Kolanowski (2004).

2.2 Metodika integrace plynové mikroturbíny do průmyslu

Ze studia odborné literatury, systematické výzkumné činnosti a konzultací s průmyslovými podniky, vzešla potřeba postupu, jak integrovat plynovou MT do konkrétních provozů. Vzhledem k tomu, že investice do pořízení MT je vysoká, je nezbytné správně navrhnout začlenění MT do sledovaného provozu, jako hlavního zdroje, 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. Nezhledňují se přitom specifika provozu ani dosažené úspory. Na druhé straně se nabízí sofistikovaný přístup k integraci, který využívá komplexních/dynamických modelů, simulačních nástrojů, predikce parametrů a komerčních softwarů pro hodnocení procesů. Výhodou komerčních softwarů (např.: ProMax, ChemCad, Aspen Plus, Matlab/SIMULINK) je jejich přesnost a rozsáhlost (včetně databází zařízení a pracovních látek), díky které mohou cílit na různé druhy aplikací. Nicméně, se jedná o časově, finančně i odborně náročné postupy, které potřebují velké množství provozních dat, aby výsledky odpovídaly reálnému provozu a poskytovaly odpovídající návod, jak integraci provést.

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

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

Malé a střední podniky tvoří drtivou většinu všech podniků v rámci EU, a proto je soustředěna pozornost na jejich energetickou efektivitu. 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 například formou energetického auditu. Ten 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 energetického auditu jsou potom úsporná opatření, která zvýší celkovou účinnost systému. Důležité je posouzení možnosti využít dostupné odpadní proudy, čímž se zefektivňuje využití primární energie. Ne vždy mají odpadní proudy dostatečný energetický potenciál pro použití v samotném technologickém provozu. V takovém případě je možné uvažovat o využití odpadního tepla pro vytápění/chlazení prostor nebo přípravu teplé užitkové vody (TUV) v rámci širšího areálu.

2. Vyhodnocení získaných dat a optimalizace

Výstupy energetického auditu jsou hodnoceny podle dosažených úspor vztažených k výši investice do daného opatření. K vyhodnocení dílčích parametrů provozu je možné použít i různé specializované výpočetní nástroje, ale nejedná se o nezbytnost.

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 řešení než pořízení nového zdroje energie a může přinést značné úspory. Jedním z dostupných postupů je tzv. procesní integrace – optimalizační metodika, jejímž hlavním cílem je snížit spotřebu energie v průmyslovém provozu nalezením termodynamicky

dosažitelného minima, a zvýšit rekuperaci tepla. 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

Jakmile je vyhodnocen stávající stav energetického systému a možnosti efektivního využití odpadního tepla, lze přistoupit k posouzení vhodnosti použití MT a výběru odpovídající výkonové varianty. Pro správnou integraci je nezbytné správné vyhodnocení vstupních informací o provozu, na jejichž základě je vybrána výkonová varianta kogeneračního zdroje, resp. plynové MT. Jak bylo zmíněno dříve, efektivitou provozu MT a její vysoké kombinované účinnosti lze dosáhnout pouze při plném využití horkých spalin a jejich energetického potenciálu. Ideálním procesem pro MT je kontinuální proces s vysokou spotřebou tepelné energie, kde je možné spaliny použít přímo. Mimo pracovní dobu technologie provozu lze uvažovat o akumulaci jak tepelné, tak elektrické energie produkované MT. Integrace MT vychází ze statického popisu procesu, tedy hmotnostní a energetické bilance.

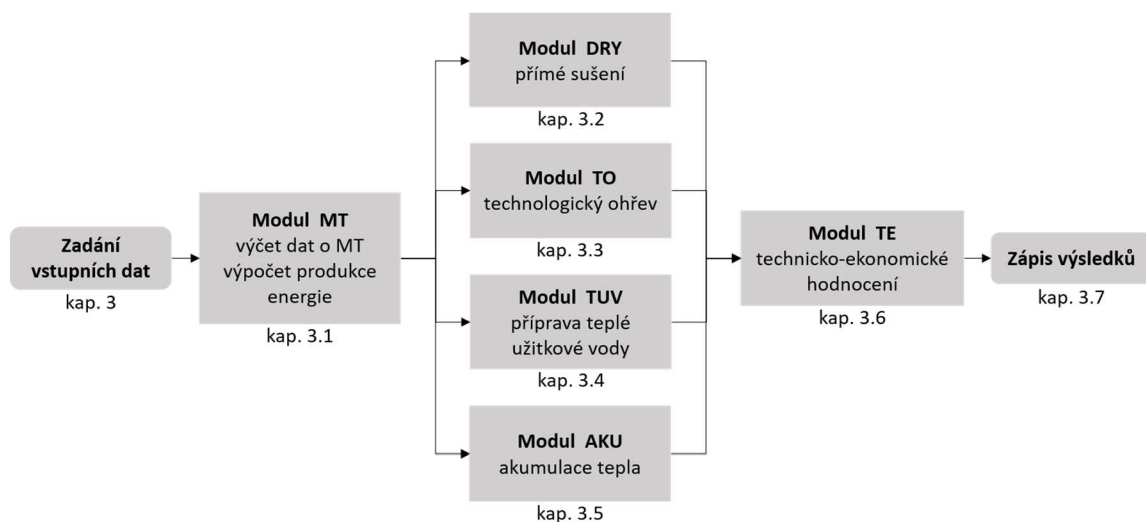
Postup řešení integrace plynové MT je možné použít v širším spektru průmyslových procesů. Výše popsáný postup je prvním krokem pro provozy, které odpadní proudy za stávajícího stavu nevyužívají. V případě, že provoz odpadní energii zužitkovává, je možné přistoupit k výběru plynové MT a její integraci.

V následující kapitole je představen SW nástroj, který základní kroky automatizuje do univerzální podoby, kde je kladen důraz na využití tepla v horkých spalinách, aby bylo dosaženo vysoké kombinované účinnosti a dobré rentability MT.

3 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.

Vyvinutý SW nástroj je tvořen kombinací jednotlivých výpočtových modulů, které představují jednotlivé operace, které nakládají s energií. Modulární systém byl zvolen především kvůli své variabilitě a univerzálnímu použití. Výhodou tohoto systému je možnost tvorby dalších rozšiřujících modulů pro specifické aplikace. Zjednodušený postup softwarové simulace je naznačen na Obr. 6



Obr. 6 Grafické znázornění navrhovaného SW nástroje

Pro tvorbu výše popsaného nástroje byl využit programovací jazyk Python™ v kombinaci s programem MS Excel. Hlavním důvodem tohoto výběru je jednoduchost, dostupnost a rychlost jejich použití, open-source licence a široká nabídka knihoven a

databází pro vědecké a matematické aplikace (v případě Python™). Hlavní funkční celky SW nástroje a funkce použité k jejich tvorbě jsou uvedeny na Obr. 7.

V SW nástroji bylo použito několik veřejně dostupných knihoven:

- i. pandas – flexibilní knihovna pro zpracování, vyhodnocení a manipulaci s daty (Pandas, 2021)
- ii. NumPy – knihovna poskytující základní i pokročilé matematické funkce (NumPy, 2021)
- iii. IAPWS – knihovna standardů dle IAPWS (The International Association for the Properties of Water and Steam) pro vodu a páru (IAPWS, 2021).

	Zadání vstupních dat	Modul MT	Scénáře spotřebičů tepla	Modul TE	Funkce CYKL	Zápis výsledků
popis části	24 hodnot zadání vstupních dat o stávajícím provozu	$i = 6$ výčet dat o MT výpočet produkce energie	$j = 6$ $k = 4$ scénář j : $DRY_k, TO_k, TUV_k, AKU_k$	technicko-ekonomické hodnocení porovnání stávajícího stavu s integrací MT	$n = i \cdot j = 36$ cyklus pro vyhodnocení všech kombinací MT a sestavené scénáře	stávající stav TE hodnocení pro MT scénáře spotřebičů tepla
metoda	MS Excel soubor pro vstupní data	MS Excel soubor s technickými parametry MT	Python funkce def spotřebič (j, k)	Python funkce def TEhod ()	Python funkce def CYKL (i, j) for MT(i) for scénář(j)	MS Excel soubor pro TE a přehled scénářů

Obr. 7 Popis stěžejních částí navrženého SW nástroje a použitých metod

Aby byl dodržen hlavní požadavek na tento SW, a to jeho univerzálnost, byly vytvořeny univerzální spotřebiče, které využijí tepelný potenciál plynové MT. Jak bylo zmíněno v úvodu, klíčovým faktorem pro vysokou účinnost je přímé využití spalin, proto je jeden ze spotřebičů zaměřen právě 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. 3, z té 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, jejíž výhodou je uživatelsky jednoduché a známé prostředí.

Tab. 3 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

Požadovaná vstupní data od uživatele jsou uvedena v Tab. 4. Vstupní data a jejich zpracování tvoří důležitou část celé simulace a na jejich kvalitě závisí přesnost získaných výsledků. Je nutné zdůraznit, že 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. V případě, že je provoz nestálý a je ovlivňován v průběhu pracovní doby, je třeba uvážit menší přesnost výsledků.

Kromě denních spotřeb elektrické energie, tepelné energie, zemního plynu a vody, jsou po uživateli požadovány další doplňující informace jako denní pracovní fond, počet pracovních dní v roce. Na základě těchto dat o stávajícím stavu provozu je provedeno technicko-ekonomické vyhodnocení, kde je porovnán stávající stav s možností integrace MT. Tím je implementován druhý bod metodiky: 2. *Vyhodnocení získaných dat a optimalizace.*

Tab. 4 Vstupní data od uživatele

Cena za elektrickou energii	Kč/kWh
Cena zemního plynu	Kč/kWh
Cena za teplo	Kč/kWh
Vodné + stočné	Kč/m ³
Denní spotřeba tepla	kWh/den
Denní spotřeba el. energie	kWh/den
Denní spotřeba zemního plynu	kWh/den
Denní spotřeba vody	m ³
Denní pracovní fond	h/den
Počet pracovních dní v roce	den/rok

Médium pro technologický ohřev	voda/pára/olej
Objem vody pro ohřev	m ³
Požadovaná teplota vody	°C
Teplota páry	°C
Tlak páry	MPa
Teplota napájecí vody	°C
Tlak napájecí vody	MPa
Množství produkované páry	kg/h
Teplota termo oleje	°C
Objem termo oleje	m ³
Objem vody k vysušení	m ³
Požadovaná teplota teplé užitkové vody	°C
Objem teplé užitkové vody	m ³
Teplota vody k akumulaci	°C

K posouzení vhodnosti výkonových variant MT se scénářem byla vytvořena funkce CYKL (Obr. 8), která provede výpočty pro všechny výkonové varianty a všechny scénáře. Výstupem SW nástroje je tak 36 scénářů integrace různých výkonů MT a pořadí spotřebičů. Nicméně, ne všechny získané možnosti budou vyhovující pro sledovaný provoz a záměr uživatele, čímž budou vyloučeny z dalšího porovnání.

```

def CYKL():
    wb = xlswriter.Workbook('MT_vysledky.xlsx')
    for i in range(0, 6):
        print(MT(df, i))
        turb = MT(df, i)
        soubor_scenaru = [scenar_1, scenar_2, scenar_3, scenar_4, scenar_5,
scenar_6]
        df4 = pd.DataFrame(columns=['scenar', 'elektřina produkce
[kWh/rok]', 'elektřina prodej [Kč/rok]', 'elektřina nákup [Kč/rok]', 'NG
[Kč/rok]', 'zisk [Kč/rok]', 'návrátnost [roky]']) #,'návrátnost [roky]'
        for scenar in soubor_scenaru:
            V_aku = 0
            Q_sus=0
            Q_TUV=0
            spotreba=0
            result_sc=[]
            Qzb = turb[1]
            for spotrebic in scenar:
                if (spotrebic == 'DRY'):
                    Q_sus=DRY(Qzb)
                    Qzb = Qzb - Q_sus
                    result_sc.insert(0, Q_sus)
                elif (spotrebic == 'TO'):
                    spotreba = TO(Qzb)
                    Qzb = Qzb - spotreba
                    result_sc.insert(1, spotreba)
                elif (spotrebic == 'TUV'):
                    Q_TUV=TUV(Qzb)
                    Qzb = Qzb - Q_TUV
                    result_sc.insert(2, Q_TUV)
                elif (spotrebic == 'AKU'):
                    V_aku=AKU(Qzb)
                    Qzb = Qzb
                    result_sc.insert(3, V_aku)
            if Qzb <= 0:
                break

            print(result_sc)
            if (Qzb) >= 0:
                print (scenar)
                TEhod_MT=TEhod(turb[0], turb[1], turb[2], turb[3], turb[4],
turb[5], turb[6], V_aku)
                print (TEhod(turb[0], turb[1], turb[2], turb[3], turb[4],
turb[5], turb[6], V_aku))
            else:
                print (scenar)
                print ('Nedostatek tepla pro všechny spotřebiče')
                TEhod_MT=TEhod(turb[0], turb[1], turb[2], turb[3],
turb[4], turb[5], turb[6], V_aku)

```

Obr. 8 Ukázka kódu pro funkci CYKL

3.1 Modul mikroturbíny

Po zadání vstupních dat následuje modul plynové MT, který je společný pro všechny scénáře podobně jako zadání vstupních dat. V této části jsou z vytvořeného excelovského katalogu načteny základní parametry o plynové MT, které jsou uvedeny v Tab. 5. Vzhledem k provozním zkušenostem s mikroturbínou Capstone C30 nabytých v Laboratoři energeticky náročných procesů a dominantní pozici na trhu s MT, jsou pro potřeby softwaru použity MT právě *Capstone Green Energy*. Vzhledem k vyšší pořizovací

ceně plynových mikroturbín, která byla zmíněna dříve, a zaměření na malé a střední podniky, bude vždy uvažována instalace pouze jedné plynové MT.

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, dle cenového rozhodnutí ERÚ (ERÚ, 2022).

Tab. 5: Základní charakteristiky modelové řady plynových MT Capstone (Capstone, 2021)

typ MT	elektrický výkon [kW]	elektrická účinnost [%]	tepelný výkon [kW]	teplota spalin [°C]	průtok spalin [kg/s]	cena [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. Tyto parametry vstupují do dalších modulů, které vyhodnocují denní spotřebu jednotlivých scénářů. Klíčovou hodnotou je především produkované teplo, protože jak bylo zdůrazněno, pro dosažení výhodné integrace plynové MT je třeba maximálně využít potenciál horkých spalin. Produkované teplo je stěžejním parametrem, který vstupuje do všech dalších modulů a funguje jako rozhodovací parametr k určení dostupného tepla pro každý spotřebič. V neposlední řadě je z udaného počtu provozních hodin stanovena doba životnosti plynové MT. Z provozních zkušeností je po 40 000 hodinách provozu měněn rotor MT. Tento servisní zásah představuje zhruba jednu třetinu původní výše investice do MT.

3.2 Modul přímého sušení

Přímé využití spalin je klíčovým předpokladem pro dosažení vysoké kombinované účinnosti plynové MT. Jak bylo zmíněno dříve, spaliny, které produkuje MT spalování paliva s vysokým přebytkem vzduchu, jsou velmi čisté a je tak možné jejich využití pro přímé sušení. To bylo experimentálně ověřeno v zázemí Laboratoře energeticky náročných procesů, kdy byly spaliny z MT úspěšně využity pro sušení prádla.

Při sušení dochází k přímému kontaktu spalin a sušeného materiálu, proto je nutné předem uvážit vhodnost použití vzhledem k teplotě spalin a charakteru materiálu. Dalším předpokladem pro přímé sušení je existující sušící zařízení vhodné pro použití spalin z MT.

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. Probíhá na denní bázi, protože jsou provozní data dostupná obvykle „za směnu“ nebo den. Pro výpočet je také např. zvolen zjednodušeně bod varu vody 100 °C. (Jinak by musel uživatel zadávat nadmořskou výšku). Hlavním parametrem pro výpočet spotřeby tepla na sušení je tedy množství vody, které je nutné ze sušeného materiálu odpařit.

3.3 Modul pro technologický ohřev

Pod pojmem technologický ohřev se rozumí ohřev, resp. předeřev procesních proudů nutných pro činnost samotného technologického provozu. V tomto modulu je výběr

omezen na výrobu páry, ohřev/předehřev vody nebo termo oleje. Podobně jako v předchozím případě je třeba doplnit údaje o těchto prouděch – vybrat druh média z nabízených možností, požadovanou teplotu a produkci (Tab. 6). Dle zadaných parametrů je stanovena spotřeba tepla pro tuto operaci.

Tab. 6 Specifické vstupy pro modul technologického ohřevu

Pára	Teplá voda	Termo olej
Teplota [°C]	Objem vody [m ³]	Objem termo oleje [m ³]
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 páry. Pro tento výpočet byla v SW nástroje použita knihovna IAPWS, která poskytuje vlastnosti vody, páry a vodných roztoků.

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

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. Účinnost produkce páry byla stanovena na 80%, což je průměrná hodnota tepelné účinnosti parních kotlů/vyvíječů páry (Miura Co, 2021; Spirax Sarco, 2021).

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).

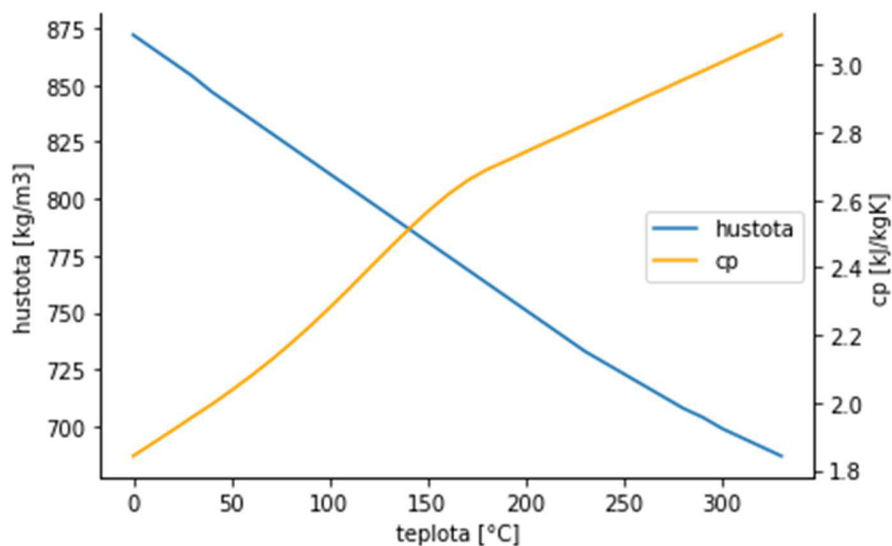
Poslední variantou v modulu technologického ohřevu je využití termo oleje. Na základě technických parametrů byla vybrán termo olej typu Paratherm™ HE HTF (Paratherm, 2022) díky vysoké provozní teplotě až 315 °C. Pro stanovení potřebného tepla na ohřev

zadaného množství termo oleje na požadovanou teplotu je třeba určit měrnou tepelnou kapacitu oleje a jeho hustotu. Oba tyto parametry jsou závislé na teplotě oleje – s rostoucí teplotou klesá jeho hustota a roste měrná tepelná kapacita. V případě hustoty se jedná o lineární závislost, pro měrnou tepelnou kapacitu byl použit polynom 4. stupně (4) (viz Obr. 9). Pro toto určení byla využita knihovna pro vědecké výpočty NumPy. Následně je výpočet obdobný jako v případě vody:

$$c_{p \text{ olej}} = 3 \cdot 10^{-10} \cdot T^4 - 2 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,0015 \cdot T + 1,8618 \quad (4)$$

$$Q_{\text{olej}} = V_{\text{olej}} \cdot \rho_{\text{olej}} \cdot c_{p \text{ olej}} \cdot (T_{\text{olej}} - 20) \quad (5)$$

kde Q_{olej} [kJ/den] je teplo na ohřev termo oleje, V_{olej} [m³] objem oleje, $c_{p \text{ olej}}$ [kJ/kg·K] je měrná tepelná kapacita oleje, T_{olej} [°C] je požadovaná teplota oleje, a ρ_{olej} je hustota termo oleje.



Obr. 9 Graf závislosti hustoty a měrné tepelné kapacity termo oleje na teplotě

3.4 Modul pro přípravu TUV

Dalším potenciálním využitím tepla spalin je ohřev, resp. přehřev teplé užitkové vody (TUV) pro potřeby celého provozu nebo i areálu. V tomto případě je situace obdobná jako u předchozího technologického ohřevu vody (3) – modul využije uživatelem zadanou požadovanou teplotu a objem vody, výstupem je pak spotřebované teplo. V tomto modulu je možné zohlednit i zásobování teplé vody do dalších objektů nebo vytápění prostor.

3.5 Modul akumulace

Akumulace je v tomto SW nástroji uvažována jako finální technologie pro uchování veškerého zbytkového tepla, které je dostupné. Z tohoto důvodu je v navrhovaných scénářích akumulace vždy na posledním místě. Veškeré zbytkové teplo tak může být uloženo v akumulární nádrži a později využito jako TUV. Uživatel si může stanovit teploty vody k akumulaci a následně je SW nástrojem určen objem vody, kterou je možné na tuto teplotu s dostupným teplem ohřát. Protože není řešena dynamika provozu, není ani řešena problematika vybíjení nádrže. Výpočet staví na bilančním přístupu, což je adekvátní účelu nástroje (výběr MT).

$$V_{AKU} = \frac{Q_{zb}}{c_p \cdot (T_{AKU} - T_0) \cdot \rho_w} \quad (6)$$

kde Q_{zb} [kJ/den] je zbytkové teplo k akumulaci, V_{AKU} [m³] objem vody k akumulaci, c_p [kJ/kg·K] je měrná tepelná kapacita vody, T_{AKU} [°C] je požadovaná teplota vody, T_0 [°C] teplota vody z vodovodního řádu, a ρ_w je hustota vody.

3.6 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 ze zadaných denních spotřeb energií [kWh] a vody [m³], denního pracovního fondu [hod], počtu pracovních dní v roce a cen za energii a vodu, stanoveny celkové roční náklady za energii a vodu [Kč]. Uživatelem zadané ceny obsahují veškeré související poplatky a daně – v případě zemního plynu tedy cenu za jednotku plynu, ceny za distribuci plynu, poplatky za služby, daně za plyn a ceny za rezervovanou kapacitu. Obdobně tak cena za elektrickou energii – cenu za jednotku elektřiny, ceny za distribuci elektřiny, poplatků za služby operátora, příspěvku na obnovitelné zdroje energie (OZE) a kombinovanou výrobu elektřiny a tepla (KVET), a daň z elektřiny. Cena za vodu tvoří vodné, stočné a případně úpravu vody za jednotku.

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. Následně je porovnána elektrická spotřeba zadaná a produkovaná MT. Pokud je nedostatek elektrické energie k pokrytí vlastní spotřeby, je tento rozdíl dokoupen z centrální sítě. V opačném případě přebytku je elektrická energie prodána. K prodeji elektrické energie se váže i zisk *zeleného bonusu* pro elektřinu vyrobenou z KVET ve výrobně elektřiny spalováním zemního plynu (ERÚ, 2022) a bonus za decentralizovanou výrobu. Pro stanovení těchto bonusů je třeba vyčíslit úsporu primární energie ÚPE [%] (7), 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:

$$\dot{UPE} = \left(1 - \frac{1}{\frac{\eta_q^T}{\eta_r^V} + \frac{\eta_e^T}{\eta_r^E}} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

kde η_q^T [%] tepelná účinnost MT, η_e^T [%] elektrická účinnost MT, $\eta_r^V = 80$ % je referenční hodnota tepelné účinnosti a $\eta_r^E = 30$ % je referenční hodnota elektrické účinnosti.

Další položkou provozních nákladů je spotřeba vody. V případě MT se jedná o vodu, která je nutná pro produkci páry, technologického ohřevu vody, teplé užitkové vody a vody k akumulaci. V poslední řadě jsou do provozních nákladů zahrnuty servisní náklady MT v podobě roční paušální částky.

Kombinovaná účinnost MT η_o [%] (8) je orientační a udává podíl produkované energie, elektrické P_{el} [kWh/rok] a tepelné Q_t [kWh/rok], k množství použitého paliva CON_{ZP} [kWh/rok]:

$$\eta_o = \frac{Q_t + P_{el}}{CON_{ZP}} \cdot 100 \quad (8)$$

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) a diskontní doby návratnosti (DPB). Diskontní sazba [%] dle (ČNB, 2022) je aktuálně na úrovni 4,75 %, pro tento SW nástroj byla diskontní sazba zaokrouhlena na 5 % i vzhledem k rostoucí tendenci, kterou diskontní sazba v poslední letech vykazuje. Diskontní peněžní tok je určen z rozdílu výnosů a nákladů se zohledněním diskontní sazby.

$$DCF = \sum_i^n \frac{(výnosy - náklady)_i}{(1 + r)^i} \quad (9)$$

$$DPB = \frac{inv_i - DCF_i}{DCF_i - DCF_{i+1}} \quad (10)$$

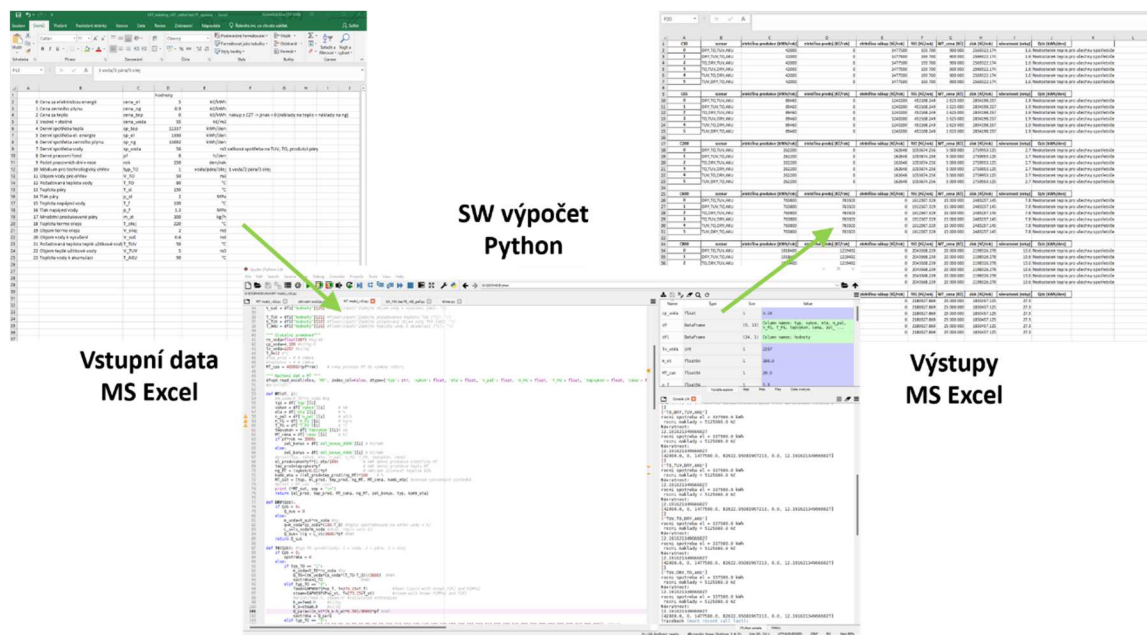
kde i je označení daného roku, r je diskontní sazba [%] a inv [Kč] je počáteční investice.

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 popsaná výše a proměnné tvoří cena za elektřinu a zemní plyn. Díky této funkci uvidí uživatel změnu v návratnosti investice vzhledem ke změnám cen za energii, které jsou měněny v rozsahu 2–20 Kč/kWh, s krokem 2 Kč.

3.7 Výpis výsledků

Výsledky SW nástroje jsou uživateli předány ve formátu MS Excel (Obr. 10), konkrétně pro každou výkonovou variantu MT je sestaven vlastní list s výsledky (Příloha 1).



Obr. 10 Uživatelská prostředí vyvinutého SW

Hlavním výstupem SW nástroje jsou údaje popisující spotřeby jednotlivých spotřebičů odebírajících teplo na denní bázi [kWh/den] a následně výstupy technicko-ekonomického hodnocení:

- produkovaný tepelný výkon MT [kWh/rok],
- produkci elektřiny [kWh/rok],
- prodej/nákup elektřiny [Kč/rok],
- náklady na zemní plyn [Kč/rok],
- zisky vznikající úsporou energie [Kč/rok],
- provozní náklady [Kč/rok], návratnost investice [rok].

4 Integrace mikroturbíny do prádelenského provozu

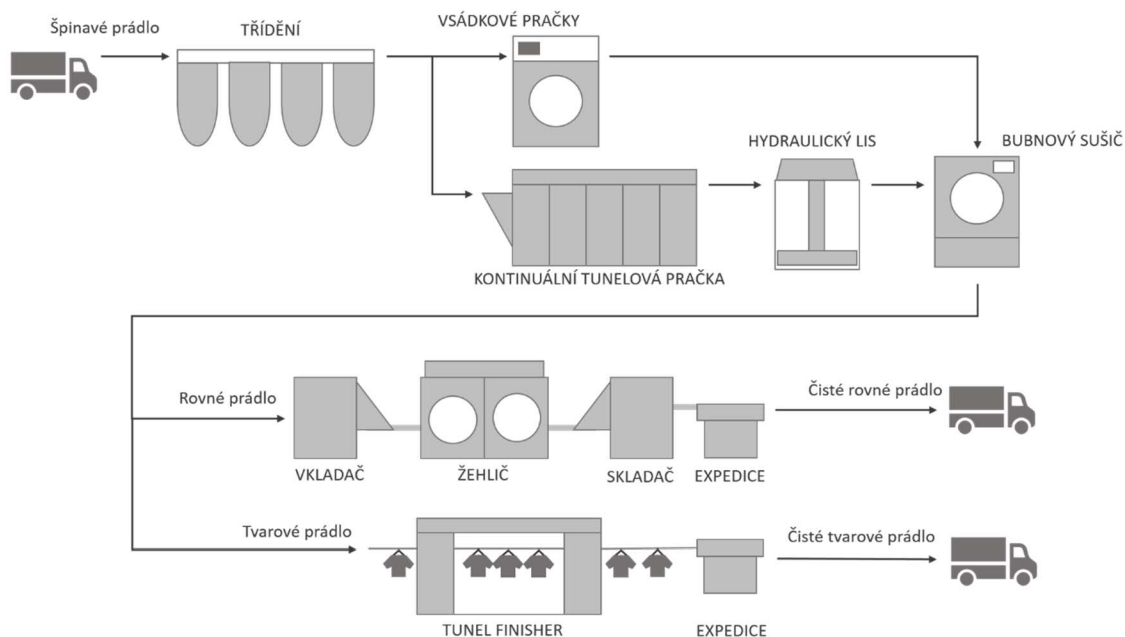
Kapitola je založena na publikaci KONEČNÁ E., MÁŠA, V.; MIKLAS, V.; SLOVÁK, R.; JÖRDENING, A.; BLAHA, V. Gas Microturbine as a main source of energy for industrial laundry – feasibility study. Přijato k recenznímu řízení do časopisu Energy.

Snižování spotřeb má velký vliv na všechna odvětví průmyslu, především pak na energeticky náročné procesy. Jedním z takových procesů je i profesní péče o prádlo, i proto bylo prádelenství zvoleno jako případová studie pro ověření navržené metodiky (kap. 2.2) vyvíjeného SW nástroje (kap. 3). Dalším důvodem je dlouholetý výzkum této tematiky v Laboratoři energeticky náročných procesů.

Cílem prádelenského procesu je umožnit znovu využití textilií a prádla z nemocnic, pohostinství nebo domácností. Průmyslové prádelenství se velmi liší od domácího praní, především ve zpracovaném množství prádla a maximálně možném nahrazení lidské práce pomocí strojního vybavení. Pro dosažení čistého prádla je potřeba poměrně velké množství energie, vody a chemikálií. V práci Máša et al. (2013) je měrná spotřeba tepelné energie stanovena na 0,91 kWh/kg_{DL} a měrná spotřeba elektrické energie na 0,15 kWh/kg_{DL} (spotřeby jsou vztaženy na jeden kilogram suchého prádla). Pro praní je potřeba voda o teplotě mezi 30-90 °C, přičemž je stále nejčastěji využíván parní ohřev. Produkovaná pára je využita nejen pro ohřev prací vody, ale i žehlení a dokončovací operace. Výstupní proudy jsou plynné emise a odpadní voda. Tyto výstupní proudy mají vysoký potenciál pro znovu využití v procesu. (Máša et al. 2013)

Schéma na Obr. 11 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 vytříděno do kontinuální

tunelové pračky, která pracuje v 1-2 minutových cyklech. Ve většině průmyslových prádelnách tunelovou pračku doplňují i vsádkové pračky, které slouží k odbavení malých objednávek, předepírek a dalších konkrétních potřebách pro správné zpracování prádla. Po vyprání, je odstraněna z prádla voda pomocí hydraulického lisu. K rozvolnění takto vzniklého "koláče" jsou využívány bubnové sušiče. Prádlo se zbytkovou vlhkostí zhruba $0,5 \text{ kg}_v/\text{kg}_{DL}$ je dále sušeno nebo žehleno. Prádlo, které nevyžaduje žehlení je sušeno v bubnových sušičích. Strojové žehlení je prováděno bez předchozího sušení. Rovné prádlo je dále zpracováno v průmyslových žehličích, které jsou obvykle vybaveny automatickým vkladačem na vstupu prádla do žehliče, a skladačem na jeho konci. Po skládání je prádlo baleno a odbaveno k expedici z prádelny zpět k zákazníkovi. Tvarové prádlo je žehleno v tzv. tunel finisheru, kde je pověšeno na ramínkách. Tunel finisher využívá turbulentního proudu vzduchu s přímým nástřikem páry ($120 \text{ }^\circ\text{C}$) na prádlo. Dochází tak k rozvolnění vláken prádla a navrácení původního tvaru. Prádlo je následně složeno nebo rovnou předáno k expedici zákazníkovi.



Obr. 11 Schéma jednotlivých operací v průmyslové prádelně

Všechny kroky kromě samotného transportu prádla z/do prádelny jsou spojeny s vodou. Během praní je potřeba dodat velké množství vody o vysoké teplotě (až $90 \text{ }^\circ\text{C}$). 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.

Žehlení je velmi energeticky náročný proces, kdy dodávané teplo odpařuje zbytkovou vlhkost z prádla a také rozvolňuje vlákna. V prádelnách, kde je zpracováno velké množství rovného prádla, je žehlení nejvíce energeticky náročným procesem.

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. Složení prádla je uvedeno v Tab. 7. Ve výpočtu je zanedbána tepelná kapacita prádla a jeho mechanické vlastnosti.

Tab. 7 Složení prádla modelového prádelenského provozu

Rovné prádlo	59 %
Tvarové prádlo	29 %
Froté prádlo	12 %

SW nástroj bude ověřen na dvou případových studiích – moderní středně velký prádelenský provoz využívající odpadní teplo a starší neoptimalizovaná prádelna s parním ohřevem, obojí s kapacitou 10 t prádla/8 hod.

4.1 Moderní prádelenský provoz využívající odpadní teplo

Vstupní parametry pro středně velký prádelenský provoz byly určeny jako kombinace provozních zkušeností z reálného prádelenského provozu, simulačního modelu a procesní integrace prádelny. V Tab. 8 uvedené níže jsou parametry prádelenského provozu případové studie, které se vztahují k základnímu posouzení stávajícího stavu a odpovídajících celkových nákladů.

Tab. 8 Vstupní data pro případovou studii

Zpracovatelská kapacita	10	[tun/den]
Provozní hodiny prádelny	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 ³ /den]
Cena elektřiny	5	[Kč/kWh]
Cena zemního plynu	0,9	[Kč/kWh]
Cena vody	95	[Kč/m ³]

Další část dat potřebná k vyhodnocení vhodnosti MT jako hlavního zdroje (viz Tab. 9), se vztahuje ke konkrétním spotřebičům, které jsou vyhodnocovány v rámci jednotlivých scénářů. Jak bylo uvedeno v kap. 2.1.3, parní hospodářství v průmyslové prádelně je běžnou praxí, nicméně je spojeno s vysokými provozními a servisními náklady, a její eliminace je současným trendem v této oblasti. Proto je jedním z dílčích cílů také eliminace páry a případová studie je zaměřena na přímé sušení a ohřev vody pro prací proces. Prádelenský provoz se vyznačuje vysokou spotřebou vody o poměrně vysoké teplotě. V tomto případě je prací voda ohřívána na 80 °C. Při porovnání spotřeby vody a objemu vody k sušení je na první pohled jasný nepoměr, který je způsoben skladbou prádla. Jak bylo zmíněno výše v popisu prádelenského procesu, přebytečná voda po praní je z prádla vylisována pryč a další zpracování záleží na typu prádla. Protože modelová prádelna zpracovává převážně rovné prádlo, na klasické bubnové sušiče připadá 12 % prádla, tedy 0,6 m³.

Tab. 9 Vstupní parametry případové studie – spotřebiče

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

4.1.1 Výsledky pro moderní prádelenský provoz využívající odpadní teplo

Použitím SW nástroje spolu s výše popsány mi provozními daty bylo vyhodnoceno 36 scénářů, které kombinují pořadí jednotlivých spotřebičů a výkonových variant plynových MT. Získané scénáře a jejich hlavní výstupy budou blíže rozebrány v této kapitole.

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

- voda-voda využívá odpadní vodu pracího tunelu k přehřevu 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 přehřev vzduchu do tunel finisheru. (Slovák, 2018)

V případě této modelové prádelny je klíčovým procesem technologický ohřev vody pro prací proces, na druhém místě je potom sušení a žehlení. Z tohoto důvodu jsou z vyhodnocení nejdůležitější scénáře 1–4, které na první místo staví právě technologický ohřev nebo sušení. Přehled scénářů a základních parametrů pro každou výkonovou variantu MT jsou uvedeny v Tab. 10 a Tab. 11.

Tab. 10 Vybrané parametry technicko-ekonomického hodnocení

typ MT	elektřina produkce [kWh/rok]	nákup/prodej elektřiny [Kč/rok]	teplo produkce [kWh/rok]	spotřeba zemního plynu [kWh/rok]	provozní náklady MT [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
C200	262 200	-376 500	562 021	921 346	-2 393 211
C600	763 800	763 503	1 729 295	2 834 910	-2 975 415
C800	1 018 400	1 219 492	2 291 316	3 756 255	-3 348 638
C1000	1 273 000	1 675 481	2 896 569	4 748 474	-3 785 646

Tab. 11 Vybrané scénáře pro moderní prádelenský provoz

scénář 1 DRY, TO, TUV, AKU				
typ MT	dostupné teplo po	dostupné teplo po	dostupné teplo po	objem vody k
	DRY	TO	TUV	AKU
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[m ³]
C30	88,9	-6208,5	-6428,5	-71,2
C65	511,5	-5786,0	-6005,9	-66,5
C200	1811,9	-4485,6	-4705,5	-52,1
C600	6481,0	183,5	-36,4	-0,4
C800	8729,1	2431,6	2211,7	24,5
C1000	11 150,1	4852,6	4632,7	51,3

scénář 2 DRY, TUV, TO, AKU				
typ MT	dostupné teplo po	dostupné teplo po	dostupné teplo po	objem vody k
	DRY	TUV	TO	AKU
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[m ³]
C30	88,9	-131,0	-6428,5	-71,2
C65	511,5	291,5	-6005,9	-66,5
C200	1811,9	1592,0	-4705,5	-52,1
C600	6481,0	6261,1	-36,4	-0,4
C800	8729,1	8509,2	2211,7	24,5
C1000	11 150,1	10 930,2	4632,7	51,3

scénář 3 TO, DRY, TUV, AKU				
typ MT	dostupné teplo po	dostupné teplo po	dostupné teplo po	objem vody k
	TO	DRY	TUV	AKU
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[m ³]
C30	-5772,4	-6208,5	-6428,5	-71,2
C65	-5349,8	-5786,0	-6005,9	-66,5
C200	-4049,4	-4485,6	-4705,5	-52,1
C600	619,7	183,5	-36,4	-0,4
C800	2867,8	2431,6	2211,7	24,5
C1000	5288,8	4852,6	4632,7	51,3

scénář 4 TO, TUV, DRY, AKU				
typ MT	dostupné teplo po	dostupné teplo po	dostupné teplo po	objem vody k
	TO	TUV	DRY	AKU
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[m ³]

C30	-5772,4	-5992,3	-6428,5	-71,2
C65	-5349,8	-5569,8	-6005,9	-66,5
C200	-4049,4	-4269,4	-4705,5	-52,1
C600	619,7	399,7	-36,4	-0,4
C800	2867,8	2647,8	2211,7	24,5
C1000	5288,8	5068,8	4632,7	51,3

Je patrné, že MT typu C30, C65 a C200, nesplňují základní předpoklad pokrytí tepelných spotřeb jednotlivých spotřebičů, respektive ve scénáři 1 a 2 zvládnou pokrýt spotřebu tepla na sušení prádla. Nicméně toto není dostačující stav. Dál budou rozebrány tedy MT typu C600, C800 a C1000, kde jsou kompletně pokryty všechny spotřebiče tepla, nezávisle na jejich pořadí a je akumulována teplá voda. V případě MT C600 je možné akumulaci realizovat využitím odpadního tepla, pro MT C800 je akumulace přes 24 m³, což tvoří celkovou polovinu spotřeby vody pro prací proces, a pro MT C1000 s více než 50 m³ která by pokryla kompletní spotřebu vody prádelny. Nicméně u C800 i C1000, by se jednalo o velké zásobníky teplé vody, které představují jak ekonomicky, tak prostorově velmi náročné řešení. Toto 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_{DL}, pro tunel finisher 0,96 kWh/kg_{DL}. 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.

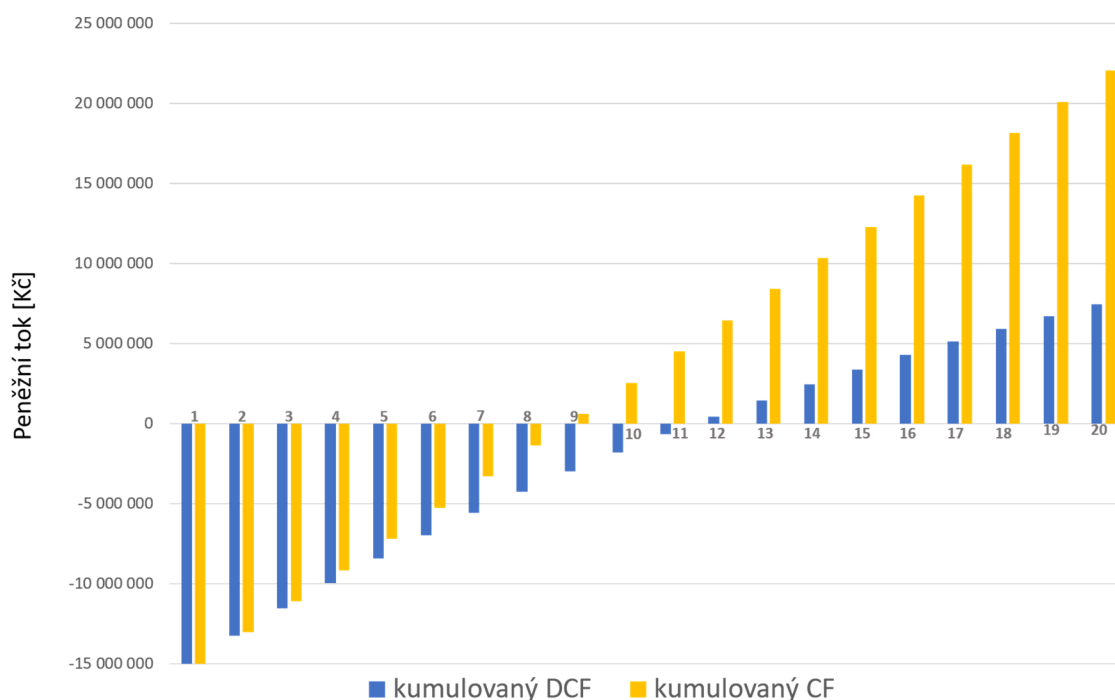
Hlavním kritériem při takto nákladné investici je její návratnost. Ta souvisí s kombinovanou účinností zdroje. Z Tab. 12 je potom zřejmé, která výkonová varianta MT C600 je nejvýhodnější. S pracovním fondem 8 hodin za den, 250 dní v roce to odpovídá právě 20 rokům do nákladného servisního zásahu po 40 000 hodinách. Z tohoto důvodu je doporučeno, aby návratnost nepřekročila tuto dobu. Tomuto požadavku vyhovuje MT typ C600, kde je návratnost 11,6 let. U MT C800 je návratnost

pod touto hranicí, nicméně uvážíme-li náklady na servisní zásah, návratnost by se zvýšila o 2,13 roku. Mikroturbína C1000 výrazně převyšuje tuto délku investice (o více než 27 let) a tím už se dostává za druhý servisní interval. MT s výkonem 1 MW je velmi nákladná a úspory v produkci energie nejsou dostatečné, aby byla v tomto případě MT rentabilní. Všechny MT však vykazují vysokou kombinovanou účinnost, nad 87,5 % a úsporu primární energie nad 46 %.

Tab. 12 Technické a ekonomické parametry pro vybrané výkonové varianty MT

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

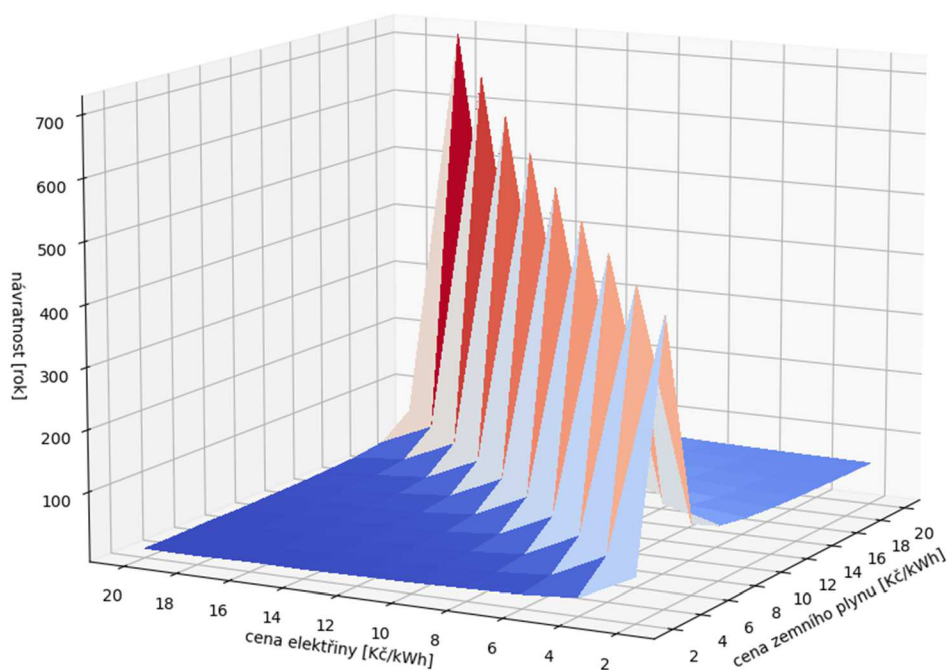
Na Obr. 12 je graficky znázorněn kumulovaný peněžní tok (CF) a kumulovaný diskontní peněžní tok (DCF). V případě MT je důležitým parametrem její návratnosti poměr ceny elektřiny a zemního plynu. Z tohoto důvodu byla provedena citlivostní analýza, jejíž



Obr. 12 Peněžní toky pro investici do MT C600

grafické znázornění je na Obr. 13. 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, kde se s rostoucí cenou návratnost zvyšuje. S rostoucím rozdílem v cenách elektřiny a zemního plynu je návratnost MT lepší. V případě, že cena za zemní plyn odpovídá 0,9 Kč/kWh a cena elektrické energie by se držela stabilně na hodnotě 7,5 Kč/kWh, na kterou se vyšplhala koncem roku 2021 (kurzy.cz, 2022), odpovídá návratnost 8 rokům. Naopak při poklesu ceny ke 2 Kč/kWh návratnost investice rapidně naroste až k hodnotě 32 let.

V případě snížení ceny za zemní plyn na polovinu – 0,45 Kč/kWh (při pevné ceně za elektrickou energii (5 Kč/kWh), se návratnost zkrátí zhruba o jeden rok. Na druhou stranu, při prudkém nárůstu ceny na 3 Kč/kWh návratnost výrazně roste na 21,4 roku. Návratnost MT je více citlivá na cenu elektrické energie, a především na poměr cen elektřiny a zemního plynu, kdy s klesajícím rozdílem cen roste návratnost MT.



Obr. 13 Citlivostní analýza pro MT C600

4.2 Starší průmyslová prádelna bez využití odpadního tepla

Druhá případová studie je vytvořena pro průmyslovou prádelnu o stejné zpracovatelské kapacitě jako v případě první studie, tedy 10 tun prádla za pracovní den. Hlavním rozdílem je absence využití odpadního tepla, kterým obvykle starší provozy z konce minulého století nedisponují (z toho plynoucí označení starší). Vstupní parametry prádelny jsou totožné jako v kap. 4.1, změna se týká pouze spotřeby tepla, zemního plynu a spotřeby vody, která je o 6 m³ vyšší než v případě první prádelny (viz Tab. 13).

Tab. 13 Provozní parametry pro průmyslovou prádelnu

Zpracovatelská kapacita	10	[t/den]
Provozní hodiny prádelny	2000	[hod/rok]
Denní elektrická spotřeba	1350	[kWh/den]
Denní spotřeba tepla	11337	[kWh/den]
Denní spotřeba plynu	13692	[kWh/den]
Denní spotřeba vody	56	[m ³ /den]
Cena elektřiny	5	[Kč/kWh]
Cena zemního plynu	0,9	[Kč/kWh]
Cena vody	95	[Kč/m ³]
Objem vody pro ohřev	81	[m ³]
Požadovaná teplota vody	80	[°C]
Objem vody k sušení	0,6	[m ³]
Požadovaná teplota teplé užitkové	50	[°C]
Objem teplé užitkové vody	5	[m ³]
Teplota vody k akumulaci	90	[°C]

Při prvním pohledu na zadané parametry je vidět vysoká spotřeba tepla a zemního plynu, která je způsobena absencí jakékoliv optimalizace, která by využila odpadní teplo, jako tomu bylo v případě moderní průmyslové prádelny v kap. 4.1.

Využití plynové MT jako hlavního zdroje může navíc vést k eliminaci parního hospodářství, podobně jako bylo uvedeno v kap. 4.1.

4.2.1 Výsledky pro starší průmyslovou prádelnu bez využití odpadního tepla

Použitím SW nástroje spolu s výše popsány mi provozními daty bylo opět vyhodnoceno 36 scénářů, které kombinují pořadí jednotlivých spotřebičů a výkonových variant plynové MT. Stejně jako v předchozím případě, jsou vyhodnoceny pro prádelnu scénáře 1–4, které na první místo staví sušení nebo technologický ohřev prací vody. Přehled scénářů a základních parametrů pro každou výkonovou variantu MT jsou opět uvedeny v Tab. 14 a Tab. 15

Tab. 14 Vybrané parametry technicko-ekonomického hodnocení

typ MT	elektrina produkce [kWh/rok]	nákup/prodej elektriny [Kč/rok]	teplo produkce [kWh/rok]	spotřeba zemního plynu [kWh/rok]	provozní náklady [Kč/rok]
C30	42 000	-1 477 500	131 285	215 222	-1 813 700
C65	89 460	-1 240 200	236 913	388 383	-1 732 244
C200	262 200	-376 500	562 021	921 346	-1 348 211
C600	763 800	763 503	1 729 295	2 834 910	-1 930 415
C800	1 018 400	1 219 492	2 291 316	3 756 255	-2 303 638
C1000	1 273 000	1 675 480	2 896 569	4 748 474	-2 740 646

Tab. 15 Vybrané scénáře pro starší prádelenský provoz

scénář 1 DRY, TO, TUV, AKU				
typ MT	dostupné teplo po DRY [kWh]	dostupné teplo po TO [kWh]	dostupné teplo po TUV [kWh]	objem vody k AKU [m ³]
C30	88,9	-6287,2	-6507,2	-72,1
C65	511,5	-5864,7	-6084,7	-67,4
C200	1811,9	-4564,3	-4784,2	-52,9
C600	6481,0	104,8	-115,1	-1,3
C800	8729,1	2352,9	2133,0	23,6
C1000	11 150,1	4773,9	4553,9	50,4

scénář 2 DRY, TUV, TO, AKU				
typ MT	dostupné teplo po DRY [kWh]	dostupné teplo po TUV [kWh]	dostupné teplo po TO [kWh]	objem vody k AKU [m ³]
C30	88,9	-130,9	-6507,2	-72,1

C65	511,5	291,5	-6084,7	-67,4
C200	1811,9	1591,9	-4784,2	-52,9
C600	6481,0	6261,1	-115,1	-1,3
C800	8729,1	8509,2	2133,0	23,6
C1000	11 150,1	10 930,2	4553,9	50,4

scénář 3 TO, DRY, TUV, AKU				
typ MT	dostupné teplo po TO [kWh]	dostupné teplo po DRY [kWh]	dostupné teplo po TUV [kWh]	objem vody k AKU [m ³]
C30	-5851,1	-6287,2	-6507,2	-72,1
C65	-5428,6	-5864,7	-6084,7	-67,4
C200	-4128,1	-4564,3	-4784,2	-52,9
C600	540,9	104,8	-115,1	-1,3
C800	2789,1	2352,9	2133,0	23,6
C1000	5210,1	4773,9	4553,9	50,4

scénář 4 TO, TUV, DRY, AKU				
typ MT	dostupné teplo po TO [kWh]	dostupné teplo po TUV [kWh]	dostupné teplo po DRY [kWh]	objem vody k AKU [m ³]
C30	-5851,1	-6071,0	-6507,2	-72,1
C65	-5428,6	-5648,5	-6084,7	-67,4
C200	-4128,1	-4348,1	-4784,2	-52,9
C600	540,9	321,0	-115,1	-1,3
C800	2789,1	2569,1	2133,0	23,6
C1000	5210,1	4990,1	4553,9	50,4

Z porovnání denních spotřeb tepla prádelny s využitím odpadního tepla a neoptimalizované prádelny je patrné, že rozdíl spotřeb je téměř poloviční – 46,2%. Celková roční spotřeba tohoto procesu 2834 MWh/rok výběr výkonů MT značně omezuje. Této spotřebě odpovídá největší z nabízených variant, mikroturbína C1000.

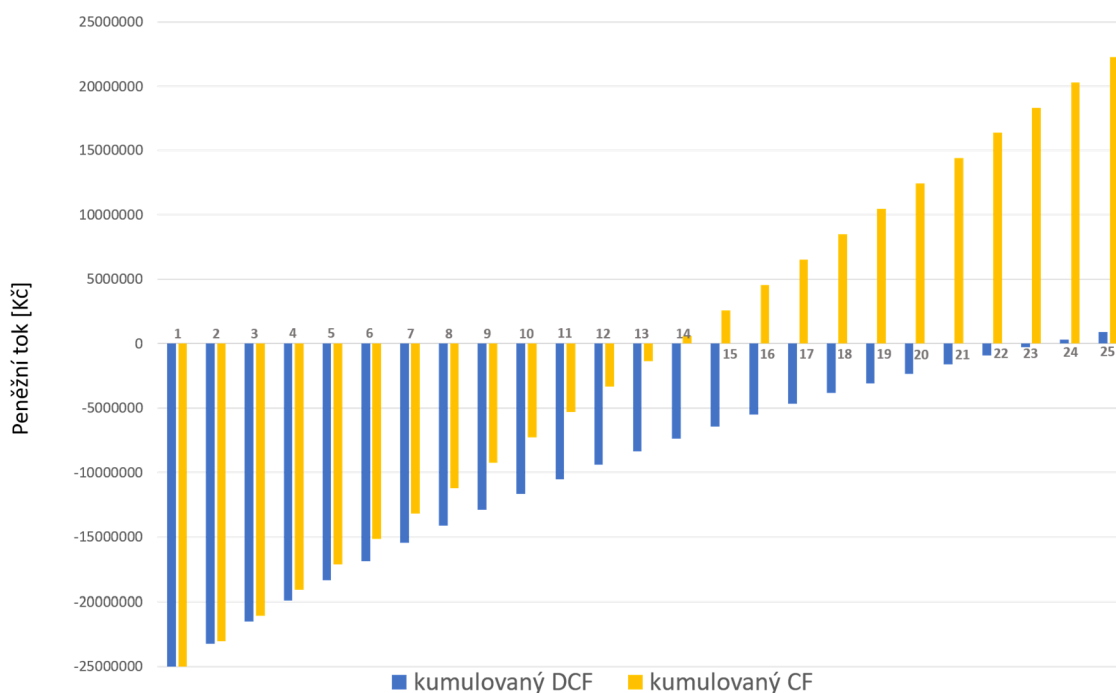
Podle scénářů na pokrytí spotřebičů stačí i menší výkony MT, nicméně v případě tohoto prádelenského provozu je možné využít tepelný výkon spalin (11 586 kWh/den) z MT C1000 pro všechny spotřebiče včetně žehlení, ohřevu prací vody a akumulace (6,7 m³). Přehled spotřeby jednotlivých spotřebičů včetně žehlení je uveden v Tab. 16.

Tab. 16 Spotřeby jednotlivých spotřebičů a akumulace

	spotřeba tepla [kWh/den]
DRY	436
TO	3936
TUV	220
AKU	611
žehlení	6383

Podobně jako v předchozí případové studii, lze uvažovat o využití odpadního tepla právě pro ohřev TUV a vody k akumulaci. Nicméně pro tuto prádelnu, lze využít všech čtyř vybraných scénářů a nezávisle na pořadí spotřebičů bude pokryta jejich kompletní tepelná spotřeba.

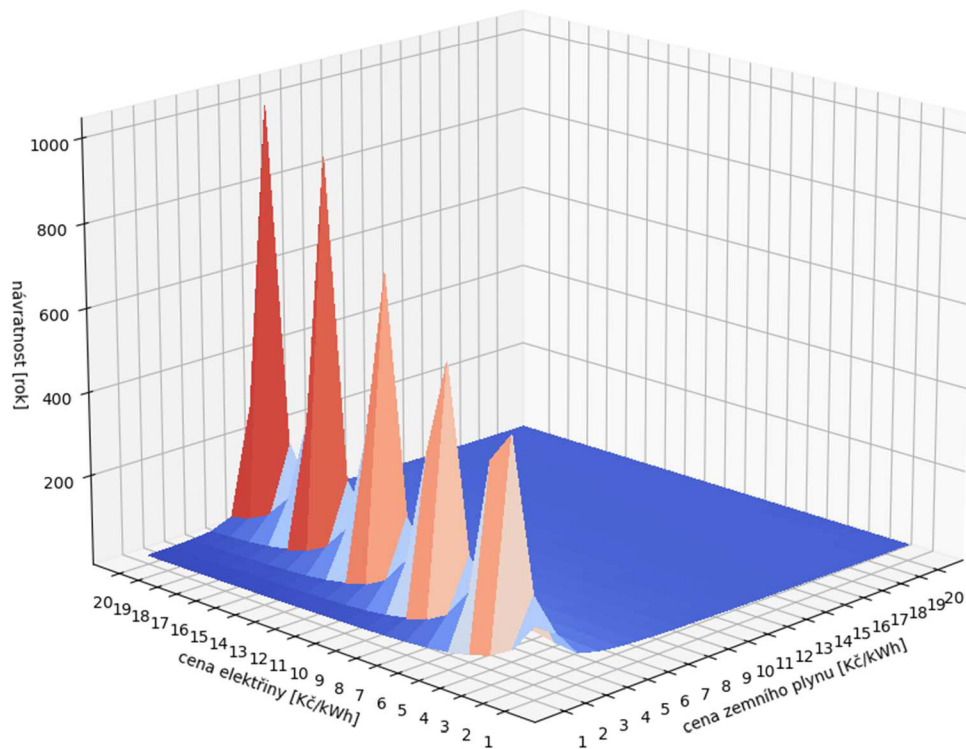
Z vysoké spotřeby tepla v posuzované prádelně vyplývá nutnost vysokého výkonu MT, který je spojen i s vysokou pořizovací cenou cca 25 mil. Kč. Z tohoto důvodu není ekonomické vyhodnocení této MT uspokojivé. Návratnost investice překračuje limit 20 let, který byl stanoven. Konkrétně je návratnost 23,5 roku, jak lze vidět na Obr. 14, uvaži-li se investice do servisního zásahu na výměnu rotoru po 40 000 provozních



Obr. 14 Peněžní toky pro investici do MT C1000

hodinách, stoupá na 29,4 let. Je tedy patrné, že z pohledu investora není tato varianta zajímavá, protože zisk z úspor je generován až po další nákladné investici.

I pro tuto variantu byla provedena citlivostní analýza na cenu elektřiny a cenu zemního plynu (Obr. 15). Aby takto výkonná MT byla rentabilní, musela by cena elektrické energie vzrůst na 8 Kč/kWh (při zachování ceny zemního plynu 0,9 Kč/kWh), potom se návratnost pohybuje kolem 12 let. Přesto je 12 let pro některé investory stále vysokou hodnotou, aby bylo dosaženo návratnosti kolem 8 let, musela by cena elektřiny vzrůst alespoň na 12 Kč/kWh, případně by muselo dojít k poklesu ceny zemního plynu na polovinu, tedy 0,45 Kč/kWh, při 10 Kč/kWh za elektřinu.



Obr. 15 Citlivostní analýza pro MT C1000

Na tomto příkladu je jednoznačně patrná nutnost využití dostupného odpadního tepla, které se v provozu nachází, obzvláště před výběrem nového hlavního zdroje energie.

4.3 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, případně i budoucích plánů s ním. Znalost provozu je obzvláště důležitá v případech, kdy v provozu vystupují i další specifické spotřebiče tepla, které je třeba do připravených modulů SW zahrnout. Příkladem jsou výše popsání případové studie prádelenského provozu, kde chybí proces žehlení, který je taktéž spotřebičem tepla a byl zahrnut do „technologického ohřevu“. Při detailní znalosti provozu však uživatel získá dostatečné údaje, aby mohl vyhodnotit vhodnost využití MT i v takovém případě.

Jak je patrné ze srovnání případových studií v kap. 4.1 a 4.2, 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. Proto je nutné dodržet metodiku uvedenou v kap. 2.2, především její první dva body, jejichž součástí je zhodnocení potenciálu odpadních proudů.

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, převážně u vyššího výkonu 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 výrobnu 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. Další výhodou jsou také dotační a zelené bonusy, které

podporují KVET. Vzhledem k vysokým investičním nákladům na pořízení plynové MT lze uvažovat o možnosti financování pomocí metody EPC (energy performance contracting), kdy operátor splácí investici poskytovateli EPC z dosažených úspor. Tak nebude narušen peněžní tok podniku i při nákladné investici.

Je nutné zdůraznit, že scénáře s integrovanou MT představují benefity i pro životní prostředí – eliminací parního hospodářství je výrazně snížena i spotřeba vody a je dosaženo vyšších úspor energie. Plynová MT je stabilní zdroj produkující dostatek tepelné a elektrické energie pro provoz prádelny. Termo olej je také možnou cestou, jak dosáhnout prádelny bez páry, na druhou stranu je více náročný na technickou realizaci. Pro SW hodnocený případ, kdy se jedná o náhradu hlavního zdroje, tvoří v případě prádelny přechod na termo olej velký zásah do technologie a jsou potřeba značné investiční náklady, které výrazně prodlužují návratnost.

Uváděný přístup je výstupem mnohaletého výzkumu, sběru dat a spolupráce několika průmyslových prádelen a inženýrských společností pro prádelenský průmysl. Snahou přitom bylo zachovat uživatelskou přívětivost. 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. Může se zdát, že všechny prádelny jsou stejné a liší se pouze svojí kapacitou. Nicméně je potřeba zohlednit všechny faktory, které ovlivňují energetickou náročnost provozu: typ zpracovaného prádla, výkonnostní špičky, směnný provoz, změny požadavků zákazníků, region apod.

Z pohledu distribuované produkce a mikrosítí zůstává MT slibným alternativním zdrojem k obnovitelným zdrojům, který bude rychle a spolehlivě reagovat na dynamické chování systému (Olivares et al., 2014). Vzhledem k rostoucím požadavkům trhu a končícím technologickým patentům se ekonomika MT v mikrosítích v průběhu let postupně zlepšuje a tato tendence se očekává i do budoucna (Energy Power, 2019). Navíc, v mnoha zemích lze využít státních pobídek na mikrokogeneraci s obnovitelnými zdroji nebo KVET. Provozovatelé mikrosítí pak mohou využívat snižování odběrových špiček,

ale také finančních výhod z dlouhodobých strategií a dotací. Nicméně pro dosažení plynulého fungování, benefitů pro životní prostředí a zlepšení energetické účinnosti, je třeba tomuto tématu věnovat další pozornost. Dalším bodem výzkumu je použití progresivních materiálů v konstrukci MT (např. nanomateriály, vylepšená keramika a polymery) ke zlepšení celkové účinnosti a možnosti větší variability v podobě vícesložkových paliv. Skladování energie je aktuálním tématem jak v komerční, tak vědecké sféře, a spojení s MT se jednoznačně nabízí. MT v takovém uspořádání může fungovat jako obnovitelný primární zdroj, který reaguje na měnící se nároky uvnitř mikrosítě. Taková interakce a integrace mezi MT a různými druhy skladování energie by přispěla ke zlepšení energetické efektivity a rovněž posílila zásahy, které reagují přímo na poptávku energetického trhu (Moghaddam et al., 2011).

Velmi diskutovaným tématem v oblasti prádelnictví je spotřeba vody, jak bylo zmíněno v kap. 2.1.2. Vondra et al. (2019) představili koncept vakuové odpařovací jednotky na zpracování digestátu z bioplynových stanic. Tento typ odpadní vody obsahuje velké množství pevných částic, podobně jako odpadní voda z prádelny, která obsahuje zbytky textilních vláken uvolněných otěrem prádla. Je tak možné předpokládat, že odpařovací jednotka by měla být použita k úpravě odpadní vody z prádelny. Navíc jednotka využívá odpadní teplo (40-90 °C), které je v prádelenském provozu běžně dostupné. V případě přebytku tepla tak může být použito pro úpravu odpadní vody a její navrácení do procesu.

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.

5 Závěr

Snižování spotřeb primárních paliv, zvyšování účinnosti a využívání zdrojů kombinované výroby je dlouhodobě řešeným tématem s vytyčenými cíli na národní i evropské úrovni. Cílem vývoje v oblasti energetických systémů je stabilní, často soběstačné fungování podniku a podpora jeho konkurenceschopnosti. K plnění cílů přispívají dotační programy nebo zelené bonusy. 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. Je nutné hledat cesty k využití jejich maximálního potenciálu. 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. Nejčastěji jsou využívány v kombinaci s dalšími technologiemi pro produkci elektrické energie, ale jsou i vhodným primárním zdrojem pro kogenerační a trigenerační systémy vhodné pro komunální i průmyslovou oblast. Primárním palivem je zemní plyn, ale mikroturbíny mohou využívat i další druhy plyných paliv a jsou tak dobrým flexibilním a stálým zdrojem. Jejich využitím je podporován i koncept decentralizované výroby energie. Plynové mikroturbíny pracují s účinností až 90 % a mohou dosáhnout vysoké úspory primární energie.

Průmyslový podnik využívající plynovou mikroturbínu jako hlavní zdroj energie je do budoucna připraven na připojení do mikrosítě a podpoří tak decentralizovanou výrobu energie. S tím lze očekávat čerpání benefitů, zlepšení soběstačnosti a vlastní konkurenceschopnosti.

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. Příkladem takového provozu je profesní údržba prádla. Tento proces je specifický vysokou spotřebou vody a tepla. Správně navržený a provozovaný energetický systém prádelny je klíčem k dlouhodobé udržitelnosti tohoto typu provozu.

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**.

Představený nástroj nabízí univerzální a rychlý způsob, jak zhodnotit použití mikroturbíny v konkrétních podmínkách. Na jeho použití není nutné použití žádného specializovaného softwaru nebo velkého množství provozních dat. Na základě dat o spotřebě energie a paliv, jejich cen a základních spotřebičích tepla, je sestaveno 36 scénářů. V rámci nich se vyhodnotí využití mikroturbínou produkované energie pro jednotlivé spotřebiče – přímé sušení pomocí spalin z mikroturbíny, technologický ohřev (výběr mezi produkcí páry, ohřevu vody nebo oleje), 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 neoptimalizovaná prádelna.

Pro moderní prádelnu byla vybrána mikroturbína o výkonu 600 kW_e 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_e. 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 prvním úvahám při výměně zdroje a pro seznámení se s možnostmi plynové mikroturbíny. Výše uvedené porovnání ale ukazuje důležitost 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 spalin – jedině tak je možné dosáhnout jejího optimálního využití.

Seznam zdrojů

- AKI, Hirohisa, 2007. The penetration of micro CHP in residential dwellings in Japan. In: *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES* [online]. s. 1–4. ISBN 1424412986. Dostupné z: doi:10.1109/PES.2007.385625.
- 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.
- ALLAN, Grant, Igor EROMENKO, Michelle GILMARTIN, Ivana KOCKAR a Peter MCGREGOR, 2015. *The economics of distributed energy generation: A literature review* [online]. 1. únor 2015. B.m.: Elsevier Ltd. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2014.07.064.
- ATKINS, Martin J., Timothy G. WALMSLEY, Matthias PHILIPP, Michael R.W.W. ALMSLEY a James R. NEALE, 2017. Carbon emissions efficiency and economics of combined heat and power in New Zealand. *Chemical Engineering Transactions* [online]. **61**, 733–738. ISSN 22839216. Dostupné z: doi:10.3303/CET1761120.
- BAGHERNEJAD, A., M. YAGHOUBI a K. JAFARPUR, 2016. Exergoeconomic comparison of three novel trigeneration systems using SOFC, biomass and solar energies. *Applied Thermal Engineering* [online]. **104**, 534–555. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.05.032.
- BASRAWI, Firdaus, Thamir K. IBRAHIM, Khairul HABIB a Takanobu YAMADA, 2016. Effect of operation strategies on the economic and environmental performance of a micro gas turbine trigeneration system in a tropical region. *Energy* [online]. **97**, 262–272. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2015.12.117.
- 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.
- BRUNO, Joan Carles, Víctor ORTEGA-LÓPEZ a Alberto CORONAS, 2009. Integration of absorption cooling systems into micro gas turbine trigeneration systems using biogas: Case study of a sewage treatment plant. *Applied Energy* [online]. **86**(6), 837–847. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2008.08.007.
- BUCK, R. a S. FRIEDMANN, 2007. Solar-assisted small solar tower trigeneration systems.

Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME [online]. **129**(4), 349–354. ISSN 01996231. Dostupné z: doi:10.1115/1.2769688.

BUSTOS, Cristian a David WATTS, 2017. Novel methodology for microgrids in isolated communities: Electricity cost-coverage trade-off with 3-stage technology mix, dispatch & configuration optimizations. *Applied Energy* [online]. **195**, 204–221 [vid. 2020-01-21]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/J.APENERGY.2017.02.024.

CAPSTONE GREEN ENERGY, 2021. *Capstone Turbine Corporation (CPST)* [online] [vid. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.capstoneturbine.com/>.

CARESANA, F., G. COMODI, L. PELAGALLI, P. PIERPAOLI a S. VAGNI, 2011. Energy production from landfill biogas: An italian case. *Biomass and Bioenergy* [online]. **35**(10), 4331–4339. ISSN 09619534. Dostupné z: doi:10.1016/j.biombioe.2011.08.002.

CHE, Liang, Mohammad KHODAYAR a Mohammad SHAHIDEHPOUR, 2014. Only connect: Microgrids for distribution system restoration. *IEEE Power and Energy Magazine* [online]. **12**(1), 70–81. ISSN 15407977. Dostupné z: doi:10.1109/MPE.2013.2286317.

CHE, Liang a Mohammad SHAHIDEHPOUR, 2014. DC microgrids: Economic operation and enhancement of resilience by hierarchical control. *IEEE Transactions on Smart Grid* [online]. **5**(5), 2517–2526. ISSN 19493053. Dostupné z: doi:10.1109/TSG.2014.2344024.

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.

CIUCCI MATTEO, 2021. *Energetická politika: obecné zásady | Fakta a čísla o Evropské unii | Evropský parlament* [online] [vid. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/cs/sheet/68/energeticka-politika-obecne-zasady>.

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/>.

CO., Miura, 2021. *Best partner for heat, water and environment | Miura Co., Ltd.* [online] [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.miuraz.co.jp/>.

COTTON, Lucy, Adam S. HAYWARD, Neil J. LANT a Richard S. BLACKBURN, 2020. Improved garment longevity and reduced microfibre release are important sustainability benefits of laundering in colder and quicker washing machine cycles. *Dyes and Pigments* [online]. **177**, 108120. ISSN 18733743. Dostupné z: doi:10.1016/j.dyepig.2019.108120.

DABWAN, Yousef N. a Gang PEI, 2020. A novel integrated solar gas turbine tri-generation system for production of power, heat and cooling: Thermodynamic-economic-environmental analysis. *Renewable Energy* [online]. **152**, 925–941. ISSN 18790682. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2020.01.088.

DEGOBERT, Ph, S KREUAWAN a X GUILLAUD, 2006. Micro-grid powered by photovoltaic and micro turbine. *International Conference on Renewable Energies in France* [online]. [vid. 2020-06-04]. Dostupné z: doi:10.24084/repqj04.280.

DENG, Qijun, Xing GAO, Hong ZHOU a Wenshan HU, 2011. System modeling and optimization of microgrid using genetic algorithm. In: *2011 Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing* [online]. s. 540–544. ISBN 9781457708145. Dostupné z: doi:10.1109/ICICIP.2011.6008303.

DO NASCIMENTO, Marco Antnio Rosa, L DE OLIVEIRA RODRIGUEZ, Eraldo Cruz DOS SANTOS, Eli Eber BATISTA GOMES, Fagner Luis GOULART DIAS, Elkin Ivan GUTIERREZ VELASQUES a Ruben ALEXIS MIRANDA CARILLO, 2013. Micro Gas Turbine Engine: A Review. In: *Progress in Gas Turbine Performance* [online]. B.m.: InTech, s. 107–141. Dostupné z: doi:10.5772/54444.

DUTRA, José C., Maria A. GONZALEZ-CARMONA, Andrés F. LAZARO-ALVARADO a Alberto CORONAS, 2017. Modeling of a cogeneration system with a micro gas turbine operating at partial load conditions. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* [online]. 5(2), 139–150. Dostupné z: doi:10.13044/J.SDEWES.D5.0138.

ENERGY & POWER, 2019. Microturbine Market Size, Share, Industry Report Analysis by Application. *Energy & Power* [online] [vid. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/microturbine-market-100514>.

ERÚ, 2022. Energetický regulační věstník. *ERÚ* [online]. [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/energeticky-regulacni-vestnik-2-2022>.

FERREIRA, Vitor R., Cátia M. AUGUSTO, José B. RIBEIRO, Adélio R. GASPAR 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.

FERREIRA, Vitor R., Cátia M. AUGUSTO, José B. RIBEIRO, Adélio R. GASPAR a José J. COSTA, 2015. Increasing the efficiency of high temperature furnaces through a topping cycle cogeneration—a case study. *Energy Efficiency* [online]. 8(1), 85–95 [vid. 2022-05-15]. ISSN 15706478. Dostupné z: doi:10.1007/S12053-014-9278-2/TABLES/6.

GE, Y. T., S. A. TASSOU a I. N. SUAMIR, 2013. Prediction and analysis of the seasonal performance of tri-generation and CO2 refrigeration systems in supermarkets. *Applied Energy* [online]. 112, 898–906. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2012.12.027.

GILLETTE, Stephen, 2010. *Microturbine Technology Matures* [online] [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.powermag.com/microturbine-technology-matures/?printmode=1>.

GLOBE NEWSWIRE, 2020. *The global market for Commercial Laundry Machinery is* [online] [vid. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://www.globenewswire.com/fr/news-release/2020/11/04/2119926/0/en/The-global-market-for-Commercial-Laundry-Machinery-is-projected-to-reach-US-5-7-billion-by-2025.html>.

GOUARDÈRES, Frédéric, nedatováno. *Small and medium-sized enterprises | Fact Sheets on the European Union | European Parliament* [online] [vid. 2022-05-15]. Dostupné

z: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/63/small-and-medium-sized-enterprises>.

GRAND VIEW RESEARCH, 2016. Micro Turbine Market Size & Share | Industry Report, 2024. *Grand View Research* [online] [vid. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/microturbines-market>.

HO, Kah Chun, Yeit Haan TEOW, Jing Yao SUM, Zhe Jia NG a Abdul Wahab MOHAMMAD, 2021. Water pathways through the ages: Integrated laundry wastewater treatment for pollution prevention. *Science of The Total Environment* [online]. **760**, 143966. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/J.SCITOTENV.2020.143966.

HOW, Bing Shen, Sue Lin NGAN, Boon Hooi HONG, Hon Loong LAM, Wendy Pei Qin NG, Suzana YUSUP, Wan Azlina Wan Abd Karim GHANI, Yasuki KANSHA, Yi Heng CHAN, Kin Wai CHEAH, Muhammad SHAHBAZ, Haswin Kaur Gurdeep SINGH, Nur'aini Raman YUSUF, Ahmad Fadzil Ahmad SHUHAILI a Jakaria RAMBLI, 2019. An outlook of Malaysian biomass industry commercialisation: Perspectives and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. **113**, 109277. ISSN 18790690. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2019.109277.

HUICOCHEA, Armando, Wilfrido RIVERA, Geydy GUTIÉRREZ-URUETA, Joan Carles BRUNO a Alberto CORONAS, 2011. Thermodynamic analysis of a trigeneration system consisting of a micro gas turbine and a double effect absorption chiller. *Applied Thermal Engineering* [online]. **31(16)**, 3347–3353. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.06.016.

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.

IAPWS, 2021. *IAPWS Releases, Supplementary Releases, Guidelines, and Advisory Notes* [online] [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.iapws.org/release.html>.

INVERNIZZI, Costante, Paolo IORA a Paolo SILVA, 2007. Bottoming micro-Rankine cycles for micro-gas turbines. *Applied Thermal Engineering* [online]. **27(1)**, 100–110. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.05.003.

ISA, Normazlina Mat, Chee Wei TAN a A. H.M. YATIM, 2018. *A comprehensive review of cogeneration system in a microgrid: A perspective from architecture and operating system* [online]. 1. leden 2018. B.m.: Elsevier Ltd. ISSN 18790690. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.06.034.

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.

KACZMARCZYK, Tomasz Z., Grzegorz ŻYWICA a Eugeniusz IHNATOWICZ, 2017. The impact of changes in the geometry of a radial microturbine stage on the efficiency of the micro CHP plant based on ORC. *Energy* [online]. **137**, 530–543. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2017.05.166.

- KAIKKO, Juha a Jari BACKMAN, 2007. Technical and economic performance analysis for a microturbine in combined heat and power generation. *Energy* [online]. 32(4), 378–387. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2006.06.013.
- 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, Hristiyan, 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.
- KATIRAEI, F., M. R. IRAVANI a P. W. LEHN, 2005. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process. *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. 20(1), 248–257. ISSN 08858977. Dostupné z: doi:10.1109/TPWRD.2004.835051.
- 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.
- KOLANOWSKI, Bernard F., 2004. *Guide to microturbines* [online]. 1st vyd. New York: Fairmont Press. ISBN 0-88173-418-7. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1201/9781003168546.
- KRISHNA, C R, 2007. *Performance of the Capstone C30 Microturbine on Biodiesel Blends* [online]. [vid. 2020-06-03]. Dostupné z: www.bnl.gov.
- KURZY.CZ, 2022. *Energie - vývoj cen energií na komoditních trzích | Kurzy.cz* [online] [vid. 2022-05-16]. Dostupné z: https://www.kurzy.cz/komodity/energie/.
- LAAKSONEN, Hannu, Dmitry ISHCENKO a Alexandre OUDALOV, 2014. Adaptive protection and microgrid control design for Hailuoto Island. *IEEE Transactions on Smart Grid* [online]. 5(3), 1486–1493. ISSN 19493053. Dostupné z: doi:10.1109/TSG.2013.2287672.
- LAV, C, C KAUL, RK SINGH a A RAI, 2013. Potential of Micro Turbines for Small Scale Power Generation. *International Journal of Advanced Information Science and Technology* [online]. 13(13), 35–39 [vid. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/270338185_Potential_of_Micro_Turbines_for_Small_Scale_Power_Generation.
- 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/.
- LEE, Jong Jun, Mu Sung JEON a Tong Seop KIM, 2010. The influence of water and steam injection on the performance of a recuperated cycle microturbine for combined heat and power application. *Applied Energy* [online]. 87(4), 1307–1316. ISSN 03062619. Dostupné

z: doi:10.1016/j.apenergy.2009.07.012.

LOPES, Catia Milena, Annibal José SCAVARDA, Mauricio NUNES, Macedo DE CARVALHO, Guilherme VACCARO a André Luis KORZENOWSKI, 2019. Analysis of Sustainability in Hospital Laundry: The Social, Environmental, and Economic (Cost) Risks [online]. Dostupné z: doi:10.3390/resources8010037.

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>.

MADUREIRA, A, C MOREIRA a JP LOPES, 2005. *Secondary Load-Frequency Control for Microgrids in Islanded Operation* [online]. [vid. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/228363954>.

MAGO, Pedro J. a Rogelio LUCK, 2013. Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery from a microturbine using organic Rankine cycles. *International Journal of Energy Research* [online]. **37**(8), 888–898 [vid. 2020-06-04]. ISSN 0363907X. Dostupné z: doi:10.1002/er.2891.

MALINAUSKAITE, J., H. JOUHARA, L. AHMAD, M. MILANI, L. MONTORSI a M. VENTURELLI, 2019. Energy efficiency in industry: EU and national policies in Italy and the UK. *Energy* [online]. **172**, 255–269. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.ENERGY.2019.01.130.

MÁŠA, Vítězslav, Petr BOBÁK, Pavel KUBA a Petr STEHLÍK, 2013. Analysis of energy efficient and environmentally friendly technologies in professional laundry service. *Clean Technologies and Environmental Policy* [online]. **15**(3), 445–457 [vid. 2022-01-02]. ISSN 16189558. Dostupné z: doi:10.1007/S10098-013-0618-2/FIGURES/9.

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.

MOGHADDAM, Amjad Anvari, Alireza SEIFI, Taher NIKNAM a Mohammad Reza ALIZADEH PAHLAVANI, 2011. Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source. *Energy* [online]. **36**(11), 6490–6507. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2011.09.017.

MOHAMED, Faisal A. a Heikki N. KOIVO, 2007. Online management of MicroGrid with battery storage using multiobjective optimization. In: *International Conference on Power Engineering - Energy and Electrical Drives Proceedings* [online]. s. 231–236. Dostupné z: doi:10.1109/POWERENG.2007.4380118.

MOHAMMADI, Sirius, Soodabeh SOLEYMANI a Babak MOZAFARI, 2014. Scenario-based stochastic operation management of MicroGrid including Wind, Photovoltaic, Micro-Turbine, Fuel Cell and Energy Storage Devices. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* [online]. **54**, 525–535. ISSN 01420615. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijepes.2013.08.004.

MONTERO CARRERO, Marina, Irene RODRÍGUEZ SÁNCHEZ, Ward DE PAEPE, Alessandro PARENTE a Francesco CONTINO, 2019. Is There a Future for Small-Scale Cogeneration in Europe? Economic and Policy Analysis of the Internal Combustion Engine, Micro Gas Turbine and Micro Humid Air Turbine Cycles. *Energies* [online]. **12**(3), 413 [vid. 2020-06-04]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en12030413.

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.

NEWSWIRE, Globe, 2020. The global market for Commercial Laundry Machinery is. *Globe Newswire* [online] [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.globenewswire.com/fr/news-release/2020/11/04/2119926/0/en/The-global-market-for-Commercial-Laundry-Machinery-is-projected-to-reach-US-5-7-billion-by-2025.html>.

NOE, JC a RD MCKEIRNAN JR., 1996. Gas Turbine Generator Set. 5,497,615. 21. březen 1996.

NUMPY, 2021. *NumPy* [online] [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://numpy.org/>.

OLIVARES, DE, CA CAÑIZARES, M KAZERANI, AH ETEMADI, R PALMA-BEHNKE, GA JIMÉNEZ-ESTÉVEZ a ND HATZIARGYRIOU, 2014. Trends in Microgrid Control. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID* [online]. **5**(4), 1905–1919 [vid. 2020-06-04]. Dostupné z: doi:10.1109/TSG.2013.2295514.

OPTAK, 2021. *Portál Operačního programu Technologie a aplikace pro konkurenceschopnost | OPTAK* [online] [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.dotace-optak.cz/>.

PALIZBAN, Omid a Kimmo KAUHANIEMI, 2015. *Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode* [online]. 1. duben 2015. B.m.: Elsevier Ltd. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.01.008.

PANDAS, 2021. *pandas - Python Data Analysis Library* [online] [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://pandas.pydata.org/>.

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.

PANTALEO, Antonio M., Julia FORDHAM, Oyeniya A. OYEWUNMI, Pietro DE PALMA a Christos N. MARKIDES, 2018. Integrating cogeneration and intermittent waste-heat recovery in food processing: Microturbines vs. ORC systems in the coffee roasting industry. *Applied Energy* [online]. **225**, 782–796. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2018.06.017.

z: doi:10.1016/j.apenergy.2018.04.097.

PARATHERM, 2021. *Paratherm™ HE Heat Transfer Fluid* | Paratherm [online] [vid. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://www.paratherm.com/heat-transfer-fluids/paratherm-he-heat-transfer-fluid/>.

PETER, Stefan a Harry LEHMANN, 2008. *Renewable Energy Outlook 2030* [online]. [vid. 2020-06-04]. Dostupné z: www.isusi.de, info@isusi.de, www.wcre.org, info@wcre.org.

RACHTAN, W. a L. MALINOWSKI, 2013. An approximate expression for part-load performance of a microturbine combined heat and power system heat recovery unit. *Energy* [online]. **51**, 146–153. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2012.12.037.

RAJARAJESWARI, R, D SUCHITRA, K VIJAYAKUMAR a R JEGATHEESAN, 2019. Analyzing Customer Outage Cost in a Microgrid. *Mobile Networks and Applications* [online]. **24**(6), 1821–1834. ISSN 15728153. Dostupné z: doi:10.1007/s11036-019-01381-w.

ROMANKIEWICZ, John, Chris MARNAY, Nan ZHOU a Min QU, 2014. Lessons from international experience for China's microgrid demonstration program. *Energy Policy* [online]. **67**, 198–208 [vid. 2020-01-21]. ISSN 0301-4215. Dostupné z: doi:10.1016/j.enpol.2013.11.059.

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.

SARCO, Spirax, 2021. *Boiler Efficiency and Combustion* | Spirax Sarco [online] [vid. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/the-boiler-house/boiler-efficiency-and-combustion>.

SEPÚLVEDA, Francisco José, María Teresa MIRANDA, Irene MONTERO, José Ignacio ARRANZ, Francisco Javier LOZANO, Manuel MATAMOROS a Paloma RODRÍGUEZ, 2019. Analysis of potential use of linear fresnel collector for direct steam generation in industries of the Southwest of Europe. *Energies* [online]. **12**(21), 4049 [vid. 2021-06-29]. ISSN 19961073. Dostupné z: doi:10.3390/en12214049.

SEYFOURI, Z. a M. AMERI, 2012. Analysis of integrated compression-absorption refrigeration systems powered by a microturbine. In: *International Journal of Refrigeration* [online]. B.m.: Elsevier, s. 1639–1646. ISSN 01407007. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijrefrig.2012.04.010.

SHEN, Jingshuang, Chuanwen JIANG, Yangyang LIU a Jie QIAN, 2016. A Microgrid Energy Management System with Demand Response for Providing Grid Peak Shaving. *Electric Power Components and Systems* [online]. **44**(8), 843–852 [vid. 2020-06-04]. ISSN 1532-5008. Dostupné z: doi:10.1080/15325008.2016.1138344.

SINHA, Arup, A. K. BASU, R. N. LAHIRI, S. CHOWDHURY, S. P. CHOWDHURY a Peter A. CROSSLEY, 2008. Setting of market clearing price (MCP) in Microgrid power scenario. In: *IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery*

of *Electrical Energy in the 21st Century*, PES [online]. s. 1–8. ISBN 9781424419067. Dostupné z: doi:10.1109/PES.2008.4596357.

SLOVÁK, Rostislav, 2018. *Technicko-ekonomické hodnocení systému pro využití odpadního tepla z plynové mikroturbíny*. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, 2018. 83 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

SOMDALEN, Ragnar a Jörgen KÖHLER, 2018. Theoretical investigation of a novel thermoelectric laundry dryer concept. In: *Materials Today: Proceedings* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, s. 10323–10332. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2017.12.280.

STADLER, Michael, Gonçalo CARDOSO, Salman MASHAYEKH, Thibault FORGET, Nicholas DEFOREST, Ankit AGARWAL a Anna SCHÖNBEIN, 2016. *Value streams in microgrids: A literature review* [online]. 15. leden 2016. B.m.: Elsevier Ltd. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.081.

TASSOU, S. A., I. CHAER, N. SUGIARTHA, Y. T. GE a D. MARRIOTT, 2007. Application of tri-generation systems to the food retail industry. *Energy Conversion and Management* [online]. 48(11), 2988–2995. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2007.06.049.

TSAI, Bor Jang a Y. L. WANG, 2009. A novel Swiss-Roll recuperator for the microturbine engine. *Applied Thermal Engineering* [online]. 29(2–3), 216–223. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.02.028.

UDDIN, Moslem, M. F. ROMLIE, M. F. ABDULLAH, Chia Kwang TAN, G. M. SHAFIULLAH a A. H.A. BAKAR, 2020. A novel peak shaving algorithm for islanded microgrid using battery energy storage system. *Energy* [online]. 196, 117084. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2020.117084.

VACHIRASRICIRIKUL, Sitthidet a Issarachai NGAMROO, 2012. Robust controller design of microturbine and electrolyzer for frequency stabilization in a microgrid system with plug-in hybrid electric vehicles. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* [online]. 43(1), 804–811. ISSN 01420615. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijepes.2012.06.029.

VACHIRASRICIRIKUL, Sitthidet, Issarachai NGAMROO a Somyot KAITWANIDVILAI, 2009. *Application of electrolyzer system to enhance frequency stabilization effect of microturbine in a microgrid system* [online]. 1. září 2009. B.m.: Pergamon. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2009.06.050.

VANDOORN, Tine L., Juan C. VASQUEZ, Jeroen DE KOONING, Josep M. GUERRERO a Lieven VANDEVELDE, 2013. Microgrids: Hierarchical control and an overview of the control and reserve management strategies. *IEEE Industrial Electronics Magazine* [online]. 7(4), 42–55. ISSN 19324529. Dostupné z: doi:10.1109/MIE.2013.2279306.

VELUMANI, S., Carlo Enrique GUZMAN, Ricardo PENICHE a Ramon VEGA, 2010. Proposal of a hybrid CHP system: SOFC/microturbine/absorption chiller. *International Journal of Energy Research* [online]. 34(12), 1088–1095 [vid. 2022-05-15]. ISSN 1099-114X. Dostupné z: doi:10.1002/ER.1632.

VERA, D., F. JURADO, K. D. PANOPOULOS a P. GRAMMELIS, 2012. Modelling of biomass gasifier and microturbine for the olive oil industry. *International Journal of Energy Research* [online]. **36**(3), 355–367 [vid. 2022-05-15]. ISSN 1099-114X. Dostupné z: doi:10.1002/ER.1802.

VIESI, Diego, Francesca POZZAR, Alessandro FEDERICI, Luigi CREMA a Md Shahriar MAHBUB, 2017. Energy efficiency and sustainability assessment of about 500 small and medium-sized enterprises in Central Europe region. *Energy Policy* [online]. **105**, 363–374. ISSN 0301-4215. Dostupné z: doi:10.1016/J.ENPOL.2017.02.045.

VONDRA, Marek, Michal TOUŠ a Sin Yong TENG, 2019. Digestate evaporation treatment in biogas plants: A techno-economic assessment by Monte Carlo, neural networks and decision trees. *Journal of Cleaner Production* [online]. **238**, 117870. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/J.JCLEPRO.2019.117870.

WANG, Shouxiang, Zhixin LI, Lei WU, Mohammad SHAHIDEHPOUR a Zuyi LI, 2013. New metrics for assessing the reliability and economics of microgrids in distribution system. *IEEE Transactions on Power Systems* [online]. **28**(3), 2852–2861. ISSN 08858950. Dostupné z: doi:10.1109/TPWRS.2013.2249539.

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.

WEI, Huang, Zhang JIANHUA, Wu ZIPING a Niu MING, 2008. Dynamic modelling and simulation of a micro-turbine generation system in the microgrid. In: *2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, ICSET 2008* [online]. s. 345–350. ISBN 9781424418886. Dostupné z: doi:10.1109/ICSET.2008.4747029.

WOOD, Laura, 2019. Global Dry-Cleaning & Laundry Services Market Report 2019-2022 - Top Opportunities in On-Demand Services, Sustainable Laundry Practices, Tier 1 & Tier 2 Cities, and Millennials - ResearchAndMarkets.com. *Business Wire* [online] [vid. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://www.businesswire.com/news/home/20191120005826/en/Global-Dry-Cleaning-Laundry-Services-Market-Report-2019-2022---Top-Opportunities-in-On-Demand-Services-Sustainable-Laundry-Practices-Tier-1-Tier-2-Cities-and-Millennials---ResearchAndMarkets.com>.

WU, Qiong, Hongbo REN a Weijun GAO, 2016. Economic assessment of micro-CHP system for residential application in Shanghai, China. In: *Energy Procedia* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, s. 732–737. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2016.06.054.

XIU, Yang, Zong XIANG, Yang FEI a Zang HAI YANG, 2011. A research on droop control strategy and simulation for the micro-grid. In: *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, ICECE 2011 - Proceedings* [online]. s. 5695–5700. ISBN 9781424481637. Dostupné z: doi:10.1109/ICECENG.2011.6057281.

ZACHAR, Michael a Prodromos DAOUTIDIS, 2018. Energy management and load

shaping for commercial microgrids coupled with flexible building environment control. *Journal of Energy Storage* [online]. **16**, 61–75. ISSN 2352152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2017.12.017.

ZACHAR, Michael a Prodromos DAOUTIDIS, 2019. Scheduling and supervisory control for cost effective load shaping of microgrids with flexible demands. *Journal of Process Control* [online]. **74**, 202–214. ISSN 09591524. Dostupné z: doi:10.1016/j.jprocont.2017.06.004.

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, Di, Sara EVANGELISTI, Paola LETTIERI a Lazaros G. PAPAGEORGIU, 2015. Optimal design of CHP-based microgrids: Multiobjective optimisation and life cycle assessment. *Energy* [online]. **85**, 181–193. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2015.03.036.

ZHANG, Yu, Nikolaos GATSIS 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.

ZHOU, Nan, Chris MARNAY, Ryan FIRESTONE, Weijun GAO a Masaru NISHIDA, 2006. An analysis of the DER adoption climate in Japan using optimization results for prototype buildings with U.S. comparisons. *Energy and Buildings* [online]. **38**(12), 1423–1433. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2006.03.025.

ZOKA, Y, H SASAKI, N YORINO, K KAWAHARA a CC LIU, 2004. An interaction problem of distributed generators installed in a MicroGrid. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004)* [online]. s. 795–799. ISBN 0780382374. Dostupné z: doi:10.1109/drpt.2004.1338091.

Přehled publikační, pedagogické a tvůrčí činnosti

Publikace

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.

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.

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

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

VONDRA, M.; MÁŠA, V.; TOUŠ, M.; KONEČNÁ, E. *Vacuum Evaporation Of Wastewater As A Mean For Nutrient Recovery And Waste Heat Utilization In Biogas Plants*. 2018.

VONDRA, M.; KONEČNÁ, E.; MÁŠA, V.; TOUŠ, M. *Development of a novel vacuum evaporator for liquid digestate treatment*. Progress in the treatment and application of manure and digestate products - Abstracts booklet. Schwabisch Hall, Deutschland: 2018. s. 49-49.

MÁŠA, V.; TOUŠ, M.; KONEČNÁ, E.; STEHLÍK, P. *Systematic and Integrated Approach in Hazardous Medical Waste Treatment*. 2018.

VONDRA, M.; MÁŠA, V.; TOUŠ, M.; KONEČNÁ, E. *Vacuum evaporation of a liquid digestate from anaerobic digestion: a techno-economic assessment*. Chemical Engineering Transactions , 2018, roč. 70, č. 1, s. 769-774. ISSN: 2283-9216.

Recenzní činnost

Renewable and Sustainable Energy Reviews journal (Elsevier):

GÜRSAN, C., DE GOOYERT, V.; *The systemic impact of a transition fuel: Does natural gas help or hinder the energy transition?*, 2020.

CAGLAYAN, H., CALISKAN, H.; *Assessment of a cogeneration system for ceramic industry under different environmental conditions by using various exergoeconomic approaches*, 2021.

ARPIT, S., DAS, P.K., DASH, S.K.; *Appraisal of a naphtha based combined cycle captive cogeneration plant for a petrochemical complex through energy and exergy analysis*, 2021.

HOUSA, H. M., YANG, C., NAWAZ, K., MILJKOVIC, N.; *Review of Heat Transfer Enhancement Techniques in Two-Phase Flows for Highly Efficient and Sustainable Cooling*, 2022.

WANG, Y., WEN, Z., CAO, X., DINGA, C. D.; *Is information and communications technology effective for industrial energy conservation and emission reduction? Evidence from three energy-intensive industries in China*, 2022.

Vedení závěrečných prací

KŮRA, Tomáš. *Metody výroby elektrické energie z odpadního tepla*. Brno, 2021. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132663>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Eva Konečná.

CYŽ, A. Technologická řešení pro úspory energie v průmyslu. Brno, 2021. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131695>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, 43 s. Vedoucí práce Ing. Eva Konečná.

HÁJKOVÁ, P. Analýza faktorů ovlivňujících provoz plynové mikroturbíny. Brno, 2020. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123746>. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Konečná.

MARTINEK, K. Nakládání s infekčním odpadem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Konečná.

KOVÁŘ L., Metody nakládání s infekčním odpadem z nemocničních provozů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Konečná.

Oponentury závěrečných prací

HEGER, J. Získávání fosforu z fugátu. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132659>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Michal Touš, Ph.D.

KOVÁŘ, Š. Zvyšování energetické účinnosti v průmyslu. Brno, 2021. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129753>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Michal Touš, Ph.D.

KOVÁČ, S. Aplikace termoelektrických generátorů. Brno, 2021. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132798>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce doc. Ing. Vítězslav Máša Ph.D.

UHLÍŘOVÁ, M. Využití membrán pro zpracování odpadních vod ze zemědělství. Brno, 2021. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132863>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Mgr. Ing. Marek Vondra, Ph.D.

KIJANICA, M. Řízení systému pro využití odpadního tepla z plynové mikroturbíny. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123670>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, 48 s. Vedoucí práce doc. Ing. Vítězslav Máša Ph.D.

HORŇÁK, D. Využití suchého ledu při čištění povrchů. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123741>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Vítězslav Máša Ph.D.

BUŘIL, L. Experimentální ověření kogeneračního systému na bázi plynové mikroturbíny. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 93 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

FRANK, V. Využití odpadního tepla z rektifikace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Touš, Ph.D.

DOLEŽALOVÁ, A. Progresivní metody pro zpracování odpadních vod. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Mgr. Ing. Marek Vondra, Ph.D.

Účast na konferencích

5nd Sustainable Process Integration Laboratory Scientific Conference, 4. – 5. 11. 2021, Brno

22nd Conference Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Savings and Pollution Reduction PRES19, 20. – 23. 10. 2019, Kréta, Řecko

IBBK Biogas International Conference „Progress Manure and Digestate 2018“, 16. – 17. 10. 2018, Schwäbisch Hall, Německo

2nd Sustainable Process Integration Laboratory Scientific Conference, 30. – 31. 8. 2018, Brno

Energy Systems Conference 2018, 19. – 20. 6. 2018, Londýn

1st Sustainable Process Integration Laboratory Scientific Conference, 6. – 7. 12. 2017, Brno

Výuka

Vedení cvičení předmětu Modelování procesů (IMP), zimní semestr, 2019-2021.

Cvičení předmětu Procesy, energetika a legislativa (KEL) na téma „Energetický audit“, zimní semestr, 2017–2021.

Cvičení předmětu Projektování a řízení procesů (KPJ) na téma „Procesní infrastruktura a projektová dokumentace“, zimní semestr, 2019-2021.

Rozšiřování odborných zkušeností

Odborné školení na provoz sterilizační jednotky Converter, OMPECO, 7/2017.

Spolupráce na zavádění systému kvality v Laboratoři energeticky náročných procesů dle normy ČSN EN ISO/IEC 17025, 8–9/2017.

Certifikační testy (IEC, CSA) prádelenské techniky ve spolupráci se společností Alliance Laundry CE s.r.o., 3/2018.

Kurz základů vědecké práce v Akademii věd ČR, 5/2018.

Tvorba manuálu kvality pro testovací laboratoř STAR Lab společnosti Alliance Laundry CE s.r.o. dle normy ČSN EN ISO/IEC 17025, 9–12/2018.

Organizace akcí

Koordinace zahraničních studentů v rámci International Engineering Project Weeks (IEPW Autumn 2020) na téma „Gas Microturbine as a source of energy for small and medium enterprises“, 8-9/2020.

Návrh a řešení projektu Fond vědy FSI na téma „Výukové standy pro integraci plynové mikroturbíny do provozu s cílem energetických úspor jako podpora výuky vybraných předmětů oboru Procesní inženýrství“, 3/2020-1/2021.

Odborné exkurze v Laboratoři energeticky náročných procesů, 2018-2022.

