



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

EFEKTIVNÍ NÁVRH TECHNOLOGIÍ PRO ZPRACOVÁNÍ PRŮMYSLOVÝCH ODPADNÍCH VOD

EFFECTIVE DESIGN OF TECHNOLOGIES FOR INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Václav Miklas

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

BRNO 2025

Abstrakt

Sucho a nedostatek vody představují jednu z nejpálčivějších výzev v Evropě i celosvětově. Evropská legislativa proto aktivně podporuje recyklaci procesních vod a koncept minimalizace či eliminace vypouštění odpadních vod (MVOV/EVOV). Tato dizertační práce reaguje na absenci uceleného a systematického návrhového rámce pro zařízení MVOV/EVOV a přispívá k aktuálnímu stavu poznání dvěma zásadními způsoby. Zaprvé představuje komplexní metodiku ekonomicko-environmentálního návrhu s významným aplikačním a inovačním potenciálem, který byl doložen nasazením v aktuálně řešených výzkumných projektech. Zadruhé vytváří samostatné vědecké výstupy, zejména v oblasti recyklace vinařských odpadních vod, čímž poskytuje cenné poznatky přímo využitelné v praxi. Vytvořená metodika integruje technické, ekonomické a environmentální aspekty do čtyř základních fází: (A) detailní sběr dat, (B) posouzení technické proveditelnosti, (C) ověření škálovatelnosti pomocí prediktivních modelů a průmyslově relevantních dat a (D) technicko-ekonomicko-environmentální optimalizace. Aplikovatelnost metodiky byla úspěšně ověřena na dvou různorodých případech – digestátu z bioplynových stanic (prvotní aplikace) a vinařských odpadních vodách (komplexní aplikace). U vinařských vod byly analyzovány tři scénáře a navrženo hybridní řešení, které dokázalo snížit CHSK o více než 98 % při přijatelných energetických nárocích (~35 kWh/m³). Významnou přidanou hodnotou bylo cílené zaměření na těkavý ethanol, jehož role v odpadních vodách z vinařství byla v dosavadní literatuře opomíjena a jenž lze zpětně získávat. Nově vzniklá metodika a konkrétní výsledky jejího nasazení dávají příslib, že i malé a střední provozy mohou dosáhnout ekonomicky návratné recyklace odpadních vod a posílit evropskou vodní odolnost i oběhové vodní hospodářství.

Klíčová slova

Eliminace vypouštění odpadních vod (EVOV), minimalizace vypouštění odpadních vod (MVOV), průmyslové odpadní vody, komplexní návrhová metodika, technicko-ekonomicko-environmentální optimalizace, bioplynová stanice, vinařství

Abstract

Drought and water scarcity represent one of the most pressing challenges in Europe and globally. European legislation therefore actively promotes process water recycling and the concept of Minimum or Zero Liquid Discharge (MLD/ZLD). This dissertation responds to the lack of a complex and systematic design framework for MLD/ZLD facilities and contributes to the current state of knowledge in two major ways. First, it presents a comprehensive economic-environmental design methodology with significant application and innovation potential, which has been demonstrated by deployment in current research projects. Secondly, it presents standalone scientific outputs, especially in the field of winery wastewater management, thus providing valuable knowledge directly applicable in practice. The developed methodology integrates technical, economic and environmental aspects into four main phases: (A) detailed data collection, (B) technical feasibility assessment, (C) scalability verification using predictive models and industry-relevant data, and (D) techno-economic-environmental optimization. The applicability of the methodology has been successfully verified on two different cases – biogas plant digestate (preliminary application) and winery wastewater (complex application). For the winery wastewater, three scenarios were analyzed and a hybrid solution was proposed that was able to reduce COD by more than 98% at acceptable energy requirements (~35 kWh/m³). An important added value was the targeted focus on volatile ethanol, whose role in winery wastewater has been neglected in the existing literature, and which can be recovered. The newly developed methodology and the concrete results of its deployment offer the promise that even small and medium-sized enterprises can achieve economically viable wastewater recycling and strengthen European water resilience and circular water management.

Keywords

Zero liquid discharge (ZLD), Minimum liquid discharge (MLD), industrial wastewater, complex design methodology, techno-economic-environmental optimization, biogas plant, winery

Bibliografická citace

MIKLAS, Václav. *Efektivní návrh technologií pro zpracování průmyslových odpadních vod*. Online, dizertační práce. Vítězslav MÁŠA (školitel). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/163147>.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Vítězslava Máši Ph.D., a to na základě vlastních poznatků, literatury uvedené v seznamu použitých zdrojů a odborných konzultací. Nadto prohlašuji, že jsem veškeré prameny, ze kterých jsem čerpal, správně a úplně citoval.

V Brně dne 11. 5. 2025

Václav Miklas

Poděkování

Děkuji tímto mému školiteli doc. Ing. Vítězslavu Mášovi, Ph.D. za jeho odborné i lidské rady, stejně jako upřímné a inspirativní diskuze, díky nimž mě v průběhu doktorského studia nikdy neopouštěl tah na branku.

Vážím si vstřícného přístupu prof. Ing. Petra Stehlíka, CSc., dr. h. c., který mě aktivně podpořil v otočení kariérního kormidla od komerční sféry k akademické dráze. Děkuji členům našeho týmu, kteří mě na této pouti bezprostředně doprovázejí: Michal, Mara, Míša, David, Marek a Honza.

Z celého srdce děkuji své nejbližší rodině – rodičům a bratrovi za pevné kořeny, které mě držely i v bouřích; milující manželce Martě za stále rostoucí strom opory, ze kterého čerpáme sílu a stabilitu; a našim dětem, nejvzácnějším plodům, které přinášejí radost, smích – a možná i novou generaci procesních inženýrů.

Bez vás všech by tato práce nikdy nevznikla – děkuji.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů.....	9
Úvod.....	11
1 Cíle práce	14
2 Přístup k efektivnímu návrhu technologie pro recyklaci průmyslových odpadních vod.....	16
2.1 Eliminace vypouštění odpadních vod (Zero Liquid Discharge)	16
2.2 Návrhové přístupy	18
3 Současný stav poznání – Eliminace vypouštění odpadních vod	20
3.1 Metodika rešerše literatury.....	20
3.2 Výsledky rešerše literatury	20
3.3 Hlavní zjištění plynoucí z rešerše literatury.....	28
3.4 Minimalizace vypouštění odpadních vod	30
4 Výběr aplikací podporujících výzkumné cíle Ústavu procesního inženýrství.....	31
4.1 Užší výběr oblastí	31
4.2 Vinařské vody	33
4.2.1 Charakterizace odpadní vody z vinařství.....	34
4.2.2 Přehled postupů pro zpracování odpadních vod z vinařství.....	35
4.2.3 Vyvození závěrů pro odpadní vody z vinařství	37
4.3 Digestát z bioplynových stanic	37
4.3.1 Charakterizace digestátu	37
4.3.2 Postupy pro zpracování digestátu	38
4.3.3 Vyvození závěrů pro digestát	41
5 Vytvoření a vývoj návrhové metodiky.....	42
5.1 Obecný rámec.....	42
5.1.1 Sběr dat.....	44
5.1.2 Proveditelnost a škálovatelnost	45
5.1.3 Ekonomika	46
5.1.4 Další kritéria	46
5.2 Prvotní aplikace metodiky: digestát z bioplynových stanic.....	46
5.2.1 Časová osa	47
5.2.2 Zlepšení metodiky na základě prvotní aplikace.....	49
5.3 Upravená metodika pro případovou studii	50
6 Případová studie: Odpadní vody z vinařství.....	52
6.1 Myšlenka.....	52
6.2 Sběr dat.....	52

6.2.1	Fyzikálně-chemické metody	52
6.2.2	Pokročilé oxidační metody	53
6.2.3	Biologické metody	53
6.2.4	Stávající nedostatky přístupů k čištění a upřesnění myšlenky	54
6.3	Validace předběžného modelu	55
6.3.1	Modelovací přístup	55
6.3.2	Validace modelu.....	56
6.4	Validovaný model a procesní konfigurace.....	58
6.4.1	Scénář A: MEE-MVC.....	59
6.4.2	Scénář B: MSF.....	61
6.4.3	Scénář C: Vzduchová stripovací kolona	62
6.5	Proveditelnost a technicko-ekonomicko-environmentální optimalizace ...	63
6.5.1	Strategie postupu.....	64
6.5.2	Účelové funkce	64
6.5.3	Optimalizace Scénáře A.....	68
6.5.4	Optimalizace Scénáře B.....	68
6.5.5	Optimalizace Scénáře C.....	70
6.5.6	Výsledky Scénáře A	73
6.5.7	Výsledky Scénáře B	77
6.5.8	Výsledky Scénáře C	82
6.6	Škálovatelnost.....	85
6.7	Výsledný návrh.....	86
6.7.1	Shrnutí poznatků napříč scénáři.....	86
6.7.2	Kvantitativní porovnání	88
6.7.3	Další závěry a omezení	90
6.7.4	SWOT analýza scénářů	91
6.7.5	Diskuze	93
6.8	Shrnutí případové studie.....	94
7	Inovační potenciál metodiky a budoucí práce.....	96
7.1	Pilotní jednotka pro zahušťování digestátu	97
7.2	Poloprovozní jednotka na zpracování vinařských odpadních vod	98
7.3	Adaptace přímé osmózy na průmyslové odpadní vody	100
7.4	Budoucí práce	102
Závěr	104
Seznam použitých zdrojů	106
Přehled výzkumných, pedagogických a profesních aktivit	118
Seznam obrázků	124
Seznam tabulek.....	126
Seznam příloh	127

Seznam zkratk a symbolů

Zkratka	Význam
AS	angl. air stripping
BPS	bioplynová stanice
BSK ₅	biochemická spotřeba kyslíku za 5 dní
CAPEX	angl. capital expenditures – investiční náklady
CEPCI	angl. Chemical Engineering Plant Cost Index
CFD	angl. computational fluid dynamics
ČOV	čistírna odpadních vod
DME	dimetyléter
EA	evoluční algoritmus
ELR	angl. extended long range
ET	evapotranspirace
EU	Evropská unie
EVOV	eliminace vypouštění odpadních vod
CHSK	chemická spotřeba kyslíku
LCA	angl. Life-Cycle Assessment
LSRRO	angl. low-salt-rejection reverse osmosis
MBR	membránový bioreaktor
MD	angl. membrane distillation
MDC	angl. membrane distillation crystallization
MEE	angl. multi-effect evaporation
MSF	angl. multi-stage flash
MSE	angl. mixed solvent electrolyte
MVC	angl. mechanical vapor compression
MVOV	minimalizace vypouštění odpadních vod
NRTL	angl. non-random two-liquid (model)
OPEX	angl. operating expenditures
OV	odpadní voda/vody
OVV	odpadní vody z vinařství
PZ	plné znění
RO	reverzní osmóza
RECOVOS	projekt TAČR TQ03000672
REDIGE	projekt TAČR FW03010481
R3WISION	projekt TAČR FW10010437
SBR	angl. sequencing batch reactor
SCWD	angl. supercritical water desalination
SDWE	angl. solvent-driven water extraction
SEC	angl. specific energy consumption

SRK	(stavová rovnice) Soave-Redlich-Kwong
SWOT	angl. Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats
TAČR	Technologická agentura České republiky
TEE	technicko-ekonomicko-environmentální
TRC	angl. typical refractory compounds
TRL	angl. technology readiness level
UASB	angl. up-flow anaerobic sludge blanket
UV	angl. ultraviolet
VUT	Vysoké učení technické v Brně
ZLD	angl. zero liquid discharge

Chemický vzorec	Název
C11	undekan
Ca	vápník
CaCl ₂	chlorid vápenatý
CaO	oxid vápenatý
Cd	kadmium
CO ₂	oxid uhličitý
Cr	chrom
Cu	měď
H ₂ O	voda
HCl	kyselina chlorovodíková
Hg	rtuť
K ₂ O	oxid draselný
KCl	chlorid draselný
KOH	hydroxid draselný
Mg	hořčík
MgSO ₄	síran hořečnatý
N	dušík
Na ₂ CO ₃	uhličitan sodný
Na	sodík
Na ₂ SO ₄	síran sodný
NaCl	chlorid sodný
NaOH	hydroxid sodný
NH ₄ ⁺ /NH ₃	amonný ion / amoniak
P ₂ O ₅	oxid fosforečný
Pb	olovo
Zn	zinek

Symbol	Význam	Jednotka
AOH	roční fond pracovní doby	h/rok
C	roční provozní náklady	EUR/rok
C_A	roční ekvivalent celkových nákladů	EUR/rok
C_{comp}	cena kompresoru	EUR
c_{el}	podíl ceny dodaného zařízení na elektroinstalaci	–
$c_{el,j}$	jednotková cena elektřiny v zemi j	EUR/kWh
C_{fan}	cena ventilátoru	EUR
$c_{h,j}$	jednotková cena tepla v zemi j	EUR/kWh
c_{ins}	podíl ceny dodaného zařízení na instalaci	–
c_{ic}	podíl ceny dodaného zařízení na měření a regulaci	–
c_{pip}	podíl ceny dodaného zařízení na potrubní rozvody	–
C_{TCI}	celkové investiční náklady	EUR
$EF_{el,j}$	emisní faktor v zemi j pro výrobu elektřiny	kg CO ₂ /kWh
$EF_{h,j}$	emisní faktor v zemi j pro výrobu tepla	kg CO ₂ /kWh
$EV_{i,j}$	je proměnná zařízení j (angl. equipment variable) v rámci kategorie i	viz tab. 6-6
F_H	koeficient výtlačné výšky ventilátoru	–
h_{pack}	výška výplně kolony (Scénář C)	m
HJS	počet sekcí chlazených vodou (Scénář B)	–
HRS	počet sekcí pro rekuperaci tepla (Scénář B)	–
CH	počet odpařovacích komor (Scénář B)	–
i_{min}	požadovaná výnosnost	–
$m_{CO_2,ann}$	roční emise CO ₂	kg/rok
$p_{SA,ch1}$	tlak v první komoře	bar
$P_{S,i}$	elektrický příkon Scénáře i	kW
PE_i	cena klíčového zařízení dané kategorie i	EUR
$\dot{Q}_{S,i}$	potřeba tepla Scénáře i	kW
T_{air}	teplota stripovacího vzduchu (Scénář C)	°C
$T_{CW,in}$	vstupní teplota chladicí vody (Scénář B)	°C
$T_{HW,in}$	vstupní teplota ohřevné vody (Scénář B)	°C
T_{in}	teplota vstupního proudu do odparky (Scénář B)	°C
T_{out}	teplota výstupního proudu z odparky (Scénář B)	°C
ΔT_{SA}	minimální teplotní přiblížení při odpařování (Scénář A)	K
V/L	poměr vzduch voda (Scénář C)	–

Úvod

Voda zůstává klíčovou surovinou pro průmysl, zemědělství i každodenní život. Přestože se od poloviny 20. století její celosvětové využití více než zdesetinásobilo [1], zhruba polovina světové populace již dnes zažívá vážný nedostatek vody alespoň část roku a čtvrtina lidí žije v oblastech s extrémně vysokým vodním stresem – to znamená, že spotřebují přes 80 % svého obnovitelného zásobení vody každý rok [2].

Evropa nepatří mezi oblasti nejhůře zasažené suchem, její vodní zdroje jsou však pod stále větším tlakem. Podle nejnovějšího hodnocení Evropské agentury pro životní prostředí splňuje dobrý či výborný ekologický stav jen 37 % evropských povrchových vod a dobrý chemický stav dokonce jen 29 %. Sezónní nedostatek vody každoročně zasahuje přibližně pětinu území a téměř třetinu obyvatel Unie [3]. Hlavním zdrojem odběrů a současně znečištění zůstává zemědělství, které je dle citované zprávy „zdaleka největším spotřebitelem vody“ [3]. Průmysl má sice nižší absolutní podíl odběrů (cca 15 %), jeho hospodaření s vodou však stále přímo ovlivňuje kvalitu i kvantitu lokálních zdrojů a vyžaduje sofistikovanější formy čištění [3].

Účinným nástrojem, jak globálně čelit palčivé výzvě současné i budoucí vodní krize, je minimalizace (MVOV) či eliminace vypouštění odpadních vod (EVOV, angl. Zero Liquid Discharge) [4]. Tyto koncepty usilují o co nejvyšší míru recyklace procesních vod v kombinaci se získáváním druhotných surovin a zásadně tak posilují cirkulární hospodářství. Evropská legislativa dává recyklaci jednoznačný impulz [5]:

- Nařízení (EU) 2020/741 o minimálních požadavcích na opětovné využívání vody se od 26. června 2023 přímo uplatňuje ve členských státech a vymezuje čtyři jakostní třídy recyklované vody pro závlahu [6];
- Směrnice (EU) 2024/3019 o čištění městských odpadních vod rozšiřuje povinnost terciárního – a u velkých aglomerací dokonce kvartérního – stupně čištění a stanoví cíl energetické neutrality ČOV do roku 2040 [7];
- v roce 2025 má Komise předložit Evropskou strategii vodní odolnosti¹, jejímž cílem je zajistit dlouhodobou vodní bezpečnost a urychlit investice do hospodaření s vodou [8].

Zájem o MVOV/EVOV významně roste i ve vědecké literatuře, nicméně studie prozatím představují jen dílčí kroky věnující se ekonomice, škálovatelnosti a praktické implementaci celých procesů. Za zmínku stojí vývoj optimalizačních postupů, které nahrazují metodu pokus-omyl a umožňují screening procesních konfigurací [9], detailnější zohledňování provozních podmínek [10], či stavbu pilotních jednotek pro získání cenných dat a praktické ověření škálovatelnosti [11] Právě specifická data pro danou aplikaci se ukazují jako kritická [11, 12], ale často nedostatečná [13].

V dostupné literatuře chybí ucelená, systematická metodika, která by inženýrům poskytla postup od prvotní charakterizace vody přes vytipování vhodné procesní konfigurace až po multikriteriální (technicko-ekonomicko-environmentální, zkr. TEE) optimalizaci a postupný vývoj směrem k provozním měřítkům.

Tuto mezeru se snaží vyplnit předkládaná dizertační práce. Navazuje na dlouhodobý výzkum energetických a environmentálních opatření v malých a středních podnicích

¹ „Vodní odolnost“ se v českých pramenech objevuje s rostoucí četností, přičemž toto označení má široký význam „zajištění dodávek vody, snížení rizika povodní a zmírnění dopadů sucha“ [8].

na Ústavu procesního inženýrství [14], s důrazem na návrh konkrétních technologií v oblasti průmyslových odpadních vod. Tato konkretizace efektivně benefituje z přímé vazby na vývoj a výzkum pilotní jednotky pro zahušťování digestátu v bioplynových stanicích (projekt REDIGE, 2021–2023) a na výzkum a vývoj poloprovozní jednotky pro recyklaci odpadních vod z vinařství (projekt R3WISION, 2024–2026).

Konečným cílem je vytvořit a ověřit komplexní metodiku pro ekonomický a environmentální návrh recyklačních technologií průmyslových odpadních vod, která:

- využívá postupné kroky sběru dat;
- zaměřuje se na screening provozní obálky a klíčových parametrů procesních konfigurací;
- propojuje různé úrovně modelování procesů a jejich validaci;
- integruje TEE optimalizaci s ohledem na konkrétní místní podmínky.

Metodika má zřejmý aplikační potenciál v mladém odvětví MVOV/EVOV a kromě ucelené strategie návrhu zařízení poskytne rovněž cennou, postupně rostoucí bázi znalostí. Využití nalezne zejména v případě návrhu komplexnějších technologií s důrazem na optimalizaci zahrnující ekonomická a environmentální kritéria. S výhodou lze nasadit na inovativní aplikace, kde umožňuje předběžné posouzení komerčního potenciálu a následný systematický přístup k výzkumně-vývojovým aktivitám.

Práce dále demonstruje aplikaci metodiky na dvou typově odlišných kapalných odpadech – vinařských odpadních vodách a digestátu z bioplynových stanic – a ukazuje, že i pro malé a střední provozy lze navrhnout škálovatelná, ekonomicky návratná řešení MVOV/EVOV, která podpoří strategický cíl Evropy zvyšovat vodní odolnost a stát se cirkulárně orientovanou ekonomikou.

1 Cíle práce

Konečným cílem práce je nová *metodika pro ekonomický a ekologický návrh technologií pro recyklaci průmyslových odpadních vod*. K němu směřuje šest dílčích cílů zachycených v tab. 1-1 a tab. 1-2. První tři z těchto cílů lze označit za teoretické a zbylé tři jako praktické.

Tab. 1-1 Struktura cílů práce a použitých metod.

Dílčí cíl	Použité metody	Kapitola
1. Formulace výchozího přístupu k problému	Zohlednění aktuálních trendů a legislativních tlaků v oblasti odpadních vod	2
	Rešerše podkladů z věrohodných zdrojů v oblasti návrhu procesních zařízení se zaměřením na technologie pro zpracování odpadních vod	
2. Rešerše odborné literatury	Aplikace abstraktové a citační databáze <i>Scopus</i> a studium relevantní odborné literatury	3
	Syntéza poznatků za účelem identifikace aktuálních výzkumných otázek	
3. Volba oblastí aplikovatelnosti	Diskuze významu minimalizace vypouštění odpadních vod	4
	Nalezení synergie mezi tématem práce a aktuálními výzkumnými úlohami Ústavu procesního inženýrství	
4. Vytvoření a vývoj metodiky	Rešerše současného stavu poznání vybraných průmyslových odvětví	5
	Vytvoření předběžné metodiky pro návrh nových zařízení	
	Strukturalizace do fází sběru dat, posouzení proveditelnosti a škálovatelnosti, a optimalizace	
	Prvotní aplikace metodiky a její vylepšení	

Tab. 1-2 Struktura cílů práce a použitých metod (pokračování).

Dílčí cíl	Použité metody	Kapitola
5. Komplexní aplikace na odpadní vody z vinařství (případová studie)	Formulace myšlenky případové studie	6.1 a 6.2
	Prohloubená rešerše současného stavu poznání a upřesnění nedostatků stávajících metod čištění odpadních vod z vinařství	
	Volba vhodných modelovacích přístupů	6.3
	Validace modelu experimentálními daty	
	Popis slibných procesních konfigurací (scénářů)	6.4
	Definice okrajových a provozních podmínek	
	Definice návrhových kritérií (účelových funkcí)	6.5
	Tvorba optimalizačních přístupů s ohledem na charakteristiku jednotlivých scénářů	
	Kvantifikace a diskuze výsledků pro jednotlivé scénáře	
	Predikce škálovatelnosti scénářů ve smyslu ekonomických omezení a vlivu na měrné parametry	6.6
6. Popis inovačního potenciálu metodiky a budoucí práce	Propojení poznatků a porovnání konfigurací	6.7
	Diskuze omezení zvolených přístupů	
	Porovnání s jinými studii a konvenčními (biologickými) metodami	
	Identifikace nejperspektivnějších konfigurací	
	Dílčí aplikace metodiky v rámci aktuálních, inovativních výzkumných projektů	7
	Vyvození oblastí budoucího výzkumu včetně dalších oblastí aplikovatelnosti	
Cíl: Komplexní metodika pro ekonomický a environmentální návrh technologií pro zpracování průmyslových odpadních vod		

2 Přístup k efektivnímu návrhu technologie pro recyklaci průmyslových odpadních vod

Efektivní návrh jako takový představuje vysoce komplexní soubor dílčích rozhodnutí na různých rozlišovacích úrovních (od základního konceptu, přes rozložení technologie a alternativní varianty, jednotkové operace, až po rozměrový návrh zařízení, tvorbu výkresové a technické dokumentace).

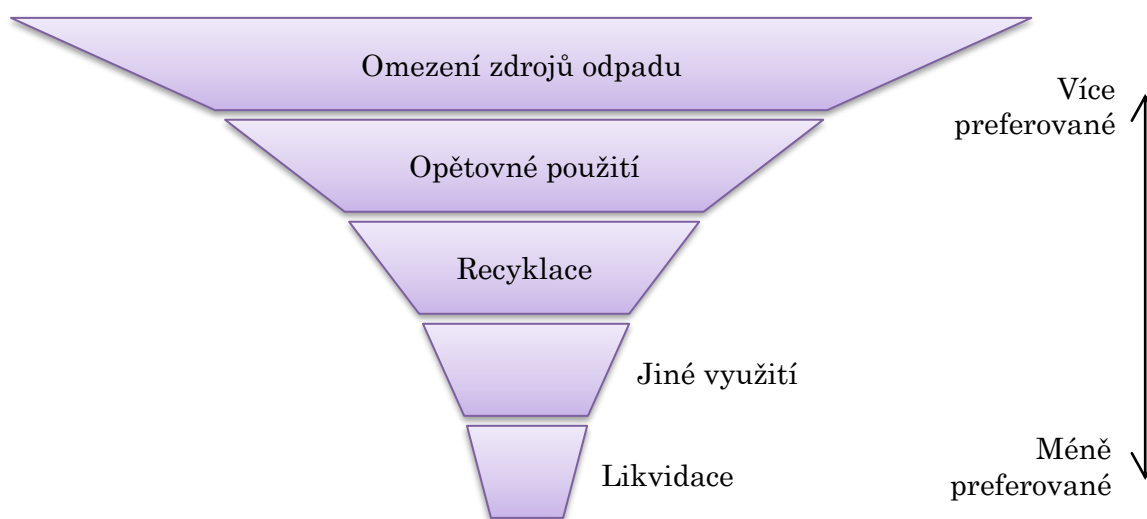
Přístup k efektivnímu návrhu lze charakterizovat dvěma základními pojmy:

- a) Cíl – čistota odpadní vody po jejím zpracování a z toho plynoucí implikace. Kvalitativně bude v rámci práce voda kategorizována následovně:
 - a. Nízká čistota – nutnost vývozu do specializovaných zařízení,
 - b. Střední čistota – možnost vypouštění do komunálních čistíren odpadních vod,
 - c. Vysoká čistota – možnost vypouštění do životního prostředí, např. povrchových vod,
 - d. Výjimečná čistota – vhodnost pro znovuvyužití jako čisté vody.
- b) Cesta – lišící se zejména detailem poskytnuté informace a mírou využití zkušenosti jako pramene poznání:
 - a. Založená na zkušenosti – empirická pravidla,
 - b. Založená na prvotních předpokladech – rigorózní model.

Následující dílčí kapitoly popisují právě hledání cíle a cesty efektivního návrhu. Pod pojmem „efektivní“ se v rámci těchto aktivit bude rozumět zejména hledání kompromisu mezi časovou náročností a přesností použitých postupů.

2.1 Eliminace vypouštění odpadních vod (Zero Liquid Discharge)

Zpracování OV patří v širším slova smyslu do odpadového hospodářství, v němž je řadu let uznávaná hierarchie nakládání s odpady zachycená na obr. 2.1.



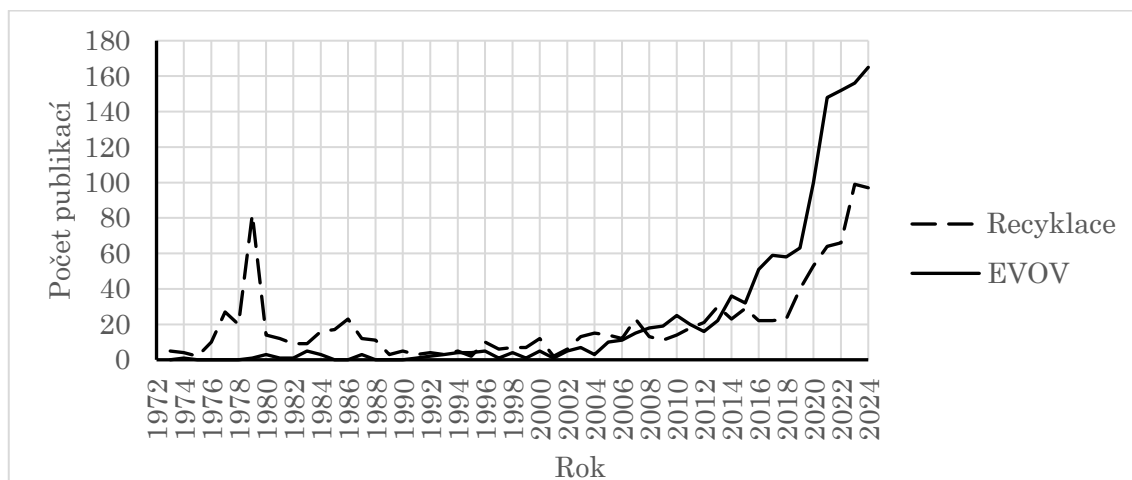
Obr. 2.1 Hierarchie nakládání s odpady, převzato z [15] a upraveno.

Tato hierarchie je přenositelná rovněž na OV. Na rozdíl od pevných odpadů je však dominantním a stále široce akceptovatelným postupem likvidace, tj. eliminace

ekotoxických vlivů za účelem vypouštění odpadní vody do životního prostředí. Omezení zdrojů odpadu, opětovné použití a recyklace jsou motivovány především snahou přinést ekonomickou úsporu vlivem snížení potřeby vody jako vstupní suroviny, méně pak snahou minimalizovat či eliminovat vypouštění odpadních vod.

Omezení zdrojů odpadu je u odpadních vod problematické z hlediska často nepřímé úměrnosti mezi objemem vody a jejím relativním znečištěním. Pokud je například zredukováno množství vody na splachování toalety, absolutní toky znečišťujících látek zůstanou totožné, jejich koncentrace vzroste a objem OV vody klesne. Snížení objemu OV tak není dobrým ukazatelem případného omezení zdrojů odpadu, které souvisí primárně s množstvím znečišťujících látek a jejich minimalizací. Tato zajímavá výzkumná otázka širšího rámce vodního hospodářství se nachází mimo rámec „zpracování odpadních vod“. Z tohoto důvodu budou parametry odpadní vody v rámci předmětného výzkumu považovány za vstupní proměnnou a příležitosti pro prevenci vzniku OV v rámci průmyslového provozu zkoumány nebudou.

Hlavním směrem zvoleným v rámci dizertační práce je recyklace odpadních vod. V rámci něho budou zkoumány i možnosti opětovného použití OV a celkový kontext vodního hospodářství. Téma recyklace odpadních vod je atraktivní výzkumnou otázkou již od 70. let minulého století, s poklesem před koncem minulého tisíciletí a opětovným nárůstem po roce 2000. V posledních letech se do popředí dostává částečně synonymní pojem „eliminace vypouštění odpadních vod“ (angl. Zero Liquid Discharge), který však vedle recyklace odpadních vod rovněž cílí také na získávání druhotných surovin z odpadní vody [16]. Srovnání publikační činnosti nesoucí tyto dva pojmy ukazuje obr. 2.2.

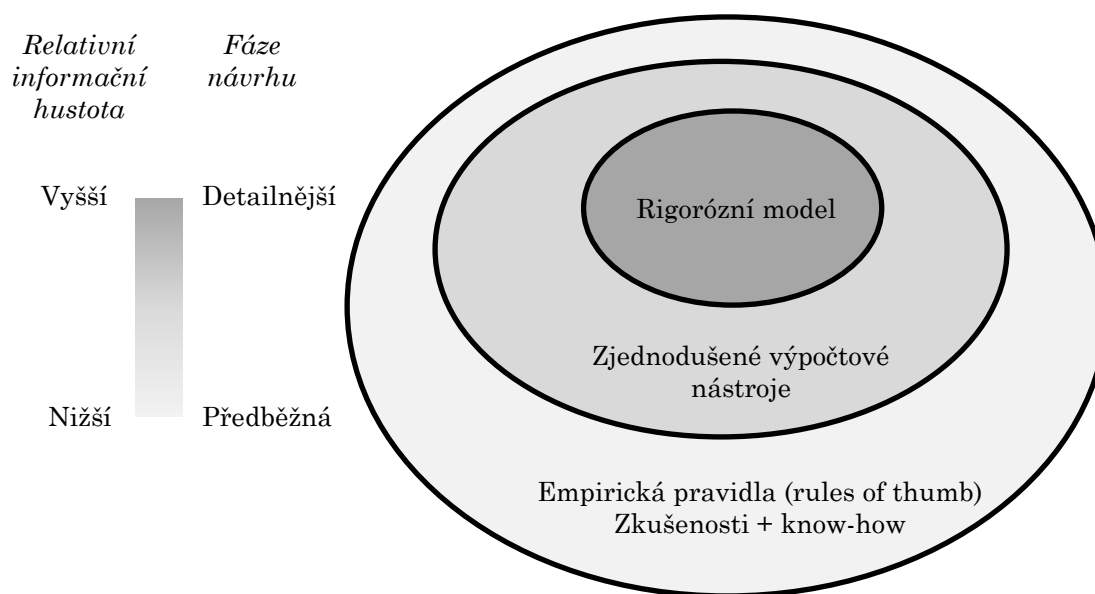


Obr. 2.2 Vyhledávání v citační databázi SCOPUS: v abstraktech, názvech a klíčových slovech publikací bylo vyhledáváno „wastewater recycling“ (Recyklace), resp. „zero liquid discharge“ (EVOV).

Z pohledu výše definovaného cíle recyklace vyžaduje vysokou až výjimečnou čistotu odpadní vody. Kvantitativní specifikace čistoty se bude lišit dle zvolených oblastí aplikovatelnosti (viz kap. 4), které se odlišují legislativními požadavky (zejména emisní limity). Například pro oplach zařízení ve vinařství bude vyžadována pitná voda, zatímco ředění substrátu v bioplynové stanici je možné i vodou s mnohonásobně vyšším znečištěním.

2.2 Návrhové přístupy

Dostupná literatura v oblasti návrhu procesních zařízení ukazuje širokou škálu přístupů, od autorů-praktiků spoléhající ve velkém podílu na zkušenosti a empirická pravidla (např. prakticky orientovaná kniha od autorské dvojice Sinnott a Towler [17]) až po autory poskytující obecnější systematický rámec návrhu a spoléhající ve větší míře na sofistikované výpočtové nástroje, jak ukazují Seider et al. v [18]. Reálný návrh zařízení typicky vzniká souborem nástrojů spadajících pod obě tyto dvě odlišné strategie, stejně jako množinu mezi nimi (např. semi-empirické výpočtové vztahy). Návrhové nástroje se vedle míry empirie liší také informační hustotou, tedy množstvím informací poskytnutých individuálním nástrojem, jak zachycuje obr. 2.3.



Obr. 2.3 Ilustrace informační hustoty různých návrhových nástrojů a jejich typické uplatnění v průběhu návrhu.

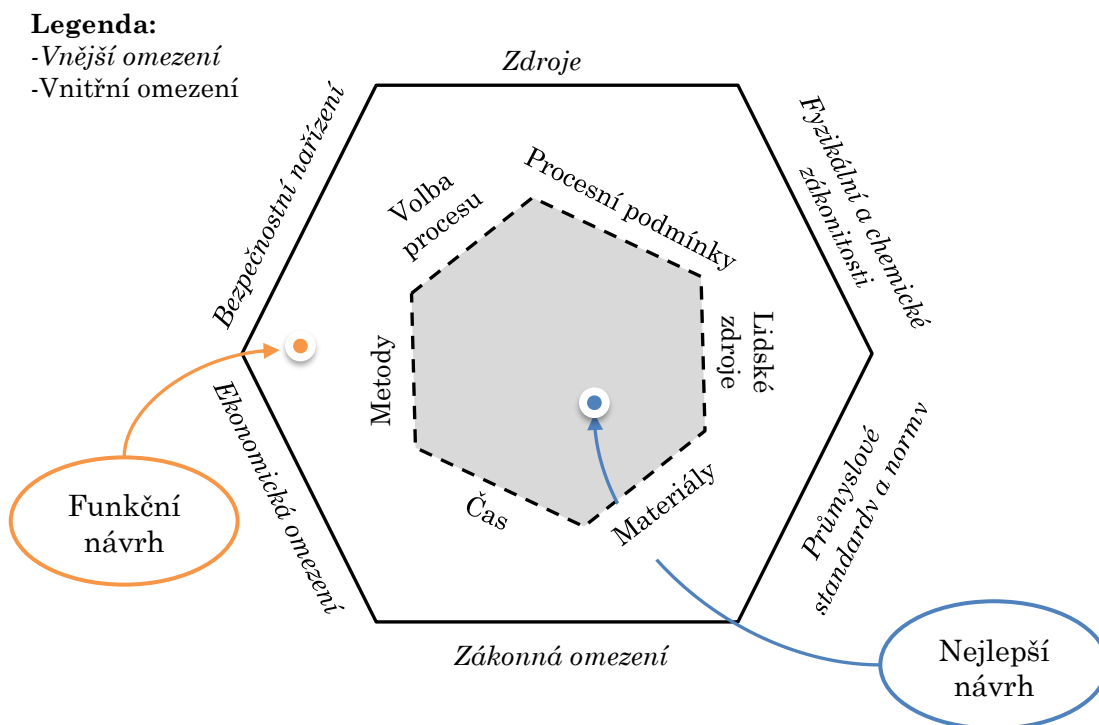
Jeden rigorózní model je zpravidla s rozumnou přesností nahraditelný souborem zjednodušených výpočtových nástrojů či ještě větším souborem empirických pravidel. Kterýkoli ze tří přístupů by měl být založen na reálných datech (včetně zkušenosti), či ověřen s jejich pomocí – platí však, že u a priori empirických postupů nutnost experimentálního ověření klesá.

Empirická pravidla² (volný překlad angl. „rules of thumb“) jsou obvykle velmi jednoduché výpočty založené na v minulosti ověřeném návrhu, poskytují tak často rychlé nalezení pravděpodobně funkčního řešení, zejména v koncepční fázi návrhu [19]. Toto *funkční řešení* může však být poměrně vzdálené od řešení optimálního (viz obr. 2.4), zejména protože empirická pravidla jsou často robustní, avšak vedoucí na potenciálně naddimenzovaný návrh.

Hlavní nevýhodou empirických pravidel je platnost vycházející z předchozích zkušeností či analogií [19]. Tím, že EVOV je relativně mladé odvětví zpracování odpadních vod a dynamicky se v posledních letech vyvíjí, empirické postupy jsou

² V anglické literatuře, např. [18, 19], se pro *rules of thumb* často využívá označení *heuristika*, což vyjadřuje jejich častou aplikaci: zkusmé hledání slibných řešení a související odhady v rámci předběžného návrhu technického řešení. *Empirie* vystihuje původ těchto pouček.

k dispozici jen sporadicky, a to často formou extrapolace z jiných odvětví a/nebo typů odpadních vod. V rámci dizertační práce proto budou primárně zkoumány postupy využívající rigorózního modelování. Takové modely zároveň, jsou-li validovány experimentálními daty, umožňují potenciálně generovat zjednodušené výpočtové nástroje či orientační pravidla. *Cesta k* efektivnímu návrhu bude tedy primárně založena na prvotních předpokladech (mechanistických modelech).



Obr. 2.4 Ilustrace procesních omezení a rozdílu mezi funkčním návrhem (založeným na empirických pravidlech) a optimálním návrhem (vzhledem k určitému kritériu); převzato z [17] a upraveno.

3 Současný stav poznání – Eliminace vypouštění odpadních vod

Rešerše v rámci zkoumání současného stavu poznání je založena na přístupu k efektivnímu návrhu zvoleném v předchozí kapitole. Klíčové sousloví je „eliminace vypouštění odpadních vod“, protože v posledních letech překonává svou četností pojem „recyklace odpadních vod“, a zároveň je to pojem nadřazený (tedy vedle recyklace klade důraz i na zisk druhotných surovin). Z pohledu návrhových nástrojů rešerše cílí na modelování a simulaci.

3.1 Metodika rešerše literatury

Cílem metodiky je nalézt takové vědecké publikace, které jsou relevantní v oblasti modelování a simulace EVOV technologií. Za tímto účelem je využita abstraktová a citační databáze Scopus, kde byla použita následující klíčová slova:

- „zero liquid discharge“ (přesná shoda), A
- modelling (příp. americký pravopis „modeling“), NEBO
- simulation.

Počáteční soubor literatury je v několika krocích zpracován do konečného souboru. Jednotlivé kroky sestávají z vyřazení zdrojů nerelevantních z pohledu EVOV (Zero Liquid Discharge) nebo odpadních vod (důvod A) a zdrojů neunikátních (tj. od těchž autorů za použití velmi podobných či stejných postupů; důvod B). Tento konečný soubor je dále rozdělen na dvě kategorie dle možnosti jejich podrobného zkoumání. U všech těchto zdrojů byl předmětem zájmu abstrakt, celý text byl studován všude tam, kde to bylo možné. Výjimku tvoří zdroje, jejichž plné znění není k dispozici (důvod C) a dále takové, které k dispozici jsou, avšak nikoli v češtině či v angličtině (důvod D).

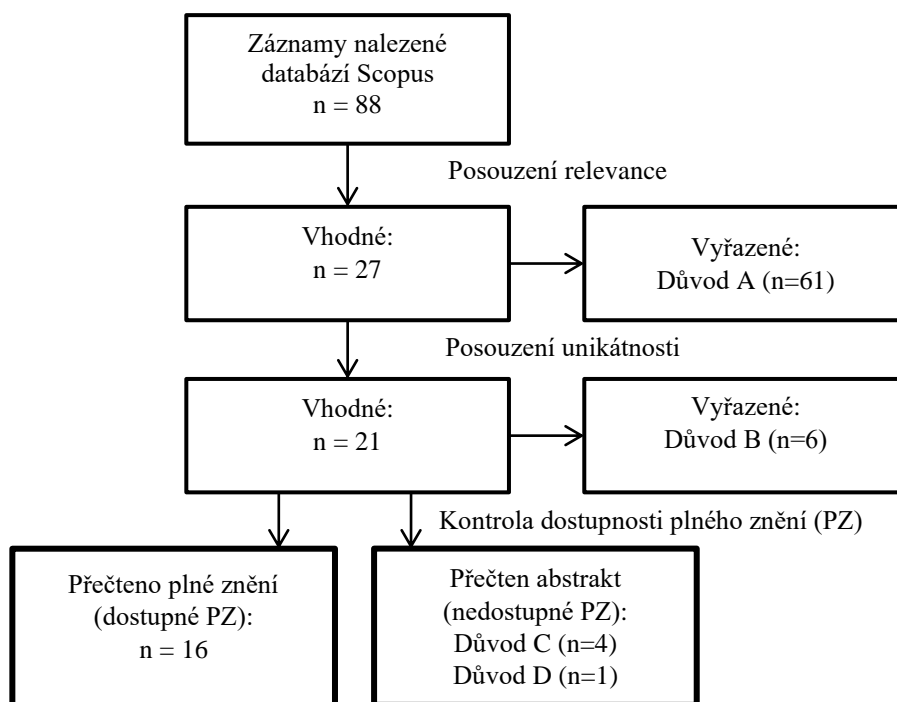
Z výsledného souboru literárních zdrojů vyplynulo:

- charakter a/nebo složení odpadní vody,
- použité procesní metody,
- rozsah modelování a simulace a zvolené přístupy,
- další relevantní poznámky.

Popsaný komplexní postup vede k výběru relevantní literatury, která může být popsána z pohledu kvantitativních a kvalitativních parametrů. Taková analýza umožní diskuzi, identifikaci dobře probádaných oblastí a vhodného směru dalšího výzkumu v oblastech s prozatím omezeným významem.

3.2 Výsledky rešerše literatury

Počáteční soubor literatury sestával z 88 publikací. Dvěma postupnými kroky selekce, které lze označit jako *relevance* (důvod A) a *unikátnost* (důvod B) vznikl konečný soubor 21 publikací, z nichž ve 4 případech nebylo dostupné plné znění (důvody C a D). Byť se u publikací bez dostupného plného znění bylo v rámci rešerše nutno omezit na informace z abstraktu, jsou ve výsledcích zahrnuty. Celkový proces výběru zachycuje obr. 3.1.



Obr. 3.1 Proces selekce literatury, která je předmětem rešerše.

Následující tabulky ukazují, na jakou odpadní vodu se autoři zaměřili, jakou metodou či metodami byly tyto vody zpracovány, zda je publikace z posledního desetiletí, a nakonec popis práce s důrazem na modelování a simulaci.

Výsledky jsou shrnuty v pěti tabulkách, z nichž každá představuje jinou kategorii z pohledu procesních metod:

1. tab. 3-1 – odpařovací technologie,
2. tab. 3-2 – membránové technologie,
3. tab. 3-3 – krystalizační technologie,
4. tab. 3-4 – hybridní technologie,
5. tab. 3-5 – jiné technologie.

Tab. 3-1 Výsledky rešerše: odpařovací technologie.

Odpadní voda	Procesní metody	Popis	Ref.
Odpadní voda z odsíření spalin -aproximováno jako H ₂ O-CaCl ₂	Sušení rotačním rozprašováním	-CFD pro zkoumání geometrických parametrů (atomizér, deflektor, komora) a optimalizaci účinnosti odpařování -Euler-Lagrangeův numerický model pro interakci kapalina-plyn -model validován pomocí pilotní jednotky (deviace v nižších jednotkách procent na parametru teploty)	[20]
H ₂ O-NaCl	Odpařování rotačním rozprašováním (princiálně totožné s [20])	-CFD za účelem zkoumání vlivu množství horkého vzduchu, jeho teploty, toku solanky, rychlosti atomizačního disku a koncentrace NaCl -vliv koncentrace NaCl je ve srovnání s jinými parametry poměrně malý (byť byla vyšetřována v rozsahu 5–25 %)	[21]
Odpadní voda z odsíření spalin	Odpařování spalinami	-CFD, model validován s odchylkami -10–0 % -Euler-Lagrangeův numerický model pro interakci kapalina-plyn -doplnění o termodynamický model Electrolyte-NRTL (kapalná fáze) a SRK (plynná fáze) v procesním simulátoru Aspen Plus, rovnovážné konstanty upraveny dle reálných dat -vyšetřování uvolněného HCl z rozkladu chlornatých solí	[22]
Odpadní voda z odsíření spalin (aproximováno čistou vodou)	Odpařování rozprašováním	-CFD -Euler-Lagrangeův numerický model pro interakci kapalina-plyn -oproti jiným pracím věnující se stejné jednotkové operaci ([20, 21]) poměrně menší komplexita (čistá voda) a absence validace, což snižuje hodnotu závěrů	[23]
Odpadní voda z odsíření spalin	Odpařování vysokoteplotními spalinami	-semi-empirický model založený na naměřených datech	[24]

		<p>-zaobírá se osudem HCl v rámci odpařovacího procesu (součástí je např. empirický vztah pro rozdělení chloridových iontů mezi kapalnou a plynnou fází)</p> <p>-bylo objeveno omezené zobecnění modelu na systémy s obsahem více různých solí/iontů (např. Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)</p>	
Odpadní voda z odsíření spalin	Odpařování spalinami	<p>-CFD za účelem geometrické optimalizace atomizačního kužele</p> <p>-Euler-Lagrangeův numerický model pro interakci kapalina-plyn</p> <p>-v publikaci není diskutováno vstupní složení do modelu</p>	[25]
Odpadní voda z odsíření spalin	Odpařovací kolona využívající nízkoteplotních spalin	<p>-nedostupné plné znění</p> <p>-CFD za účelem návrhu odpařovací komory a optimalizace návrhové rychlosti proudění</p> <p>-Euler-Lagrangeova metoda pro popis procesu odpařování</p> <p>-pilotní jednotka úspěšně provozována po dobu 5000 hodin</p>	[26]

Tab. 3-2 Výsledky rešerše: membránové technologie.

Odpadní voda	Procesní metody	Popis	Ref.
Odpadní voda z těžby břidlicového plynu a (H ₂ O-NaCl-MgSO ₄)	Reverzace toku nanofiltrace	<p>-matematický model sestávající částečně z diferenciálních rovnic, diskretizace pomocí kontrolních objemů</p> <p>-validace pomocí experimentálních dat (odchylky v průtocích typicky do 20 %, za tlaků nad 30 bar až vyšší desítky procent)</p> <p>-reverzace toku se využívá pro minimalizace vzniku minerálních úsad</p> <p>-celkový obsah pevných látek (rozpuštěných a nerozpuštěných) až 70 g/L, míra odstranění 6–48 %</p>	[27]
H ₂ O-NaCl	Reverzní osmóza se zvýšenou propustností solí (LSRRO = low-salt-rejection reverse osmosis)	<p>-matematický model sestávající z jednotek rovnic</p> <p>-výstupem jsou citlivostní analýzy včetně energetických nároků</p> <p>-tento typ reverzní osmózy se oproti konvenční RO údajně vyznačuje schopností dosahovat vysokých koncentrací NaCl při relativně nízkých tlacích</p> <p>-energetické nároky jsou srovnávány s odpařováním s mechanickou kompresí par; srovnání s konvenční RO chybí</p>	[28]
Odpadní voda komplexního složení (ionty vápníku, hořčíku, sodíku, draslíku, síranové, chloridové amoniak, oxidy dusíku)	Reverzní a přímá osmóza	<p>-pro modelování byl použit komerční nástroj společnosti KMS</p> <p>-zkoumání ekonomiky procesu (výsledné měrné náklady 2,7 €/m³)</p> <p>-původ vody není popsán</p> <p>-ve srovnání s pilotními testy model příliš optimistický (nižší požadovaný tlak, vyšší míra odstranění znečišťujících složek)</p> <p>-výtěžek vody 90 %, 95% redukce CHSK</p>	[29]
Odpadní voda z těžby uhlí	Membránová destilace (MD), krystalizace membránovou destilací (MDC =	-nasazení komerčního nástroje Stream Analyzer 9.1 od společnosti OLI Systems	[30]

	membrane distillation crystallization)	<p>-model MSE (Mixed Solvent Electrolyte), založen na několika dílčích termodynamických submodelech (např. Helgesonova stavová rovnice a několik rovnic pro výpočet aktivitních koeficientů)</p> <p>-komplexní systém obsahující desítky iontů</p> <p>-samotnému procesu není věnována pozornost, jedná se o aparát pro jeho návrh (zejména s ohledem na rozpustnosti solí a krystalizaci)</p>	
Odpadní voda ze zplyňování ³	Nanofiltrace	<p>-nedostupné plné znění</p> <p>-Donnanův stérický model</p> <p>-model validován s rozdíly <5 %</p> <p>-alkany s dlouhým řetězcem (C11+) odstraněny s účinností nad 98 %</p>	[31]

³ Obsahuje tzv. TRC = typical refractory compounds, volně „typické žáruvzdorné sloučeniny“.

Tab. 3-3 Výsledky rešerše: krystalizační technologie.

Odpadní voda	Procesní metody	Popis	Ref.
H ₂ O-NaCl	Krystalizátor s nucenou cirkulací	-CFD pro vyšetření vzniku a růstu pevné fáze v krystalizátoru -Euler-Euler model doplněný o kinetickou teorii granulárního proudění -model validován experimentálními daty z jiné publikace a také srovnán s modelem jiných autorů	[32]
Odpadní voda z těžby uhlí	Membránová destilace (MD), krystalizace membránovou destilací (MDC = angl. membrane distillation crystallization)	viz tab. 3-2	[30]

Tab. 3-4 Výsledky rešerše: hybridní technologie.

Odpadní voda	Procesní metody	Popis	Ref.
Odpadní voda z těžby břidlicového plynu -aproximováno jako H ₂ O-NaCl	Hybridní systém (solárně poháněný Rankinův cyklus, vícestupňová odparka s mechanickou kompresí par)	-nelineární vícekriteriální programování (implementováno v software GAMS, řešitel ϵ -constraint) -rozsáhlá soustava rovnic (bilance látkové a entalpické, popis termodynamického cyklu, jednoduchý popis fázových rovnováh pomocí Antoineovy rovnice, ekonomické parametry atd.) -optimalizace individuálních účelových funkcí (environmentální dopad, celkové roční náklady); pro víceúčelovou optimalizaci použití kompromisního Pareto řešení	[33]

Odpadní voda z odsíření spalin	Hybridní systém (elektrodialýza a reverzní osmóza)	<p>-model sestaven pro část procesu (elektrodialýzu) – soustava jednotek rovnic</p> <p>-ověřeno reálnou jednotkou v laboratorním měřítku</p> <p>-cílem je optimalizace provozu elektrodialýzy, která je limitujícím faktorem; velmi dobrá shoda modelu a experimentu</p> <p>-koncentrační faktor zhruba 3 (z 78 na 230 g/L), výsledná vodivost produktu 550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (poměrně vysoká hodnota ve srovnání s pitnou vodou)</p>	[34]
Odpadní voda z odsíření spalin	Odstranění pevných látek, změkčován vápnem (Clarkův proces), odpařování, mísení zbytku s popílkem	<p>-nedostupné plné znění</p> <p>-výpočtový nástroj pro chemické a látkové bilance (validováno pomocí laboratorních experimentů)</p> <p>-zahrnuje skládkování – zčásti proti myšlenkám EVOV jako prostředku cirkulární ekonomiky</p>	[35]
Záchyt vody z měst	Předčištění (před RO)	<p>-nedostupné plné znění</p> <p>-zkoumané předčištění:</p> <p>-výměna iontů (ionex), pokročilé oxidační procesy, biologická filtrace, koagulace, změkčování, adsorpce</p> <p>-metody předčištění nejsou individuálně ekonomicky perspektivní (při vysokých koncentracích znečišťujících látek)</p> <p>-návrh hybridního systému pokročilé oxidace a biologické filtrace – model tvořen právě pro tyto jednotkové operace, jeho specifika nejsou známy</p>	[36]
Odpadní voda z ocelářského průmyslu	Membránové systémy spolu s chemickou předúpravou	<p>-nedostupné plné znění</p> <p>-modelování s důrazem na látkové bilance a procesní jednotkové operace včetně chemismu vody</p> <p>-recyklace vody</p>	[37]

Tab. 3-5 Výsledky rešerše: jiné technologie.

Odpadní voda	Procesní metody	Popis	Ref.
H ₂ O-DME ⁴ -NaCl	Extrakce vody pomocí činidla (solvent-driven water extraction = SDWE)	-LIQUAC „excess Gibbs free energy“ ⁵ pro popis fázových rovnováh -rovnovážný model vícestupňového protiproudého separátoru kapalina-kapalina -vody lze získat 48 a 59 % pro 1 resp. 2 rovnovážné stupně	[38]
H ₂ O-NaCl/KCl/ CaCl ₂ / Na ₂ SO ₄ / Na ₂ CO ₃	Nadkritické odsolování vody (supercritical water desalination = SCWD)	-dynamické molekulární simulace (modul Forcite, software Materials Studio od společnosti Accerlys) -základem pro popis silových polí mezi molekulami je model COMPASS II -některé parametry prostým fitováním dat (např. aproximace vodivosti roztoku kvadratickou funkcí)	[39]
Průsaková odpadní voda ze skládkování	Evapotranspirace (ET) mokřadů ⁶	-hydrologické modelování -založeno na lineární regresi z reálných dat (2016, 2017, 2018) z mokřadu zpracovávající tentýž typ odpadní vody -poměrně velké odchylky (u některých parametrů téměř 40 %), avšak směrem, jenž je pro návrhovou činnost konzervativní -z pohledu procesního velká zastavěná plocha a skladovaný objem vody	[40]

3.3 Hlavní zjištění plynoucí z rešerše literatury

Vybrané relevantní publikace lze kategorizovat z mnoha hledisek. Nabízí se především tři hlavní předměty zájmu studie: a) typ odpadní vody, b) kategorie procesních metod, c) rozlišovací úroveň modelovacích přístupů.

⁴ Dimetyléter

⁵ „Excess“ vyjadřuje změnu Gibbsovy volné energie vlivem neideálního chování a nemá český jednoslovný ekvivalent.

⁶ Základem mokřadů jsou vrby.

Typy odpadních vod jsou poměrně rozmanité. Hlavní opakující se vzorec jsou odpadní vody z odsíření spalin. Jejich podíl dosahuje takřka poloviny (8 z 21). Důvodem je zejména čínský „Water Pollution Control Action Plan“ [24], který formuluje několik ambiciózních cílů od roku 2020, což výrazně koreluje s nárůstem publikační aktivity čínských autorů. Dalším typem odpadních vod, který se vyskytuje ve více případech, je voda z těžby břidlicového plynu (2 publikace). U některých studií není adresně popsán původ, ale pouze složení. V tomto ohledu dominuje solanka (systém $H_2O-NaCl$), který se často používá také jako zjednodušení komplexnějších vod (např. právě z těžby břidlicového plynu). V jednom případě byla jako zjednodušující složení použita čistá voda [23]. Ostatní typy odpadních vod se ve výsledcích objevují jen jednotlivě. Komplexní (reálné) složení, které ovlivňuje zejména u tepelných procesů fázové rovnováhy mezi kapalnou a plynnou fází, stejně jako chemické rovnováhy v kapalně fázi v případě přítomnosti iontů, bylo aplikováno pouze ve 3 případech. Bohužel často chybí informace o nepřesnosti vzniklé zjednodušeným složením – pouze Ma et al. zmiňují, že přítomnost dalších iontů způsobuje odchylky v predikcích jejich semi-empirické rovnice [24].

Rozdělení na procesní metody je zřejmé již ze struktury kap. 3.2:

1. odpařovací – zejm. odpařování a sušení rozprašováním (7 publikací, tab. 3-1),
2. membránové – typicky nanofiltrace či reverzní osmóza (5 publikací, tab. 3-2),
3. krystalizační – konvenční či membránová krystalizace (2 publikace, tab. 3-3),
4. hybridní – čítající typicky 2–4 jednotkové operace (5 publikací, tab. 3-4),
5. jiné – mokřady, extrakce a nadkritické odsolování (3 publikace, tab. 3-5).

Publikace [30] byla zařazena jak do kategorie 2, tak do kategorie 3, což je důvodem, proč počet výše uvedených záznamů je o jeden vyšší oproti počtu publikací ve studii. Obecně skladba procesních metod ve vybraném souboru literatury odpovídá nejčastějším technologiím v oblasti EVOV [16]. Z toho lze vyvodit, že matematické modelování je využitelné nezávisle na zvoleném procesu, byť se modelovací přístupy liší.

Modelovací přístupy lze kategorizovat z mnoha hledisek, např. zda je statický (ustálený stav) či dynamický, deterministický či stochastický, „tailor-made“ či využívající existujících výpočetních nástrojů apod. Drtivá většina modelů je však statických a deterministických, přičemž využívají často komerčních nástrojů (zejména oblast CFD, ale také jiné). Zajímavější je proto kategorizace z pohledu rozlišovací úrovně:

- A. molekulární úroveň – méně než 1 mm, např. molekulární modelování – 2 publikace,
- B. úroveň dílčích dějů – typicky nejvýše jednotky metrů, nejčastějším zástupcem CFD – 10 publikací,
- C. úroveň jednotkových operací – často bez prostorového měřítka, zejména bilanční výpočty – 9 publikací.

Z toho lze vyvodit, že molekulární úroveň je v oblasti EVOV spíše okrajovou záležitostí. Zajímavým průnikem mezi procesy a zvolenou rozlišovací úrovní je, že na odpařovací technologie je téměř výlučně aplikováno CFD, zatímco bilanční výpočty se uplatní především u technologií membránových a hybridních.

Výsledky rešerše a následná kategorizace umožňují formulovat několik důležitých závěrů:

- a) U odpařovacích technologií má význam věnovat se zejména energetické bilanci, která může být z pohledu dostupných tepelných proudů limitující. Prakticky všechny případy odpařování v této studii však využívají snadno dostupnou entalpii spalin a zároveň v drtivé většině využívají rozprašování, kde je CFD hodnotným optimalizačním nástrojem.
- b) Dosavadní studie se zatím omezují na zjednodušená či málo komplexní složení odpadních vod (nejvýše jednotky složek). S výjimkou obsahu minerálních látek [16], což je jen jeden z mnoha důležitých parametrů odpadních vod, prozatím také neexistují žádná vodítka pro výběr procesní technologie.
- c) Žádná z uvedených hybridních systémů nekombinuje membránové, odpařovací a krystalizační technologie v jednom technologickém celku, což je v oblasti EVOV častou praxí. Lze se proto domnívat, že spíše doposud nebyly tyto technologie modelovány s ohledem na nutnost nasazení různých modelovacích přístupů v jednom komplexním celku.
- d) Optimalizace a návrhové činnosti se nejčastěji věnují provozním hlediskům, např. maximalizaci odpařovací účinnosti. Často však chybí ekonomické či environmentální hodnocení, které se vyskytuje pouze v jednotkách případů.

Je vhodné poznamenat, že soubor literatury by bylo vhodné rozšířit o publikace věnující se předmětným technologiím, avšak neodkazující se na přístup EVOV. Přesto se jedná o vzorek postačující pro zachycení posledních trendů.

Z rešerše plyne řada možných směřování, kterým doposud byla věnována omezená pozornost. Jedná se mj. o bilanční výpočty odpařovacích procesů nasazených na odpadní vody, zahrnutí komplexního složení odpadních vod, vodítka pro výběr vhodné technologie dle typu odpadní vody, vyšetřování hybridních systémů kombinujících membránové a tepelné procesy, či důraz na ekonomické a environmentální hodnocení procesu. Právě tyto doposud opomíjené výzkumné otázky budou přednostně pokryty v rámci tvorby komplexní metodiky.

3.4 Minimalizace vypouštění odpadních vod

Minimalizace vypouštění odpadních vod (MVOV) je často upřednostňována před EVOV z důvodu nižší potřeby energie, ekonomických aspektů či využitelnosti koncentráту. Uvádí se, že energetická spotřeba MVOV technologií je rámcově poloviční oproti EVOV, což s sebou přináší odpovídající úsporu provozních nákladů a sníženou produkci skleníkových plynů [41].

EVOV má přidanou hodnotu v oblastech, kde je žádoucí (proveditelné a ekonomické) získávat cenné složky v pevném skupenství. V případech, kdy tomu tak není, může být kapalný koncentrát výhodný pro produkci bioplynu v duchu oběhového hospodářství a částečné kompenzace energetických nároků technologie [42, 43].

V neposlední řadě jsou systémy MVOV méně komplexní, prostorově a investičně náročné, což usnadňuje jejich implementaci v průmyslových provozech [13, 28]. Na možnou výhodnost MVOV ukazuje i studie Ústavu procesního inženýrství zaměřující se na celoevropské měřítko [5].

S ohledem na úzkou souvislost obou přístupů je v dalším textu využíváno úhrnné označení MVOV/EVOV.

4 Výběr aplikací podporujících výzkumné cíle Ústavu procesního inženýrství

Koncept MVOV/EVOV lze nasadit na desítky různých typů odpadních vod. Dlouhodobým cílem autora je rozvíjet obecnou metodiku, která umožní posouzení vhodnosti a koncepční návrh technologie pro nejrůznější typy odpadních vod. Pro potřeby dizertační práce je však vhodné se omezit na několik vybraných oblastí, které se liší svým charakterem a zároveň kladou v návrhové činnosti řadu omezujících podmínek a technologických výzev. Dalším kritickým požadavkem je aktivní aplikovaný výzkum v dané oblasti. Metodika díky tomu bude integrovat reálná data, s důrazem na praktickou orientaci a přímou vazbu na projekty výzkumu a vývoje.

4.1 Užší výběr oblastí

Tab. 4-1 Pětice odpadních vod relevantních v rámci výzkumu Ústavu procesního inženýrství.

Odpadní voda	Dostupnost tepla	Těkavé složky	Podíl sušiny
Vinařské odpadní vody	Nízká	Ethanol	Typicky <1 hm. %
Digestát z bioplynových stanic	Střední	Amoniak	Jednotky hm. %
Prádelenské odpadní vody	Vysoká	—	Stopový
Znečištěná mořská voda	Variabilní	—	Variabilní
Voda z odsíření spalin	Velmi vysoká	Omezeně ⁷	Dle tvorby a způsobu odstranění TZL ⁸

Tab. 4-1 zachycuje pětici odpadních vod, kterými se aktuálně zaobírá Ústav procesního inženýrství FSI VUT v Brně. V duchu výběru takových vod, jejichž recyklace představuje největší výzvu, byly zvoleny **vinařské odpadní vody a digestát z bioplynových stanic**. Jak zčásti naznačuje tabulka, důvody jsou především:

- Nižší dostupnost odpadního tepla oproti prádelenskému provozu či spalovacímu zařízení představuje pro případ nasazení tepelného procesu výzvu v oblasti tepelné integrace a maximalizace energetické účinnosti procesu.
- Digestát z bioplynových stanic (dále jen „BPS“) i odpadní vody z vinařství (dále jen „OVV“) obsahují těkavé složky, které se za zvýšených teplot a/nebo snížených tlaků koncentrují v parní fázi nad hladinou odpadní vody. Molekuly předmětných sloučenin (zejména amoniaku) jsou zároveň

⁷ SO₂ ve vodě disociuje a pouze malá fyzikálně rozpuštěná část je těkavá. Zejména za zvýšených teplot mohou do parní fáze přecházet také některé těžké kovy (např. rtuť).

⁸ Zkr. tuhé znečišťující látky.

- velikostně relativně blízké vodě. Tyto dvě vlastnosti komplikují individuální nasazení jak odpařovacích, tak membránových technologií.
- c) Přítomností sušiny se z těchto odpadních vod stává vícefázový systém, vlivem těkavých složek typicky „pevná látka-kapalina-pára“. Sušina však v drtivě většině případů sestává nejen z nerozpuštěných látek, ale také látek rozpuštěných. Ty mohou v kapalně fázi disociovat a tvořit soli nejen vzájemnou rekombinací, ale také interagovat mj. s rozpuštěnými plyny (např. vznik amonných solí). Tuto komplexitu a iontové interakce je nezbytné v návrhu recyklační technologie zohlednit.
 - d) Znečištěná mořská voda je zajímavou výzkumnou otázkou, primárně však z pohledu zpracování pevné frakce (např. plastového odpadu). Odsolování mořské vody je dobře zvládnutou technologií, na kterou jsou technologie MVOV/EVOV hojně nasazovány [16]. Potenciál pro inovativní výzkum je proto omezený.
 - e) Jak plyne z výsledků kapitoly 3.3, novost výzkumu je omezena také pro vodu z odsíření spalin. Na tu se již zaměřila řada autorů.

Jak ukazují následující dílčí kapitoly, vedle těchto základních rysů existuje mnoho dalších aspektů složení těchto vod, proměnlivosti jejich charakteru v čase a legislativních omezení, které mají určující vliv na výsledný procesní návrh. Obě vybrané podoblasti jsou zároveň aktuálními výzkumnými otázkami, jejichž význam přesahuje Českou republiku a často i Evropu.

V souladu s požadavkem formulovaným na začátku této kapitoly se probíhá v těchto dvou oblastech intenzivní výzkum. To dokládají aktuálně a nedávno řešené výzkumné projekty ÚPI zaměřené na zvolené typy odpadních vod:

- a) **Digestát z BPS:** Projekt TAČR ČR s označením **REDIGE (TAČR FW03010481), který probíhal v letech 2021–2023.** Předmětem byla zahušťovací technologie, která ze vstupní tekuté frakce digestátu produkuje koncentrát, jenž je přívětivější z pohledu přepravních a skladovacích nákladů a vyšší koncentrace hnojivých látek. V rámci tohoto projektu vznikla provozuschopný pilotní jednotka založená na odpařování a stripování. Tato jednotka efektivně využívá přebytečné teplo BPS a zpracovává kapalně proudy s vysokým podílem sušiny.
- b) **Odpadní vody z vinařství:** V roce 2022 byl řešen **projekt specifického výzkumu Inovativní technologie pro zpracování odpadních vod z vinařství (FCH/FSI-J-22-7894), pracovně označovaný INOVV.** Cílem projektu bylo posoudit praktickou aplikovatelnost kombinace odpařování a stripování na odpadní vody z vinařství (OVV) s příslibem minimalizace vypouštění odpadní vody za možného znovuvyužití zpracované vody. Díky poznatkům výše uvedeného projektu INOVV a projektu smluvního výzkumu se společností HUTIRA s.r.o byl TAČR ČR **podpořen projekt s označením R3WISION (FW10010437) s plánovaným řešením 2024–2026.** V době vzniku této práce probíhá dokončování poloprovodní jednotky, jenž bude instalována ve vybraném vinařském provozu. Z důvodu ochrany duševního vlastnictví nejsou v této dizertační práci k dispozici procesní detaily poloprovodní jednotky. Nicméně přínos autora a aplikace metodických postupů s touto dizertační prací související jsou částečně prezentovány v kap. 7.2.

4.2 Vinařské vody

Celosvětová produkce vína v roce 2023 byla odhadnuta na 24 410 000 m³, přičemž 61 % tohoto objemu bylo vyrobeno v Evropě [44]. Největšími producenty vína v Evropě jsou Itálie, Francie a Španělsko. Vinařství představuje klíčové odvětví potravinářského průmyslu a současně přispívá k rozvoji cestovního ruchu. Produkce vína však vykazuje klesající trend v důsledku nepříznivých klimatických podmínek, zejména sucha, které vede ke snížení sklizňových objemů hroznů [44]. S narůstajícím nedostatkem vody, zejména v oblastech náchylných k suchu, je čím dál více nezbytné zavádění efektivního a udržitelného hospodaření s vodou, jež je klíčové pro odolnost a dlouhodobou udržitelnost odvětví.

Vedle tohoto trendu se v následující dekádě očekává růst podílu vín s chráněným označením původu, chráněným zeměpisným označením a organických vín [45]. Protože se tento segment vín často pojí s menšími či středními vinařstvími, je důležité očekávaný vývoj akcentovat také ve směřování technologií pro zpracování odpadních vod z vinařství nezávisle na jejich velikosti.

Proces výroby vína zahrnuje šest technologických kroků, v jejichž průběhu vzniká odpadní voda a organický odpad s vysokým obsahem znečišťujících látek. Množství generované odpadní vody z vinařství závisí na druhu vyráběného vína (červené, bílé, šumivé). V průměru vzniká 1–4 litry OVV na každý litr vyprodukovaného vína [46]. Objem i složení této vody však sezónně kolísají [47].

Průtok OVV dosahuje maxima během vinobraní, které v Evropě obvykle probíhá od září do listopadu. OVV primárně pochází z mytí zařízení během drcení a lisování hroznů a z oplachování fermentačních nádrží, sudů a dalšího vybavení [48]. Rostoucí obavy z environmentálních dopadů OVV spolu se silícím tlakem ze strany regulačních orgánů zvýrazňují naléhavou potřebu efektivního čištění těchto vod. Navzdory obecné znalosti základních vlastností OVV zůstává výběr optimálních a dlouhodobě udržitelných metod čištění značnou výzvou. Hlavními komplikujícími faktory jsou sezónnost výskytu, proměnlivé složení a vysoký obsah organických látek, který se obvykle vyjadřuje chemickou spotřebou kyslíku (CHSK). Hodnoty CHSK mohou být velmi variabilní a dosahují rozsahu 320–49 105 mg/l [49].

V případě, že vinařství deleguje správu odpadních vod na externí subjekt, bývá motivace k investicím do vlastních čistících technologií zpravidla vyšší, přičemž návratnost investice je podpořena úsporami za likvidaci a/nebo přepravu odpadních vod. Tato motivace může být dále posílena: (a) během vinobraní, kdy obecní ČOV čelí nadměrnému zatížení organickými látkami, (b) v případech, kdy vinařství nemá přístup ke kanalizační síti, a (c) pokud jsou uplatňovány přísné limity a/nebo vysoké poplatky za vypouštění [50].

Průslušná technologie musí být dostatečně robustní, aby zvládala proměnlivé vlastnosti OVV, a zároveň ekonomicky přijatelná i pro malá vinařství. Zavedení recyklačních technologií však představuje potenciální nástroj pro boj se suchem a zmírnění dopadů nedostatku vody nejen na vinařský průmysl, ale rovněž pro podporu ochrany životního prostředí jako celku. Recyklace navíc může snížit celkové náklady na odběr vody, což je z hlediska provozní ekonomiky vinařství klíčový faktor, a tím posílit ekonomickou návratnost investice do čistících technologií.

Vedle změn na trhu roste rovněž tlak v oblasti ochrany životního prostředí, udržitelnosti a s tím související legislativy. Zatímco historicky byly odpadní vody z vinařství vypouštěny na zemědělskou půdu [51], novější poznatky ukazují

negativní vliv na půdní hmotu a pěstované plodiny [52]. Specificky v Evropě tento přístup není oficiálně praktikovatelný již od dob Směrnice rady č. 91/271/EHS [53] a jejich pozdějších dodatků.

Existuje celá řada publikací rešeršního charakteru, které vznikly v poslední dekádě a věnují se technologiím pro zpracování OVV. Jedná se buďto o komplexní přehledy [49, 54, 55], případně rešerše pokrývající specifické odvětví těchto technologií jako např. biologické procesy [51], pokročilé oxidační procesy [56] či umělé mokřady [57]. Tyto práce pokrývají do detailu v podstatě všechny přístupy ke zpracování odpadních vod z vinařství, které jsou dnes k dispozici. Společným jmenovatelem dostupných technologií je, že se téměř výlučně zaměřují na cíl vypouštění odpadních vod do povrchových vod či kanalizace. Výzkum v oblasti redukce objemu odpadních vod z vinařství a znovuvyužití vody byl doposud jen velmi sporadický.

4.2.1 Charakterizace odpadní vody z vinařství

Odpadní voda z vinařství je kyselá, fytotoxická, vykazující vysokou spotřebu kyslíku a obsahující baktericidní fenoly [58]. Obzvláště problematické je období vinobraní, které je zodpovědné za většinu produkce odpadních vod z vinařství [59] a současně ovlivňuje složení, s vyšším podílem cukrů na úkor obvykle dominujícího ethanolu a obecně vyšším organickým zatížením [50]. Kromě vinobraní k celkové produkci OVV z pohledu objemu nejvíce přispívají výplachy zbytků z potrubí (přibližně čtvrtina), oplachy nádrží (přibližně 14 %) a lahvování (přibližně 8 %) [59].

Odpadní vody z vinařství jsou charakteristické svým nestálým a rozmanitým složením. K jeho stanovení se využívá časově náročných, nákladných analýz jako např. vysokoúčinné kapalinové chromatografie či plynové chromatografie s hmotnostní spektrometrií [60]. Tyto analýzy navíc vyžadují vysoce kvalifikovaný personál. Publikace [61] se jako jedna z mála na tuto problematiku zaměřila a odhalila cukry, alkoholy, organické kyseliny, estery či polyfenolické sloučeniny. Kromě těchto organických sloučenin se v OVV vyskytují také anorganické prvky, obvykle sodík či draslík z čisticích prostředků a samotných hroznů [52].

Byť je elementární analýza důležitým prostředkem pro stanovení některých mikropolutantů a perzistentních znečišťujících látek, volba technologie pro zpracování OVV se často primárně odvíjí od limitujících faktorů chemické spotřeby kyslíku (CHSK) a podílu sušiny [54]. Dalším důležitým parametrem je hodnota pH, která ovlivňuje fungování technologie pro zpracování OVV, a proto je často řízena dle procesních požadavků [59].

Všechny tři parametry (CHSK, sušina, pH) vykazují výrazné sezónní fluktuace – např. CHSK se může pohybovat v širokém rozsahu 320–49 000 mg/l [49] a někteří autoři zmiňují výkyvy až na šestinásobně vyšší hodnoty (296 000 mg/l) [60]. Biochemická spotřeba kyslíku za období 5 dnů při 20 °C (BSK_5), popisující míru biodegradability znečišťujících látek, kolísá srovnatelně s CHSK a typicky se pohybuje okolo poloviny její hodnoty [49]. Střední hodnota pH OVV je kolem 5, což tento typ odpadní vody činí kyselým, avšak může být přechodně silně zásaditá (pH 12), typicky vlivem NaOH či KOH jakožto hydroxidů používaných při čištění [60].

Právě výrazná variabilita parametrů odpadních vod z vinařství vyvíjí tlak na inovativní zpracovatelskou technologii, která bude robustní pro zvládnutí vysokého organického zatížení, ale zároveň schopná flexibilně zpracovat vodu jak v obvyklém provozu, tak při výskytu špičkových hodnot.

4.2.2 Přehled postupů pro zpracování odpadních vod z vinařství

Technologie pro zpracování OVV se typicky dělí do 4 kategorií: a) fyzikálně-chemické procesy, b) biologické procesy, c) pokročilé oxidační procesy, d) tepelné procesy. V následující tabulce (tab. 4-2) jsou vybrány metody spadající pod tyto čtyři kategorie spolu s účinnostmi odstranění/redukce parametrů dostupnými v literatuře, zejm. CHSK. Právě míra odstranění CHSK je jednak často uváděna, jednak je jednou z nejčastějších měřítek toho, jak účinná je technologie čištění OVV. Důvodem je, že CHSK je často limitující podmínkou pro vypouštění této odpadní vody.

Tab. 4-2: Rámcové srovnání technologií pro zpracování odpadních vod z vinařství

Kategorie/metoda	Účinnost odstranění	Poznámky	Zdroj
Fyzikálně-chemické	Koagulace s chitosanem	NL ⁹ : 80 %, CHSK: 73 %	[62]
	Koagulace s Ca(OH) ₂	NL: 90 %, zákal: 84 %, CHSK: 34 %	V kombinaci s dlouhodobým provzdušňováním CHSK až 85 % [63]
	Chemické srážení	NL: 90 %, Cu: 96 %, Zn: 76 %, CHSK: 9 %	Jako srážedlo použito TMT ¹⁰ [64]
	Elektrokoagulace (Al elektrody)	Barva: 97 %, zákal: 98 %, CHSK: 48 %	Efektivní pro úpravu barvy a zákalu [65]
Pokročilé oxidační	Ozonace	CHSK: 66 %, polyfenoly: 96 %	V kombinaci s koagulační-flokulační-dekantací [66]
	Ozonace + UV-C + Peroxidace	CHSK: 57 %	Nejvyšší účinnost při pH 10 [67]
	Fotokatalytická ozonace (TiO ₂ + H ₂ O ₂)	CHSK: 58 %	[68]
	Fentonova oxidace	CHSK: 93 %	Použita jako dočišťování po provzdušňování [69]
	Solární foto-Fentonova oxidace	CHSK: 80 %	Po 402 minutách [70]
	Foto-Fentonova oxidace	CHSK: 80 %	Po 240 min; umělé UV-C záření; při kombinaci s biologickými procesy snížení CHSK až o 95 % [71]
	Elektrochemická oxidace	CHSK: 98 %, Perzistentní sloučeniny: 99,9 %	Anoda z borem dopovaného diamantu, účinná na odolné polutanty [72]

⁹ Zkr. nerozpuštěné látky.

¹⁰ Z angl. trimercaptotriazine, zde specificky trisodná sůl kyseliny trithiokyanurové.

Aerobní biologické	Konvenční aktivovaný kal	CHSK: 98 %, P: 85 %, BSK ₅ : 50 %	Běžné čištění	[49]
	Sekvenční vsádkový reaktor (SBR ¹¹)	CHSK: 85-99 %	Vhodné pro malá/střední vinařství	[51]
	Membránový bioreaktor (MBR)	CHSK: až 99 %	Kombinace membránových a biologických procesů	[73]
Anaerobní biologické	Anaerobní SBR	CHSK _{rozp} : až 98 %		[74]
	Reaktory s kalovým ložem a vnitřním separátorem biomasy (UASB ¹²)	CHSK: až 90 %		[75]
Umělé mokřady	Umělý mokřad	CHSK: 59–72 %		[76]
	Umělý mokřad	CHSK: 90 %	Při nízkém organickém zatížení <50 g _{CHSK} /m ² d	[57]
	Umělý mokřad	CHSK: 60 %	Při vysokém organickém zatížení >600 g _{CHSK} /m ² d	[57]
Tepelné	Odpařování	CHSK: 99 % (v kombinaci se stripováním)		[77]

Fyzikálně-chemické procesy jsou charakteristické svou jednoduchostí. Jejich omezená schopnost redukovat CHSK je ale činí vhodnými pouze pro předčištění OVV. Na rozdíl od jiných metod jsou také vhodné pro odstraňování pevných látek, a to jak rozpuštěných (srážení), tak nerozpuštěných (sedimentace, koagulace).

Biologické čištění je vyspělou technologií rozšířenou jak pro komunální, tak pro průmyslové odpadní vody. Je schopno zvládat i vysoká organická zatížení, avšak vyžadovaná zdržná doba nevyhnutelně znamená prostorově a investičně náročné zařízení. Mikroorganismy jsou však citlivé na náhlé změny složení, což může vést až k deaktivaci procesu. Účinnější aerobní metody se také pojí s energeticky náročným provzdušňováním, naproti tomu anaerobní metody produkují energeticky zhodnotitelný bioplyn.

Pokročilé oxidační metody jsou mladou technologií, vykazující však velmi slibné výsledky v oblasti dočištění odpadních vod kupříkladu po biologickém stupni. Jsou schopny odstraňovat např. farmaceutika, endokrinní disruptory, kofein či bakterie rezistentní na antibiotika [56]. Jejich nevýhodou je však relativně vysoká spotřeba elektřiny a chemikálií, což doposud neumožnilo nasazení v provozním měřítku [56].

Tepelný proces odpařování je atraktivní nejen kompaktností a vysokou účinností, ale také schopností dělit odpadní vodu na koncentrát a destilovanou vodu, potenciálně

¹¹ Z angl. Sequencing Batch Reactor.

¹² Z angl. Upflow Anaerobic Sludge Blanket.

znovu využitelnou ve vinařství. Nevýhodou je spotřeba tepla a zatížení destilované vody těkavými složkami.

Mnoho vinařství čelí otázce, zda budovat vlastní čistírnu odpadních vod. Byť aktuální data specificky pro Českou republiku nejsou k dispozici, studie provedená v Itálii v roce 2004 [78] ukazuje, že většina OVV byla vypouštěna do kanalizace, přibližně čtvrtina byla převážena do zpracovatelských zařízení v cisternách, alarmujících 10 % bylo vypouštěno na půdu a pouze 5 % bylo zpracováno přímo ve vinařství.

4.2.3 Vyvození závěrů pro odpadní vody z vinařství

Pokud čištění odpadní vody pro vinařství zajišťuje externí subjekt, návratnost případné investice do vlastního zařízení je nepřímo úměrná poplatkům za vypouštění/transport a zpracování. Motivace k pořízení takové technologie výrazně roste:

1. se zpřísnujícími se emisními limity a/nebo zvyšujícími se poplatky za vypouštění,
2. vlivem vinobraní, kdy konvenční čistírny odpadních vod nejsou schopny a odmítají zpracovat OVV,
3. pokud vinařství není připojeno ke kanalizaci.

Pro konvenční procesy platí, že měrné náklady (vztažené na zpracovatelskou jednotku) jsou výrazně vyšší pro malá vinařství běžná v Evropě. Konkrétně pro vinařství, které zpracuje méně než 1000 t/rok jsou přibližně pětinasobné oproti provozu se zpracovatelskou kapacitou nad 50 000 t/rok [54]. Kvůli velké zastavěné ploše je navíc nutné zohlednit otázku dostupnosti vhodného prostranství. Moderní technologie by měly vykazovat vysokou škálovatelnost a účinnost, malou zastavěnou plochu, produkty o přidané hodnotě a příznivé náklady na pořízení i provoz.

Velmi zajímavým vzorcem identifikovaným týmem Ústavu procesního inženýrství [79] je opomíjení těkavého ethanolu jako hlavního přispěvatele organického znečištění. S výjimkou jedné studie [77] doposud zcela chybí výzkum věnující se technologiím zaměřeným na ethanol a jiné těkavé složky v kontextu OVV.

4.3 Digestát z bioplynových stanic

Digestát vzniká vedle energeticky využitelného bioplynu jako kapalný odpadní proud z BPS. Nakládání s ním je zajímavou výzkumnou otázkou nejen z hlediska ekonomických výnosů v případě využití jako hnojiva [80], ale také z pohledu trvalé udržitelnosti. Velmi aktuální je například nakládání s neobnovitelnými zdroji jako jsou draslík a fosfor, které jsou v digestátu obsaženy. Kritická je situace zejména u fosforu, kde se odhaduje vyčerpání přírodních zásob za 40 až 100 let [81].

Problematice nakládání s digestátem se autor věnoval již ve své diplomové práci [82], která spolu s obsáhlejšími zdroji [80], [81] a [83] poskytuje ucelený přehled možností v této oblasti. Tato podkapitola poskytuje pouze stručný popis technologických postupů určených k úpravě a zhodnocení digestátu.

4.3.1 Charakterizace digestátu

Z pohledu složení a vlastností je digestát podobně rozličný jako OVV. V případě digestátu jsou však tyto parametry velmi dobře monitorovány a existují literární zdroje, které prezentují statisticky významný soubor vzorků (stovky až tisíce), jak prezentuje např. Česká bioplynová asociace [84]. Z výsledků tohoto šetření (viz tab.

4-3 je zřejmý obsah hnojivých látek (dusík, draslík, fosfor) o relativně nízkých koncentracích (jednotky procent sušiny, tedy desetiny procenta celkového digestátu). Digestát je také typicky zásaditý, což zvyšuje riziko emise amoniaku, který za vyššího pH v menší míře disociuje a je tedy slaběji vázán v kapalně fázi.

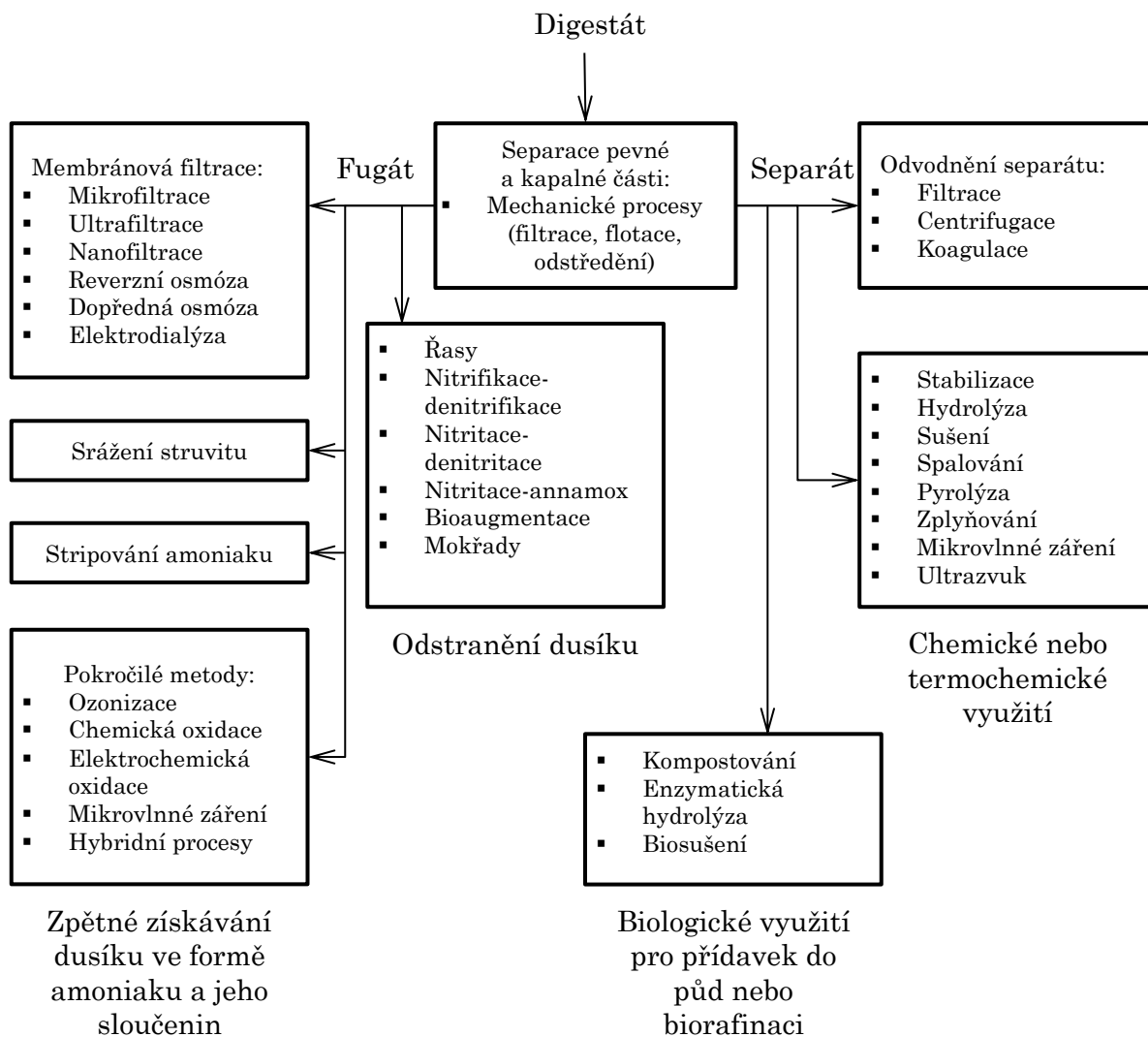
Tab. 4-3 Výsledky analýzy téměř 2000 vzorků digestátu odebraných z bioplynových stanic napříč členskými státy EU v období 2009–2012; převzato z [84].

	Jednotka	Kvantil 10 %	Aritmetický průměr	Kvantil 90 %
Obsah sušiny	hm. %	2,7	5,7	9,1
Organický podíl sušiny	%	55,2	69,3	82,4
Hodnota pH	–	7,5	7,9	8,3
N	% suš.	4,9	10,4	18,1
NH ₄ -N	% suš.	1,6	6,0	12,6
K ₂ O	% suš.	2,2	5,3	8,8
P ₂ O ₅	% suš.	1,9	3,8	5,5
CaO	% suš.	2,1	4,7	8,1
Mg	% suš.	0,3	0,7	1,3
Cr	mg/kg suš.	6,5	15,1	25,9
Cd	mg/kg suš.	0,2	1,4	2,6
Pb	mg/kg suš.	2,1	5,8	9,6
Zn	mg/kg suš.	157,4	311,1	494,0
Cu	mg/kg suš.	34,9	87,5	151,6
Hg	mg/kg suš.	0,0	0,1	0,2

4.3.2 Postupy pro zpracování digestátu

Z obr. 4.1 je zřejmé, že při víceetapové úpravě digestátu je prakticky vždy základním krokem mechanická separace tekuté (fugát) a tuhé (separát) složky. V České republice se nejčastěji jedná o krok jediný.

Separátu bude v dizertační práci věnována omezená pozornost, protože obsahem sušiny je již kvalitativně odpadní vodě relativně vzdálen, zpravidla se již dále nezpracovává a také objemově se jedná o minoritní frakci. Fugát naproti tomu může být zpracováván řadou způsobů (viz obr. 4.1).



Obr. 4.1 Přehled metod úprav digestátu včetně rozdělení dle daného účelu; převzato z [83].

Stručný a ucelený přehled výhod a nevýhod jednotlivých postupů zpracování fugátu poskytuje tab. 4-4. V případě zájmu lze čtenáři doporučit [82], kde autor předložil důkladnější popis zpracování jak fugátu, tak separátu.

Tab. 4-4: Srovnání technologií pro zpracování digestátu.

Postup	Výhody	Nevýhody	Ref.
Přímé využití	+ jednoduchost + minimální náklady na samotné zpracování (mechanická separace)	- značné přepravní náklady - vysoká míra úniku amoniaku při a po aplikaci - omezená aplikační dávka nitrátovou směrnici	[80, 84]
Membránové procesy	+ potenciálně vysoká čistota získané vody + zkoncentrování a malá ztráta hnojivých látek	- relativně vysoké provozní náklady (zejm. na elektřinu) - vysoká míra zanášení a s tím spojené čištění - nutnost předčištění	[80, 83, 85]
Odpařování	+ odolnost vůči pevným podílům + vysoká míra zahuštění + možnost využití odpadního tepla při provozu ve vakuu	- relativně vysoká spotřeba tepla - zatížení destilátu těkavými složkami	[80, 86, 87]
Stripování amoniaku	+ zisk hodnotného produktu (čpavková voda či amonné soli) + odstranění i více než 90 % amoniaku	- zanášení výplně při nasazení na neupravený fugát - citlivost procesu na pH a často nutnost jeho úpravy	[80, 85]
Vysrážení struvitu	+ produktem je hodnotné hnojivo s pomalým uvolňováním + cílí na zisk/konzervaci více výživných látek současně	- obsah látek ve fugátu neodpovídá stechiometrii reakce - vysoká potřeba chemických látek negativně ovlivňující ekonomiku procesu	[80, 83, 85]

4.3.3 Vyvození závěrů pro digestát

V oblasti nakládání digestátu z BPS lze formulovat několik základních cílů při jeho zpracování:

- a) Digestát a ještě více fugát obsahují značný podíl vody, která může být v případě její separace hodnotným koproduktem technologie.
- b) Praktické zkušenosti z projektu REDIGE ukazují, že objemy digestátu kladou vysoké nároky na skladovací kapacity, a to zejména v období dešťů, kdy digestát nelze aplikovat na půdu a chybí odbyt.
- c) S ohledem na klesající přírodní zásoby je nutné hospodárně nakládat s hnojivými látkami.
- d) Musí být omezena emise dusíku při zpracování digestátu a jeho případné aplikaci na zemědělskou půdu.
- e) Je žádoucí taková konzistence digestátu, aby tato nekontaminovala povrchové a podzemní vody.

4.4 Implikace pro návrhovou metodiku

Rešerše v kap. 3 odhalila řadu neprobádaných oblastí modelování a návrhu MVOV/EVOV technologií. Patří sem podrobnější materiálové a energetické bilance odpařovacích procesů aplikovaných na odpadní vody, zohlednění komplexity složení odpadních vod, ověření kompatibility MVOV/EVOV technologií s konkrétními typy odpadních vod, vyšetřování hybridních konfigurací, či důraz na ekonomické a environmentální hodnocení procesu. **V kap. 5 vytvořená a vyvíjená metodika reflektuje většinu těchto živých výzkumných otázek.**

Dva vybrané kapalně odpady – OV z vinařství a digestát z BPS – představují vhodný aplikační prostor. Mají komplexní a **proměnlivé složení s těkavými složkami, cennými pro zpětný zisk – hodnotný ethanol v případě vinařství a hnojivý dusík (ve formě amoniaku) v případě BPS.** Zároveň oba typy provozu mají **vlastní technologickou potřebu vody, kterou lze kompenzovat recyklačními postupy.**

V obou případech se jedná o aktuální a intenzivně řešenou problematiku. Vinařství (zejména malá a střední) se potýká s rostoucím legislativním tlakem, omezenými prostředky na investici do vlastní čistírny odpadních vod a často vysokými poplatky za vypouštění nebo externí zpracování. **Významnou výzkumnou příležitostí je fakt, že cílenému odstraňování těkavého ethanolu jako hlavního přispěvatele organického znečištění OVV se doposud literatura věnovala jen sporadicky.**

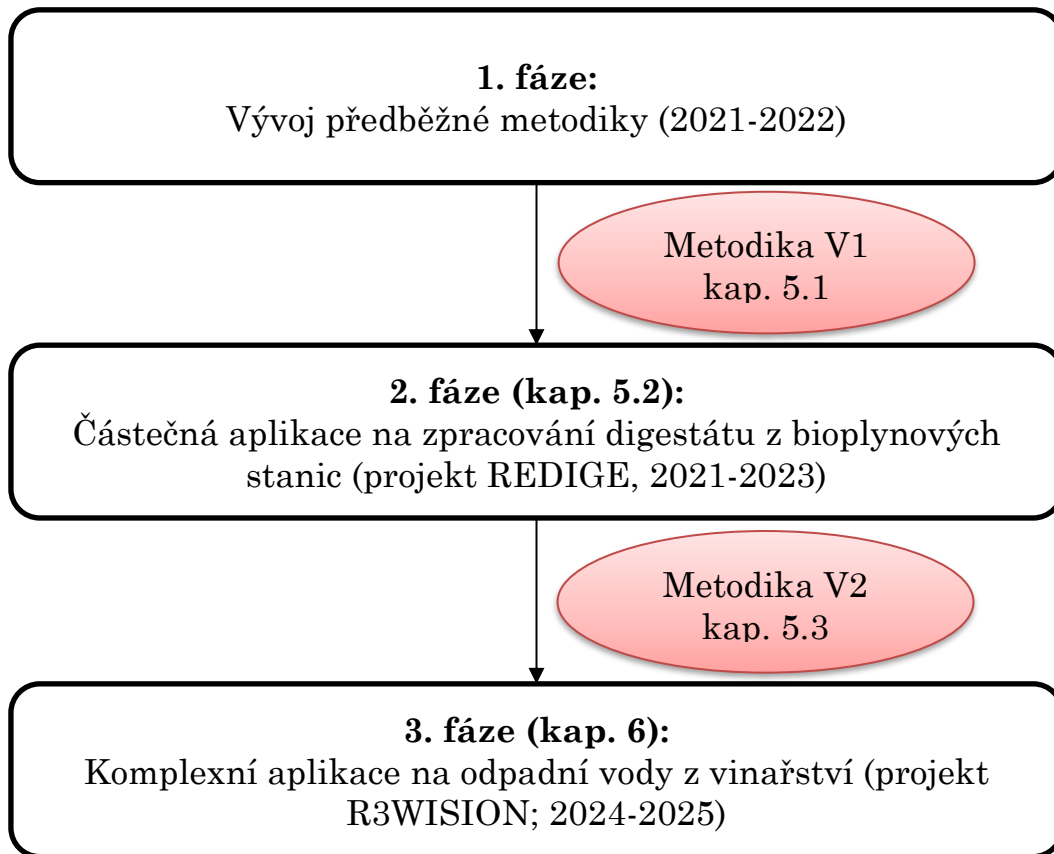
BPS oproti vinařstvím profitují z toho, že digestát lze použít jako hnojivo. Nicméně vysoké přepravní náklady, omezené skladovací kapacity (zejména v období dešťů), nepříznivá konzistence digestátu a profil hnojivých látek činí přímé použití digestátu problematickým. **Nadbytek tepla v BPS proto podporuje nasazení tepelných procesů ke snížení objemu digestátu.**

Kombinace aktivního výzkumu a vývoje, řady omezujících podmínek pro návrh, či přidané hodnoty TEE hodnocení v těchto oblastech: a) **vytváří prostor pro rozvoj metodiky,** b) **přináší příležitost k samostatným vědeckým výstupům.**

5 Vytvoření a vývoj návrhové metodiky

Navrhovaná metodika je jádrem dizertační práce a zároveň hypotézou k ověření správného směřování výzkumu. Zakládá se na zvolených přístupech v kap. 2, rozsáhlé rešerši kap. 3 a autorových znalostech konkrétních odpadních vod ucelených v následující kap. 4.

Vývoj metodiky probíhal ve třech krocích zachycených v obr. 5.1.

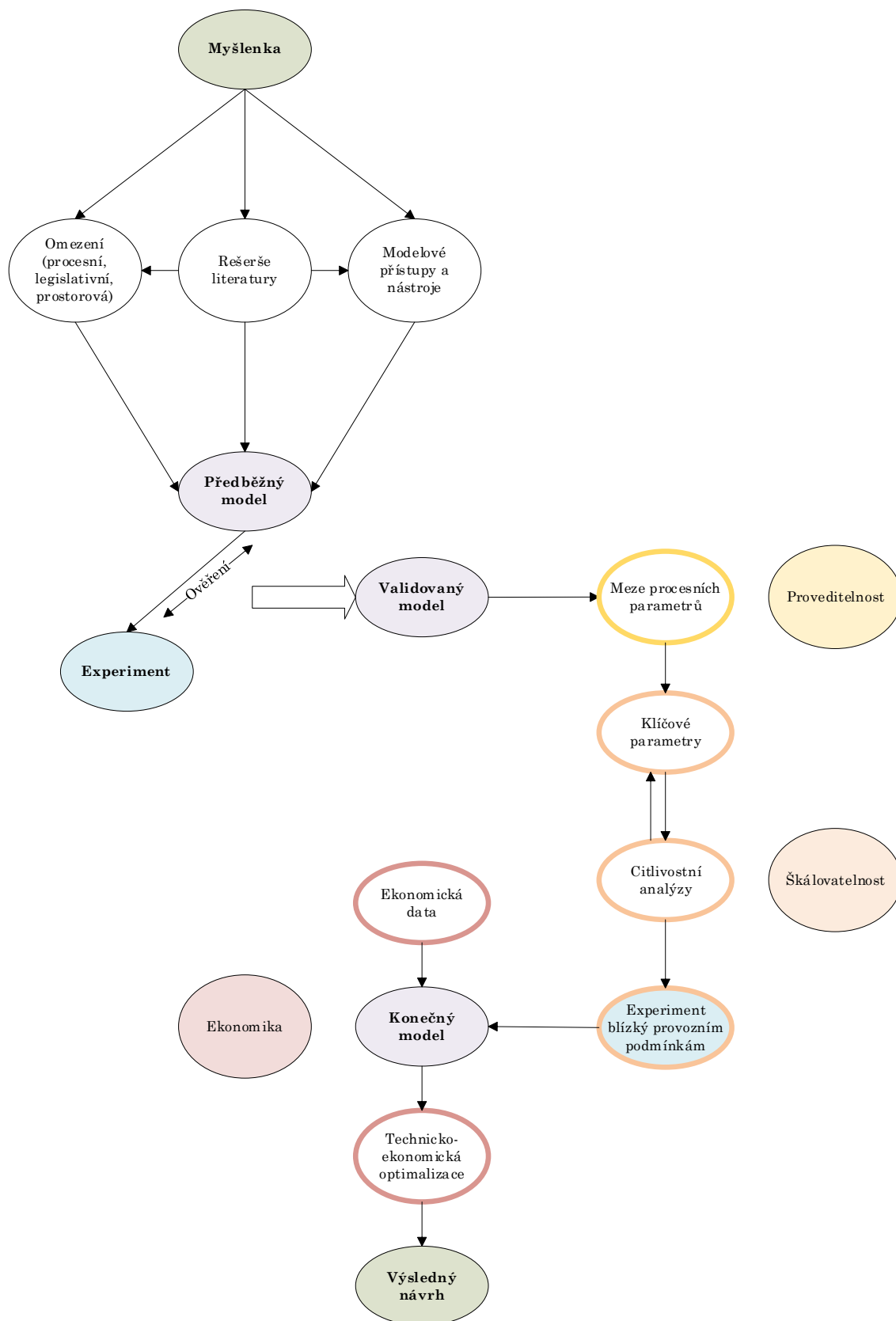


Obr. 5.1 Fáze vývoje návrhové metodiky.

5.1 Obecný rámec

Výchozí bod metodiky je „Myšlenka“ a konečný bod „Výsledný návrh“. Jednotlivé kroky celé metodiky (obr. 5.2) lze shrnout následovně:

1. Sběr dat (kap. 5.1.1) – proces shromažďování informací z literatury, předchozích zkušeností a od zadavatele,
2. Proveditelnost (kap. 5.1.2) – posouzení, zda požadované parametry technologie leží v mezích procesních parametrů („provozní obálce“).
3. Škálovatelnost (kap. 5.1.2) – posouzení, zda je realistické škálování do provozního měřítko zejména s ohledem na existující omezení (legislativní, procesní, prostorová).
4. Ekonomika (kap. 5.1.3) – kvantifikace ekonomických parametrů, jejich optimalizace a posouzení ekonomické konkurenceschopnosti řešení; alternativně může být zváženo jiné kritérium, či více kritérií současně.

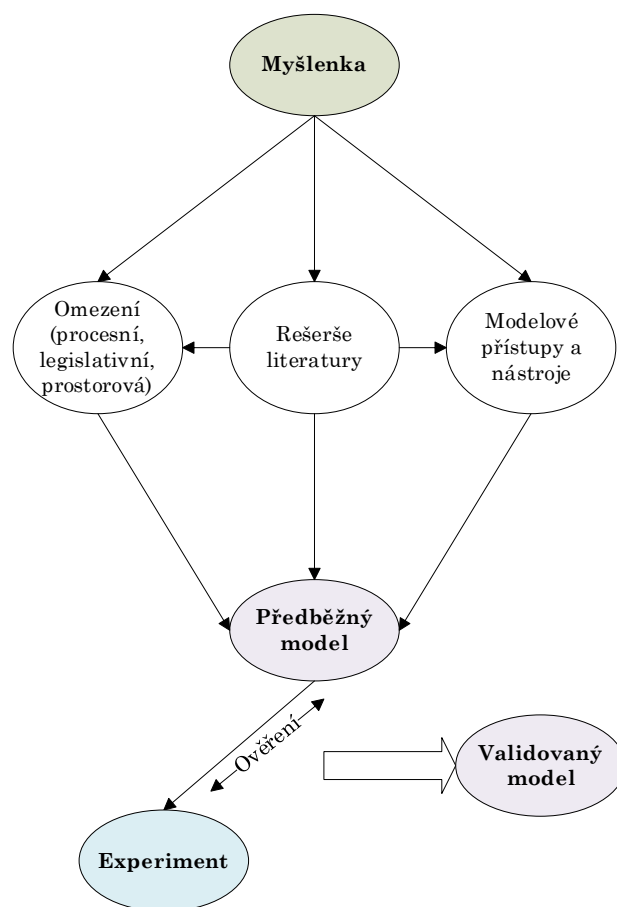


Obr. 5.2 Metodika, která byla předmětem ověření, vylepšení a nasazení na konkrétní případové studii.

5.1.1 Sběr dat

Cílem sběru dat je od prvotní myšlenky vytvořit soubor nástrojů a poznatků popisující věrohodně chování systému a umožňující další fáze návrhu (obr. 5.3). Označení „validovaný model“ tak neznačí nutně jeden model, stejně tak se nemusí jednat o model rigorózní, ale např. soubor empirických pravidel či kombinaci návrhových přístupů s různou mírou zjednodušení (viz obr. 2.3).

Důležitým nástrojem této fáze je rešerše literatury. Ta doplňuje praktické zkušenosti procesního inženýra (např. v minulosti úspěšně nasazené návrhové nástroje) a informace od zadavatele (např. prostorová omezení). Vzniká tak soubor nástrojů a poznatků, jejichž věrohodnost je vhodné – je-li to možné – experimentálně ověřit, případně experiment využít k jejich vylepšení.



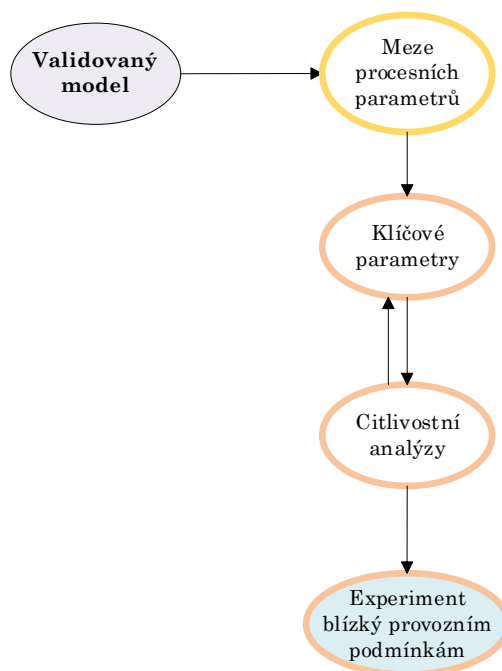
Obr. 5.3 První část metodiky: sběr dat a potvrzení věrohodnosti zvolených návrhových postupů.

Fáze sběru dat je kontinuální záležitost. Kap. 3 a 4 ukazují, že je vhodný postup sběru od obecného (zastřešující téma MVOV/EVOV) ke konkrétnějšímu (oblasti aplikace). Vedle místně specifických dat pro konkrétní provoz, případně reprezentující typický provoz, jsou užitečné i nespécifické nástroje a poznatky. Autor například disponuje nespécifickými rigorózními modely vybraných procesních zařízení využívaných v oblasti EVOV (např. odparka, stripovací kolona), zjednodušenými bilančními modely sestavenými v programovacím jazyce Python a experimentálními daty, které umožňují tvorbu statistických modelů. Byť konkrétní postup správy dat není obsahem této práce, metodika přispívá jak růstu báze znalostí, tak systematizaci poznatků a nástrojů.

5.1.2 Proveditelnost a škálovatelnost

Pojmem *proveditelnost* v rámci představené metodiky se nerozumí kontext obvyklý pro studie proveditelnosti, výrazně se opírající o ekonomickou stránku a tvořící základ pro investiční rozhodnutí. Zásazení v metodice spočívá v použití validovaného modelu ke stanovení provozní obálky (tedy nepřekročitelných hranic procesních proměnných dané technologie z pohledu fyzikální realizovatelnosti, legislativních limitů a jiných omezení) a její porovnání s požadovanými hodnotami. Neexistuje-li mezi těmito množinami průnik, je zapotřebí upravit návrhové parametry nebo uspořádání technologie, případně řešení označit za neproveditelné.

Definice provozní obálky je zpravidla provedena na klíčových parametrech, které plynou ze sběru dat. Základní soubor klíčových proměnných je však možno dále zredukovat, pokud některá z veličin nemá stupeň volnosti (např. závislá proměnná) či má omezený vliv na účelové funkce použité v návrhové optimalizaci (míra recyklace a kvalita odpadní vody, energetické nároky, produkce emisí, ekonomické parametry). Omezený vliv je vhodné posoudit prostřednictvím citlivostních analýz s nízkým počtem vyhodnocených návrhových bodů (např. spodní hranice, střední bod a horní hranice v rámci provozní obálky). Tuto provázanost ukazují obr. 5.4.

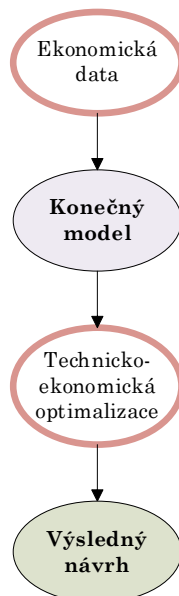


Obr. 5.4 Druhá část metodiky: vymezení provozní obálky, její konfrontace s požadovanými parametry a zkoumání chování systému mj. o různé velikosti.

Posouzení *škálovatelnosti* se rovněž opírá o existence validovaného modelu, který poskytuje popis chování systému za zvýšených kapacit. Předchozím zmenšením souboru klíčových parametrů (dimenzionality) lze zvýšit granularitu citlivostních analýz a prozkoumat provozní obálku s větší mírou detailu, která poskytuje ucelenější informaci pro hodnocení procesu ve větším měřítku a přibližné stanovení provozních podmínek (podmnožina provozní obálky). Není-li to podmíněno výrazným zvětšením laboratorního zařízení, je vhodné provést opakovaný experiment s očekávanými hodnotami klíčových parametrů, zejména pokud se výrazně liší od prvotního experimentu ve fázi sběru dat. Cílem je validovaný model přímo použít v další fázi návrhu, případně provést na základě experimentálních výsledků úpravy vedoucí k jeho zpřesnění.

5.1.3 Ekonomika

Poslední fází je rozšíření modelu o ekonomický rozměr, s využitím aktuálních ekonomických dat (viz obr. 5.5). To umožňuje technicko-ekonomickou optimalizaci (je-li ekonomika hlavním návrhovým kritériem) v rámci dříve definované podmnožiny provozní obálky. Takto nalezené optimum je výsledným návrhem.



Obr. 5.5 Třetí část metodiky: optimalizace a posouzení ekonomiky procesu.

5.1.4 Další kritéria

V rámci metodiky je jako optimalizační hledisko uveden příklad ekonomiky procesu. Kritérií však může být celá řada:

- emise a další aspekty udržitelnosti,
- energetické nároky,
- kvalita vody.

Vedle individuální optimalizace je vhodné vyšetřit také možnosti multikriteriální optimalizace. Zatímco v některých případech může být individuálně nalezené optimum obdobné (např. energetické a ekonomické nároky nezřídka vykazují pozitivní korelaci), jinde je hledání kompromisu kritickou částí rozhodovacího procesu (např. častá protichůdnost udržitelnosti a ekonomiky procesu).

5.2 Prvotní aplikace metodiky: digestát z bioplynových stanic

Počátek vývoje návrhové metodiky v roce 2021 byl úzce propojen s rozvíjejícím se výzkumem v oblasti bioplynových stanic, kde reagoval na potřebu návrhu pilotní jednotky v reálné bioplynové stanici s nutností:

- a) efektivně využít existující znalostní bázi a experimentální výsledky,
- b) vytyčit proveditelnou návrhovou oblast,
- c) posoudit ekonomické a procesní aspekty v této návrhové oblasti,
- d) nalézt návrhový bod pro pilotní jednotku (procesní parametry, uspořádání, základní geometrické rozměry klíčových zařízení),
- e) provést předběžný návrh technického řešení vč. vyčíslení ekonomických parametrů s přesností řádově $\pm 10\text{--}30\%$,

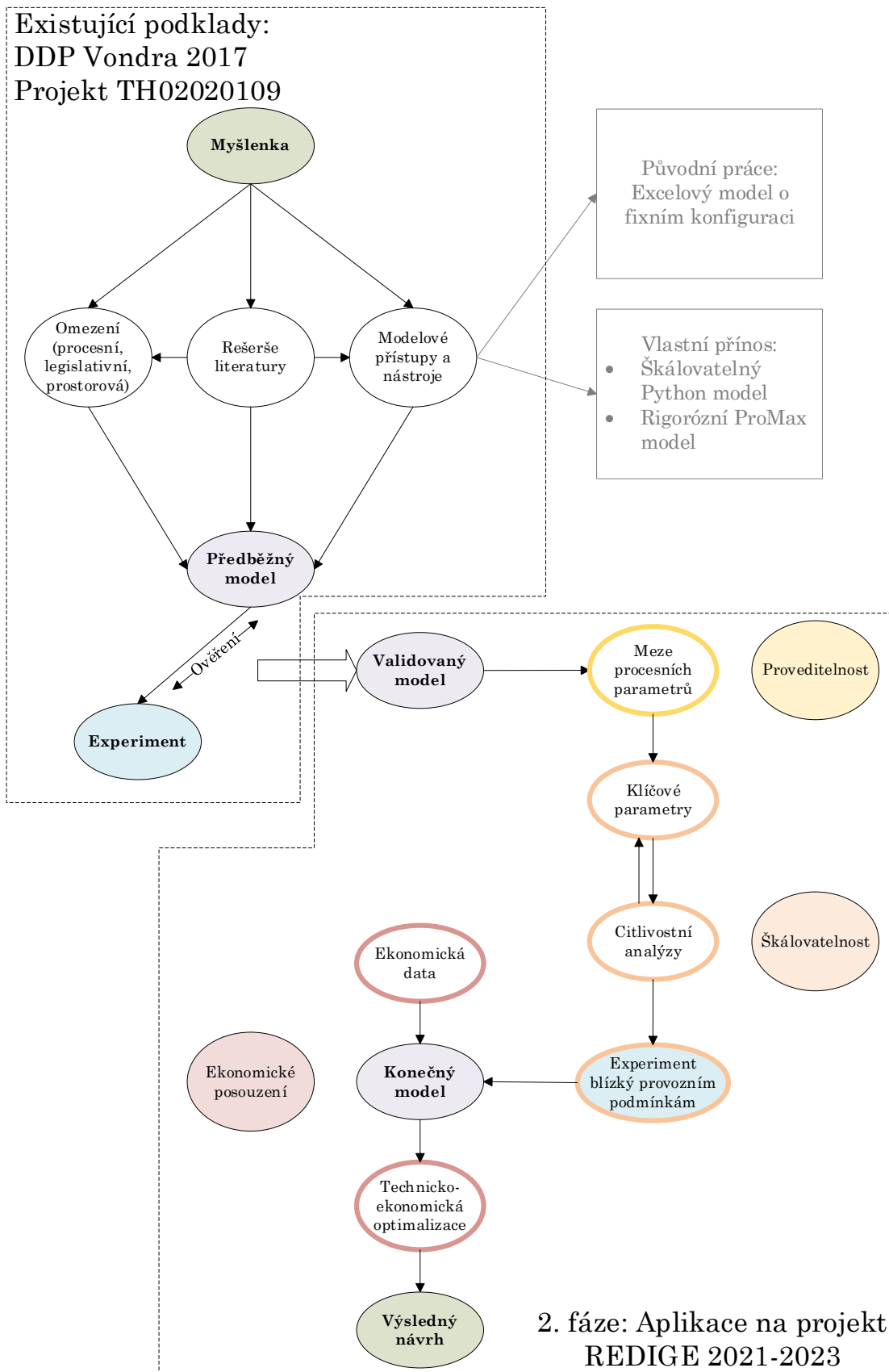
- f) kvantifikovat emisní parametry (zejména zatížení amoniakem ve vyčištěné vodě).

Jak zachycuje obr. 5.6, metodika vznikala na základech již proběhlých činností rešeršního, experimentálního i výpočtového charakteru, mezi které lze jmenovat zejména činnost Mgr. Ing. Marka Vondry, Ph.D. [86, 87]. Vedle toho pod tuto *předchozí práci* spadá i osobní přínos autora v podobě diplomové práce [82], která se věnovala tématu integrace odparů v BPS a technicko-ekonomickému hodnocení, a v rámci níž vznikl škálovatelný Python model (libovolný počet komor a sekcí chlazených vodou).

5.2.1 Časová osa

Časová posloupnost činností projektu REDIGE a jejich souvislost s metodikou je popsána níže. Z důvodu ochrany duševního vlastnictví zde nejsou vyčíslovány konkrétní parametry, ale text se omezuje na metodický popis. Konkrétnímu inovativnímu bodu návrhu s význačnějším osobním přínosem autora se blíže věnuje kap. 7.1.

- Rok 2021:
 - V rámci experimentální činnosti byly provedeny odpařovací a stripovací testy, které potvrdily účelnost navržené procesní konfigurace a výsledky simulací. Vznikl tak **validovaný model** vytvořený v profesionálním simulačním software ProMax.
 - Validovaný model umožnil posouzení variantních řešení pro jednotkovou operaci stripování a identifikaci vhodnějšího řešení stripování parou.
 - Byla definována provozní obálka (**meze procesních parametrů**), tedy oblast, kde lze hledat výsledný návrh a jaké **klíčové parametry** jej ovlivňují. Ukázalo se, že pro tyto účely může být účelné využívat zjednodušené bilanční modely (zde konkrétně sestaveny v MS Excel), za předpokladu, že manipulace parametrů je konzistentní s výsledky rigorózního modelu a experimentů.
 - Tato synergie různých výpočtových nástrojů je v souladu s přístupem metodiky, že „model“ je nikoli individuální entita, ale soubor nástrojů a poznatků.
 - Byla provedena současná **citlivostní analýza a ekonomická rozvaha**, která posloužila ke zúžení návrhové oblasti.
 - (pokračování na str. 49)



Obr. 5.6 Vymezení předchozí práce a relevantních částí, kde byla prvotně nasazována metodika v rámci projektu TAČR FW03010481 (REDIGE).

- Rok 2022:
 - Byla provedena detailnější **technicko-ekonomická rozvaha** s využitím rigorózního modelu (2 varianty).
 - Modelování bylo využito pro inovativní koncept přímé kondenzace brýdových par (viz kap. 7.1). Ve věci tohoto posledního, v té době neověřeného dílčího prvku celkové technologie proběhlo rovněž experimentální ověření. Spolu s předchozími experimenty tak zčásti pokrývá pojem **experiment blízky provozním podmínkám**.
 - Vzniklý **konečný model**, který zohledňuje finální procesní konfiguraci realizované pilotní jednotky, nebyl v tomto konkrétním případě využit k technicko-ekonomické optimalizaci. Důvodem je zejména to, že pilotní či poloprovozní jednotky v rámci výzkumu a vývoje obecně nesměřují k nákladově optimálnímu řešení, ale jsou činěny ústupky směřující k nadstandardnímu sběru dat či širší provozní flexibilitě.
- Roky 2023-2024:
 - Byla zprovozněna pilotní jednotka a zahájen sběr provozních dat. Aktivity dalšího vývoje výpočtových nástrojů nebyly předmětem projektu, nicméně některé pozorované jevy a datové soubory z pilotní jednotky poukazují na potenciál dalšího zlepšení modelovacích přístupů a adaptaci metodiky pro jednotky komerčního charakteru.

5.2.2 Zlepšení metodiky na základě prvotní aplikace

V rámci prvotní aplikace bylo identifikováno několik příležitostí ke zlepšení. Tyto úpravy lze rozdělit do tří kategorií: **a) terminologie** – úprava názvu některých dílčích kroků, **b) posloupnost** – zohlednění faktu, že reálný návrh není ryze lineární, **c) TRL¹³** – bližší upřesnění, pro jakou úroveň vývoje je metodika relevantní.

Tab. 5-1: Navržené úpravy terminologie metodiky.

Dříve	Nově	Důvod
Validovaný model	Validovaný procesní model	V tomto případě je vhodné zdůraznit, že experimentálními daty ověřujeme přesnost predikce procesních jevů a vlastností látek.
Konečný model	Optimalizační model	Optimalizační model obecně nemusí být identický s procesním modelem, naopak využívání výpočtových nástrojů různé složitosti a zaměření je žádoucí.
Experiment blízky provozním podmínkám	Průmyslově relevantní data	Pro tento krok nejsou postačující podmínky ve smyslu např. stavu procesních proudů. Zároveň není nutné, aby se jednalo o samostatný experiment; podstatné jsou naopak úplnost ověření (dílejší části technologie a jejich souhra) a reprezentativní měřítko.

¹³ Angl. Technology Readiness Level = úroveň technologické připravenosti.

Ekonomická data Technicko-ekonomická optimalizace	TEE data TEE optimalizace	TEE ve smyslu <i>Technicko-ekonomicko-environmentální</i> . Tento širší pojem vystihuje, že v rámci TEE optimalizace mohou být s různou vahou zohledňovány jak ekonomické, tak environmentální aspekty.
--	------------------------------	---

V rámci **posloupnosti** se jedná o jednu zásadní změnu, a to opětovné iterace od optimalizačního (dříve konečného) modelu k mezím procesních parametrů, jak je zachyceno dále na obr. 5.7. Aplikace na projektu REDIGE ukázala, že:

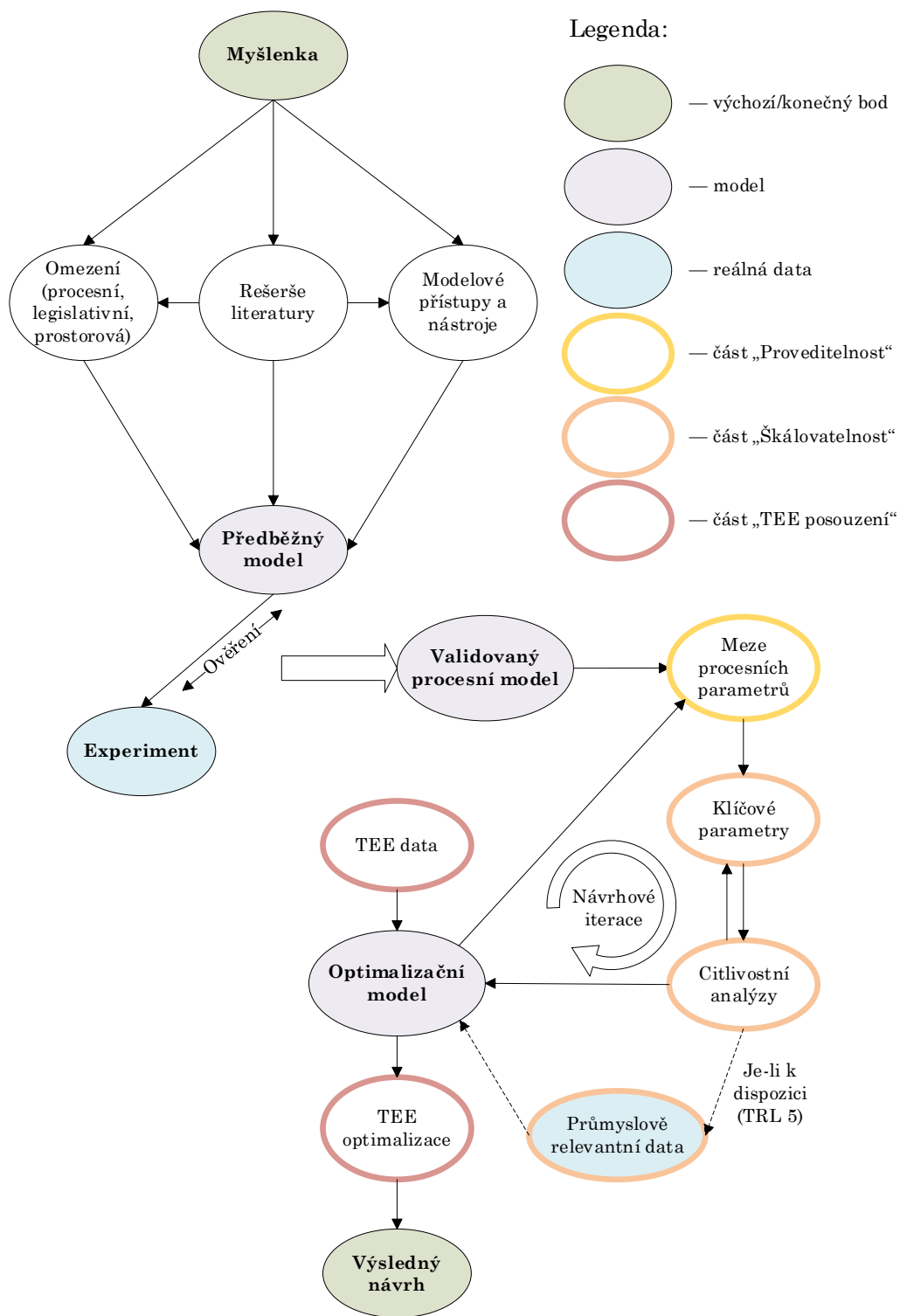
- Návrhovou oblast je vhodné postupně zužovat na základě ekonomických (či environmentálních) dat.
- Škálovatelnost lze predikovat čistě na základě procesních parametrů jen v omezené míře a její posuzování závisí na ekonomických aspektech, stejně jako průmyslově relevantním ověření. Posloupnost v reálném vývoji technologie je spíše následující: předběžná škálovatelnost → TEE posouzení → revidovaná škálovatelnost → průmyslově relevantní jednotka (pilotáž, poloprovoz) → ověřená škálovatelnost.
- Citlivostní analýzy lze s výhodou doplnit o ekonomické parametry a ve vybraných případech mohou být postačující pro identifikaci optimálního návrhového bodu.

Z pohledu **TRL** platí, že metodika cílí na MVOV/EVOV technologie s hypotézou, že se nejedná v kontextu průmyslových odpadních vod o průmyslově připravené jednotky. Metodika tedy v zásadě směřuje na TRL nejvýše 8 (ukončení vývoje) a nereflektuje aktivity spojené s uvedením na trh. Vedle toho dostupnost *Průmyslově relevantních dat* závisí na tom, zda jednotka byla alespoň ověřena či demonstrována v průmyslově relevantním prostředí (TRL 5/6).

5.3 Upravená metodika pro případovou studii

Popsané a zapracované úpravy jsou k vidění na obr. 5.7. Za zmínku stojí vyčlenění části „Průmyslově relevantní data“, které nejsou v metodice striktním krokem, nýbrž volitelným, avšak velmi cenným rozšířením – o jejich zapojení má smysl hovořit rámcově od úrovně TRL 5, kdy už existuje pilotní či poloprovozní jednotka v reálných či věrohodně simulovaných podmínkách. Šipka od Citlivostních analýz k Průmyslově relevantním datům vyjadřuje možnost identifikace slibného provozního bodu pro pilotní či poloprovozní jednotku (ať už nově vznikající, nebo existující).

Jakmile jsou taková data k dispozici, vstupují do optimalizačního modelu dvojím způsobem: a) zpřesňují vstupy pro TEE optimalizaci (např. reálné energetické nebo environmentální ukazatele), b) umožňují vytvářet na datech založené modely či zpřesňovat existující nástroje. Celý proces tak může tvořit vývojové milníky po jednotlivých návrhových iteracích: myšlenka a literární rešerše → pilotní ověření → aktualizace modelu → nové provozní testy a/nebo vývojové úpravy.



Obr. 5.7 Metodika upravená na základě prvotní aplikace.

6 Případová studie: Odpadní vody z vinařství

Případová studie odpovídá struktuře upravené metodiky. **Myšlenka** je formulována v kap. 6.1. **Sběr dat** z dostupné literatury a upřesnění nedostatků plynoucích z komunikace s průmyslovými partnery je k nalezení v kap. 6.2. V rámci kap. 6.3 je jednak upřesněn rozsah experimentálních dat, jednak **validován předběžný model**. Kap. 6.4 ukazuje **adaptaci validovaného modelu na tři komplexní procesní konfigurace** k dalšímu šetření. V případové studii se posouzení proveditelnosti již opírá o TEE aspekty, kap. 6.5 tak obsahuje **integrovaný rámec proveditelnosti a TEE optimalizace**. Predikci **škálovatelnosti** (ve smyslu ekonomických omezení a vlivu na měrné parametry) obsahuje kap. 6.6. Celá případová studie je zakončena výběrem nejperspektivnějším variant v rámci **výsledného návrhu** (kap. 6.7) a shrnutím (kap 6.8).

V rámci případové studie nebyly prováděny opakované návrhové iterace, které lze očekávat na základě **průmyslově relevantních dat** získaných z poloprovozní jednotky (viz dále v kap. 7.2).

6.1 Myšlenka

Myšlenka případové studie vzešla z průmyslové spolupráce a komunikace s vinařskými provozy. **Vinařství se ve věci odpadních vod dostávají pod rostoucí legislativní a ekonomický tlak** již popsany v kap. 4.2. Vzniká tak rostoucí poptávka po čištění OVV přímo ve vinařství – to platí zejména ve vinařstvích, která nejsou připojena ke kanalizaci či obtížně plní limity ukazatelů znečištění kanalizačního řádu. **Konvenční technologie jsou však často prostorově a investičně náročné. Hlavní myšlenku lze shrnout následovně:**

Vyvinout alternativní technologii zpracování odpadních vod z vinařství. Ta musí oproti konvenčním technologiím být kompaktnější, robustnější vůči extrémům a investičně příznivější.

6.2 Sběr dat

Sběr dat je již částečně prezentován v kap. 4.2 a dále čerpá ze zkušeností, poznatků a výsledků získaných v rámci projektů *Posouzení možnosti čištění a recyklace odpadních vod ve vinařském provozu* (ve spolupráci se společností HUTIRA s.r.o., 2021) a *Inovativní technologie pro zpracování odpadních vod z vinařství* (FCH/FSI-J-22-7894, 2022–2023) [79, 88]. Následující dílčí kapitoly (6.2.1–6.2.4) hlouběji popisují řešerši současného stavu poznání a nedostatky stávajících metod čištění OVV. Nicméně řada získaných poznatků či závěry z nich plynoucí jsou k nalezení i v kap. 6.3 a 6.4.

6.2.1 Fyzikálně-chemické metody

Fyzikálně-chemické procesy jsou typicky využívány jako předúprava před aplikací jiných technologií, zejména biologických nebo pokročilých oxidačních procesů. Slouží k odstranění suspendovaných látek, zákalu, přirozeně se vyskytujících organických látek a rozpuštěných anorganických složek [49]. V rámci čištění odpadních vod z vinařství (dále jen OVV) byly úspěšně aplikovány fyzikálně-chemické technologie, zahrnující koagulaci/flokulaci, elektrokoagulaci, chemickou precipitaci a sedimentaci [49]. Na základě údajů v tabulce 1 je zřejmé, že tyto technologie jsou účinné zejména při odstraňování suspendovaných látek, zákalu a těžkých kovů.

Účinnost odstranění organických látek je však bez kombinace s dalšími technologiemi nedostatečná.

6.2.2 Pokročilé oxidační metody

Pokročilé oxidační procesy (zkr. POP) jsou charakteristické využitím silných oxidačních činidel schopných rozkládat biologicky obtížně rozložitelné sloučeniny, které nelze účinně odstranit konvenčními biologickými metodami. Mezi tyto látky ve OVV patří např. polyfenoly, tříslloviny nebo ligniny. Komplexní přehled POP využívaných pro úpravu OVV, včetně ozonace, Fentonova a foto-Fentonova procesu, fotokatalytické oxidace a elektrochemické oxidace, uvádí práce [56].

Jorge et al. (2021) prokázali, že kombinace ozonace s koagulací-flokulací-dekantací dosahuje účinnosti odstranění CHSK a polyfenolů ve výši 66 %, resp. 96 % [66]. Fentonova a foto-Fentonova oxidace, které využívají H_2O_2 jako oxidační činidlo, železnaté ionty (Fe^{2+}) jako katalyzátor a pro foto-Fentonovu variantu UV-C záření ke zvýšení tvorby hydroxylových radikálů ($\cdot\text{OH}$), vykazují slibné výsledky. Kombinace Fentonovy oxidace a dlouhodobého provzdušňovaného skladování vedla ke snížení CHSK až o 93 % [67]. Foto-Fentonova oxidace, realizovaná jak s využitím přirozeného, tak umělého záření, dosahuje snížení CHSK až o 80 % [70, 71].

Odborná literatura shrnutá naznačuje, že POP představují perspektivní metody čištění OVV, zejména pokud jsou kombinovány s biologickými nebo fyzikálně-chemickými procesy. Je však třeba poznamenat, že většina popsanych aplikací POP se nachází ve fázi laboratorních nebo pilotních testů a dosud nedošlo k jejich širokému zavedení do praxe.

6.2.3 Biologické metody

Biologické procesy lze rozdělit na aerobní a anaerobní, podle potřeby přístupu kyslíku. Tyto metody představují environmentálně šetrný přístup s vysokou účinností odstraňování organického znečištění a patří mezi dlouhodobě etablované technologie. V literatuře jsou pro vinařské provozy popsány různé varianty biologického čištění, např. aerobní laguny, bioreaktory s mikro-bublinnou aerací, cirkulační reaktory s aktivovaným kalem, anaerobní reaktor s fluidním ložem či anaerobní rotační bioreaktor [49, 51, 55]. V praxi se však nejčastěji využívají konvenční aktivační procesy, sekvenční šaržové reaktory (SBR), provzdušňované laguny a umělé mokřady.

Aerobní procesy

Aerobní procesy vyžadují přítomnost kyslíku, který umožňuje rozklad organické hmoty prostřednictvím aerobních mikroorganismů. Obecně vykazují vyšší účinnost odstraňování CHSK než procesy anaerobní. Na druhé straně jsou energeticky náročnější kvůli nutnosti aerace a produkují větší množství kalu [49, 51]. Konvenční aktivace kalu může v rámci čištění OVV dosahovat až 98% účinnosti odstranění CHSK [49].

Technologie SBR (sekvenční vsádkový reaktor) je vhodná zejména pro malé a střední vinařství díky menší prostorové náročnosti a nižším investičním a provozním nákladům oproti jiným aerobním technologiím. Účinnost odstranění CHSK se zde pohybuje mezi 85–99 % [51].

Membránové bioreaktory (MBR) kombinují biologické a membránové procesy, což umožňuje aplikaci vyšších organických zatížení než u technologií SBR nebo

konvenční aktivovaný kal [51]. Deklarovaná účinnost odstranění CHSK může dosahovat až 99 % [73].

Anaerobní procesy

Anaerobní procesy probíhají za nepřítomnosti kyslíku a jsou zajišťovány odlišnými skupinami mikroorganismů než v případě procesů aerobních. V jejich průběhu dochází k tvorbě bioplynu, který může být dále využit k energetickému zhodnocení. Výhodou anaerobních metod oproti aerobním je nižší provozní náročnost díky absenci aerace a nižší produkce kalu [51]. Naopak mezi nevýhody patří delší doba hydraulické zdržnosti a nižší účinnost odstranění znečištění, což často vyžaduje následnou doupravu. Ruíz et al. (2002) uvádějí, že pomocí anaerobního SBR lze dosáhnout účinnosti odstranění rozpustné CHSK až 98 % [74]. Sigge et al. (2005) testovali aplikaci technologie UASB pro OVV a dosáhli účinnosti až 90 % [75]. Přestože odborná literatura popisuje možnosti využití anaerobních metod pro úpravu OVV, v praxi se tyto technologie zatím běžně nevyužívají.

Umělé mokřady

Umělé mokřady představují pozemní způsob úpravy odpadních vod, běžně využívaný malými vinařstvími [47]. Mezi jejich výhody patří nízké provozní a energetické náklady, spolehlivá účinnost při nižších koncentracích znečištění a schopnost zvládat kolísající přítoky. Na druhé straně vyžadují značnou prostorovou náročnost, dlouhou dobu hydraulického zdržení a předúpravu pro odstranění usaditelných látek. Komplexní přehled aplikací umělých mokřadů pro OVV podává studie [57]. Bylo zjištěno, že při nízkém organickém zatížení (do 50 g_{CHSK}/m².d) je možné dosáhnout průměrné účinnosti odstranění CHSK okolo 90 %. Při vyšším zatížení (600 g_{CHSK}/m².d) účinnost klesá na 60 %.

6.2.4 Stávající nedostatky přístupů k čištění a upřesnění myšlenky

Z provedeného přehledu v kap. 4.2.2 a kap. 6.2.1–6.2.3 vyplývá, že v současnosti jsou nejčastěji využívanými metodami čištění OVV aerobní biologické procesy a umělé mokřady. Tyto technologie však vykazují několik významných omezení. Hlavním nedostatkem je jejich omezená schopnost dosáhnout takové kvality vody, která by umožňovala její opětovné využití. Implementace recyklace vody ve vinařstvích by přitom mohla významně zmírnit jejich environmentální dopady, podpořit hospodaření s vodou – zejména v regionech ohrožených suchem, včetně hlavních vinařských oblastí jižní Evropy – a přinést i ekonomické úspory.

Dalším problémem je nízká flexibilita těchto metod vzhledem k sezónním změnám charakteru odpadních vod, což může vést k nedostatečné kvalitě vyčištěné vody. Tyto technologie rovněž nejsou schopny zpětně získávat specifické složky, jako je ethanol, jehož separace by mohla vinařstvím přinést dodatečný zisk. V neposlední řadě mohou být investiční a provozní náklady, stejně jako prostorová náročnost těchto řešení, limitujícím faktorem, zejména pro malé a střední producenty.

V návaznosti na dílčí výzkum [79], který prokázal, že cílené předčištění zaměřené na těkavé složky zvyšuje celkovou účinnost, tato studie hodnotí tři samostatné konfigurace a dále hybridní sekvenci kombinující odpařování a stripování. V současné literatuře rovněž chybí modelovací a optimalizační přístup přizpůsobený specifikům odstraňování ethanolu v rámci úpravy OVV. Tato studie se proto snaží tuto neprobádanou oblast zaplnit prostřednictvím komplexní analýzy, jejímž cílem je identifikace robustní, kompaktní a nákladově efektivní technologie vhodné pro čištění OVV. Hodnocení jsou provedena pro Českou republiku, odkud pochází většina

vstupních dat, a pro Itálii jakožto největšího producenta vína na světě. Tento univerzální přístup zajišťuje širší relevanci výsledků s ohledem na rozdílné geografické a ekonomické podmínky. Zároveň je provedeno TEE posouzení technologie cílicí na ethanol, čímž studie přináší cenné poznatky pro oblast nakládání s odpadními vodami z vinařství.

Těmito postupy identifikovat účelově orientovanou, robustní, kompaktní a ekonomicky efektivní technologii pro úpravu OVV. Tato studie navrhuje přístup zaměřený na separaci ethanolu, založený na technologiích odpařování a stripování vzduchem, podpořený multikriteriálními optimalizačními rámci.

6.3 Validace předběžného modelu

V souladu s metodikou po úvodní fázi sběru dat **další aktivity směřovaly k rozšiřování souboru nástrojů a poznatků vedoucí na věrohodný popis chování systému a umožňující další fáze návrhu.** Z velké části čerpá ze starších experimentálních dat z 5 odpařovacích testů (mezi únorem 2021 a listopadem 2022) a 5 stripovacích testů (mezi květnem 2021 a listopadem 2022).

6.3.1 Modelovací přístup

Procesní simulace je provedena s využitím modelů vytvořených v profesionálním simulačním softwaru ProMax [89]. Přesnost predikcí je ověřena laboratorními experimenty v reprezentativních měřících, a to jak pro odpařování, tak pro stripování vzduchem (podrobnosti o experimentálních jednotkách jsou uvedeny v tab. 6-1). Porovnání s laboratorními daty zároveň přispělo k lepšímu rozhodování při volbě modelovacích přístupů.

Tab. 6-1 Experimentální jednotky pro ověření modelu.

Operace	Parametr	Hodnota
Odpařování	Typ jednotky	Vícestupňová mžiková odparka
	Provozní režim	Vsádková
	Jmenovitý tepelný výkon	40 kW
	Minimální tlak	7 kPa(a)
	Max. produkce destilátu	80 kg/h
Stripování vzduchem	Typ kolony	Výplňová
	Provozní režim	Průtočný
	Maximální průtok vzduchu	4,5 Nm ³ /h
	Maximální teplota vzduchu	50 °C
	Výška kolony	700 mm
	Průměr kolony	100 mm
	Typ výplně (materiál)	Sedla Intalox 13 mm (keramika)

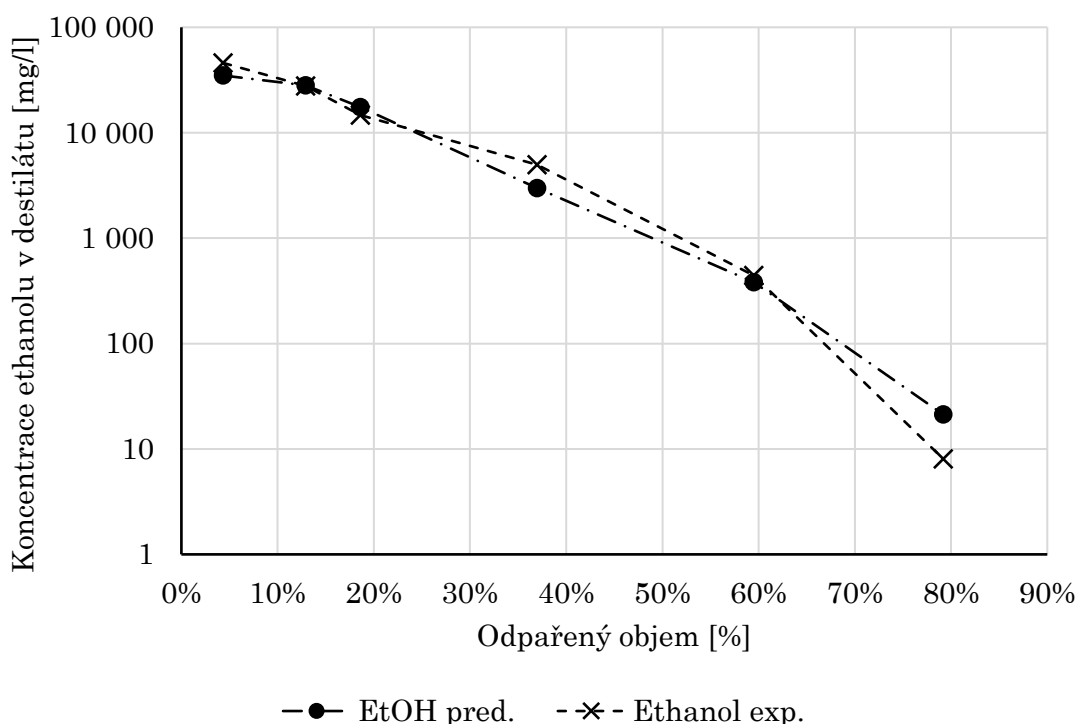
Termodynamický model použitý ve všech scénářích vychází ze zásadní proprietární modifikace modelu Pitzer-Debye-Hückel [90], která je v ProMaxu označena jako „Electrolytic ELR“ (Extended Long Range) a slouží pro popis kapalné fáze. Pro plynnou fázi je využita stavová rovnice Peng-Robinson. Chování kolon s výplní je predikováno pomocí nerovnovážného přístupu, při němž je přestup hmoty a tepla

mezi kapalnou a plynnou fází určován na základě korelací zabudovaných v softwaru ProMax. Ve scénáři C je použita korelace Billet-Schultes [91], neboť vykazuje velmi dobrou shodu s experimentálními daty. U scénářů A a B je v části zahrnující rektifikaci použita korelace podle Ondy [92], která je konzervativnější a kompenzuje absenci experimentálních dat v dané části procesu.

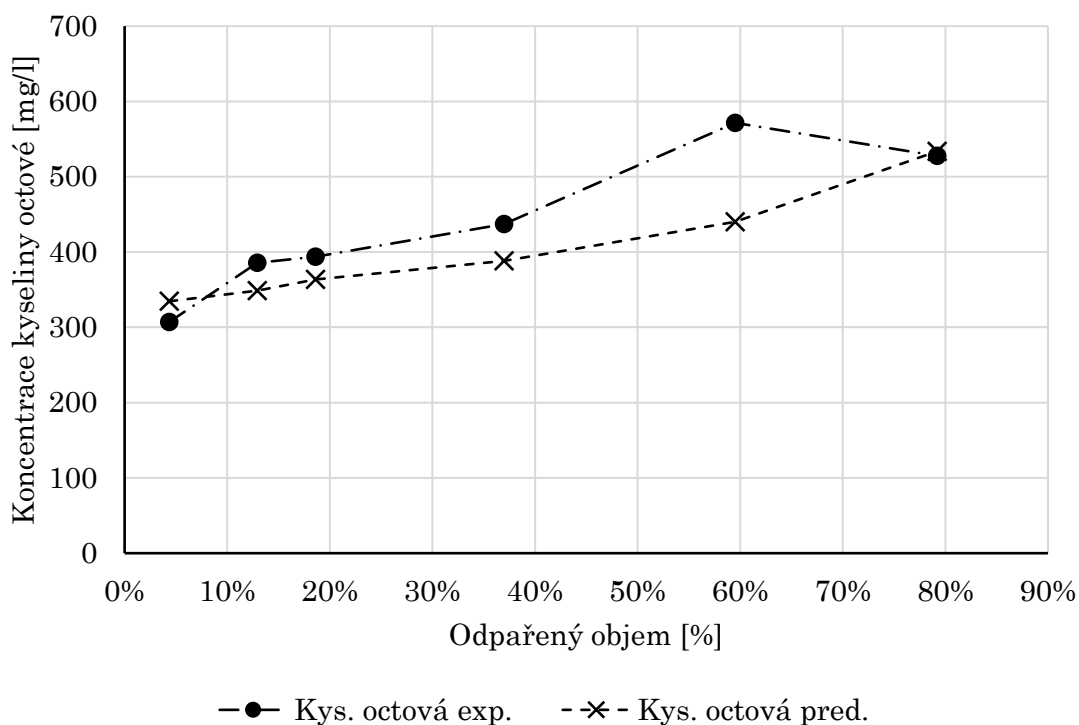
6.3.2 Validace modelu

Tato část se věnuje validaci modelů pro dva klíčové procesy, které tvoří základ jednotlivých scénářů: odpařování a stripování. Tyto procesy byly realizovány na experimentálních jednotkách, jejichž parametry jsou uvedeny výše.

Experiment odpařování byl proveden vsádkově s využitím reálné odpadní vody. Tato voda vykazovala extrémní úroveň celkového znečištění (CHSK 19 531 mg/l) a vzhledem k delšímu skladování měla vyšší poměr kyseliny octové (1 062 mg/l) vůči ethanolu (6 050 mg/l). Tato skutečnost byla výhodná, protože vyšší koncentrace polutantů v destilátu umožnily provést validaci modelu s vyšší mírou průkaznosti. Výsledky jsou prezentovány na obr. 6.1 a obr. 6.2.



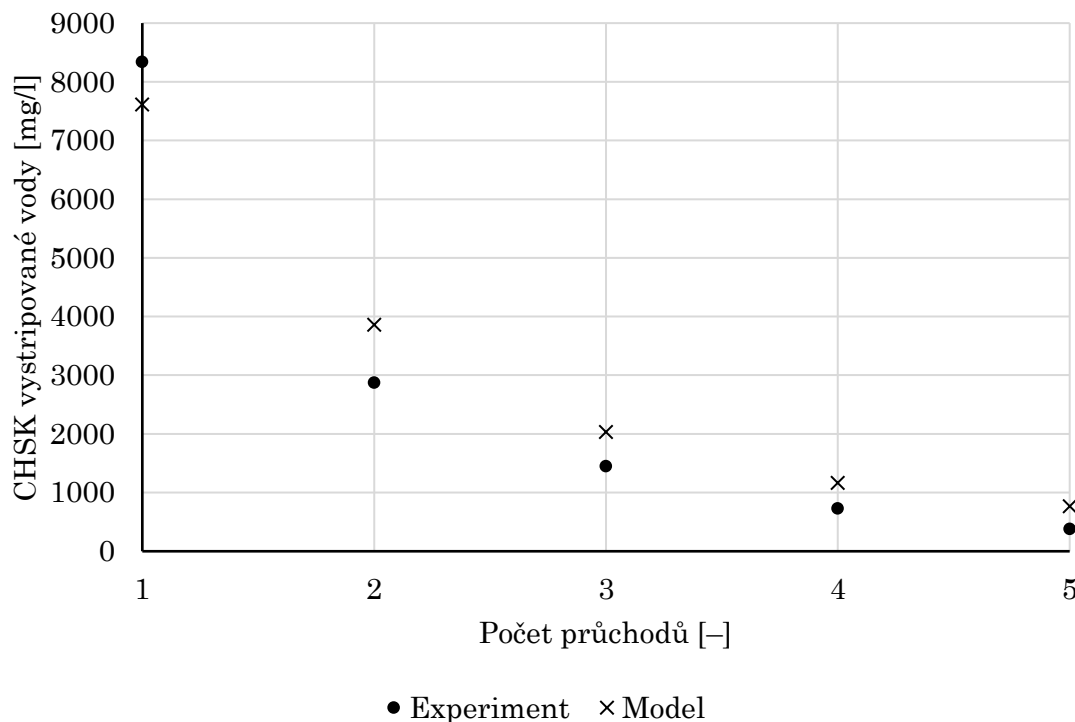
Obr. 6.1 Srovnání naměřené a predikované koncentrace ethanolu v destilátu při různé míře odpaření (experiment z 20. 5. 2021).



Obr. 6.2 Srovnání naměřené a predikované koncentrace kyseliny octové v destilátu při různé míře odpaření (experiment z 20. 5. 2021).

Obecně lze konstatovat, že **shoda mezi modelem a experimentem je relativně dobrá**. V případě ethanolu je klíčovým aspektem soulad celkové bilance v destilátu. Lze pozorovat, že **absolutní chyba výrazně klesá s nižšími koncentracemi ethanolu v destilátu**, tedy v oblasti, která je relevantní z hlediska splnění specifikací výstupních proudů (ať už pro opětovné využití, nebo vypouštění do povrchových vod).

Pokud se týká validace **stripovacího kroku**, experimenty byly v rozmezí května až srpna 2021 několikrát opakovány se změnami v průtoku vzduchu i jeho teploty [93]. Výsledné srovnání uvedené na obr. 6.3 ukazuje **konzervativní povahu finálně zvoleného modelu**, neboť obecně predikuje vyšší hodnoty CHSK ve srovnání s experimentálními daty. V relevantním rozsahu (CHSK v nižších tisících mg/l) model predikuje hodnoty přibližně o **30–50 % vyšší**.



Obr. 6.3 Srovnání naměřené a predikované CHSK vyčištěné vody po opakovaných průchodech stripovací kolony (experiment z 11. 8. 2021).

Za určitý **nedostatek této validace** je nutné považovat skutečnost, že použitý experimentální vzorek pocházel z destilace v rámci předchozího kroku evaporace a obsahoval **prakticky pouze ethanol a kyselinu octovou**, přičemž počáteční CHSK činila 15 125,3 mg/l.

6.4 Validovaný model a procesní konfigurace

Validované modely jednotkových operací odpařování a stripování byly dále rozšířeny do podoby tří scénářů – procesních konfigurací. Ve všech třech případech je cílem odstranění nebo zpětné získání ethanolu z vinařských odpadních vod, snížení jejich kontaminace a potenciální přeměna na hodnotné produkty. Tři procesní jednotky, adaptované pro aplikaci v rámci zpracování vinařských odpadních vod, jsou následující:

- Vícestupňová odparka s mechanickou kompresí par (Scénář A: MEE-MVC),
- Vícestupňová mžiková odparka (Scénář B: MSF),
- Vzduchová stripovací kolona (Scénář C: AS).

Výběr jednotlivých jednotek byl proveden na základě klíčových provozních charakteristik: MEE-MVC je známý nízkou měrnou spotřebou energie, MSF vyniká robustností, jednoduchostí a provozní spolehlivostí a AS představuje energeticky nenáročnou variantu pro odstranění těkavých organických látek.

Společné okrajové podmínky pro všechny tři scénáře jsou uvedeny v tab. 6-2. Tyto hodnoty vycházejí ze tří reálných vzorků vinařských odpadních vod odebraných ve dvou vinařstvích v České republice (Jihomoravský kraj), přičemž koncentrace cukrů byla navýšena a koncentrace kyseliny octové snížena na základě devíti vzorků uvedených ve studii [61].

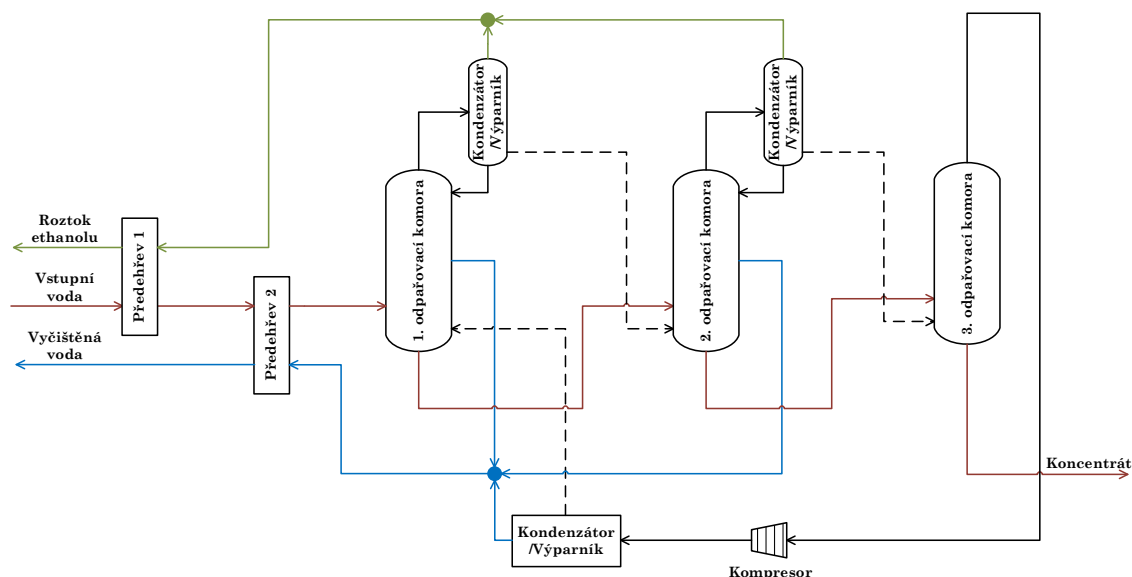
Tab. 6-2 Návrhové složení odpadní vody.

Parametr	Hodnota
Průtok	1 m ³ /h
Teplota	20 °C
Tlak	1,01325 bar
CHSK	8 252 mg/l
Ethanol	3 000 mg/l
Kyselina octová	100 mg/l
Cukry ¹⁴	2 000 mg/l
Poměr CHSK k teoretické spotřebě kyslíku (TSK) [94]	0,97
TSK ethanolu [95]	2,09 g/g
TSK cukrů a kyseliny octové [95]	1,07 g/g

6.4.1 Scénář A: MEE-MVC

Navržený systém MEE-MVC je schematicky znázorněn na obr. 6.4. Systém se skládá ze tří odpařovacích stupňů; druhý a třetí stupeň využívají páru z předchozí odpařovací komory jako zdroj tepla, čímž dochází ke zlepšení energetické účinnosti celého procesu. Za účelem zajištění dostatečného teplotního spádu mezi kondenzující parou a vařící odpadní vodou je tlak v každém následujícím stupni nižší.

Pára z poslední komory je vedena do kompresoru, kde dochází ke zvýšení její teploty a tlaku na úroveň umožňující její opětovné využití jako topného média v první komoře. Pro další zvýšení energetické účinnosti procesu je surový vstupní proud přehříván využitím proudů ethanolu a vyčištěné vody.

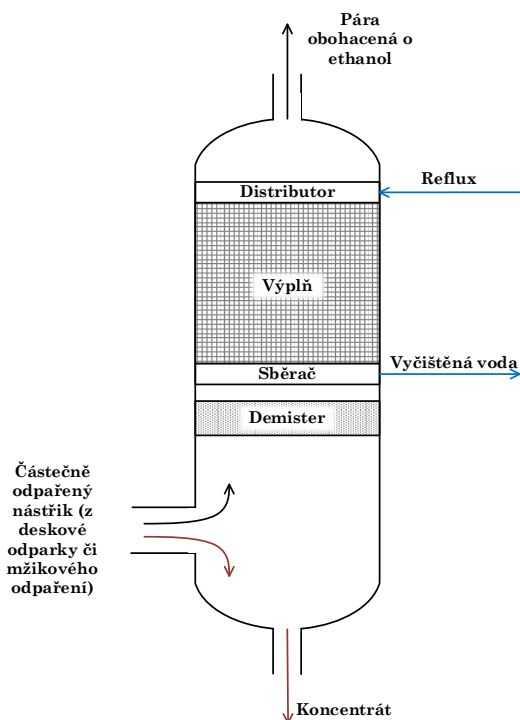


Obr. 6.4 Zjednodušené schéma navrženého víceetapového odpařování s mechanickou kompresí par (MEE-MVC).

Koncentrace ethanolu v parní fázi se v každém následujícím stupni výrazně snižuje, což činí pouze první dva stupně vhodné pro zpětné získávání ethanolu. Samotná

¹⁴ Je uvažováno ekvimolární množství glukózy a fruktózy.

separace ethanolu je zajištěna úpravou odpařovací komory pro rektifikaci, která je použita ve scénáři A i B a je znázorněna na obr. 6.5. Tato úprava rozděluje komoru na dvě části – spodní odpařovací sekci a horní rektifikační sekci. Horní část obsahuje náplň, kde dochází ke kontaktu par s refluxem z parciálního kondenzátoru, čímž dochází ke zvýšení koncentrace ethanolu v parní fázi, současně však klesá kontaminace kapalné fáze.



Obr. 6.5 Rektifikační modifikace odpařovacích komor za účelem separace ethanolu a vody.

Souhrn provozních parametrů a modelovacích předpokladů je uveden v následující tabulce. Většina hodnot vychází z praktických zkušeností autorů s provozem odpařovacích systémů. Některé parametry byly stanoveny pomocí heuristické optimalizace typu pokus–omyl v rámci simulačního modelu (označeno A) nebo jsou předmětem systematického zkoumání v uvedeném rozsahu (označeno B). Celková strategie modelování a optimalizace je detailně rozvedena v kapitole 6.5.3.

Tab. 6-3 Scénář A: Procesní parametry a výchozí předpoklady pro modelování.

	Parametr	Hodnota
	Počet	3
	Tlak v první komoře ¹⁵	0,15-0,40 bar(a)
Komory	Návrhová rychlost páry v komorách	5 m/s
	Výška výplně v rektifikační modifikaci ¹⁶	2 m
	Typ výplně ¹⁶	Sulzer NeXRing™ #0.7 metal

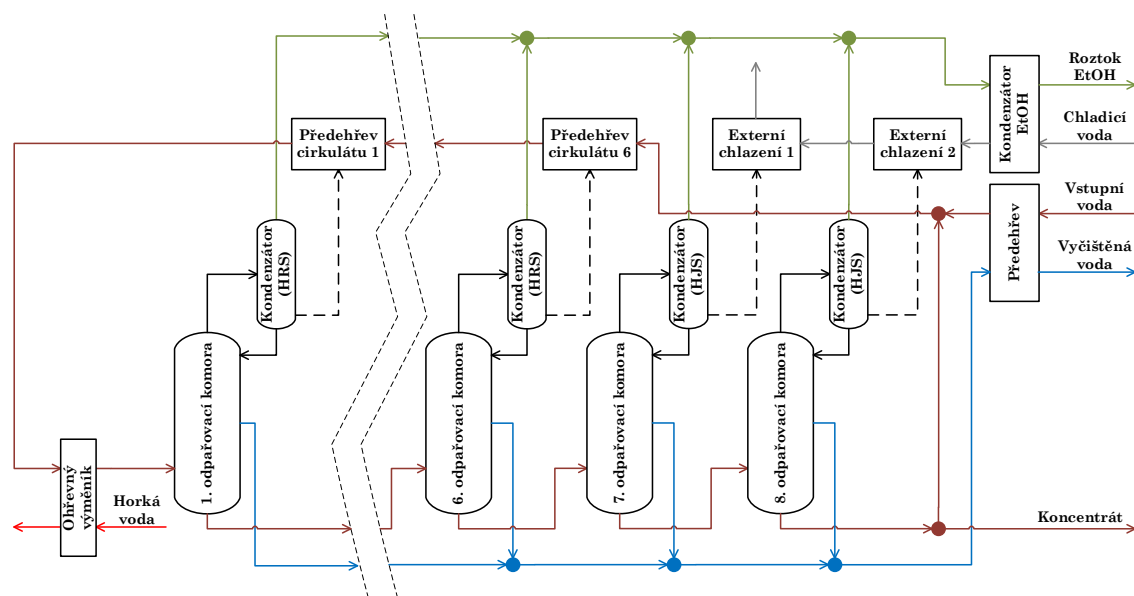
¹⁵ Parametry jsou předmětem systematického zkoumání v uvedeném rozsahu (viz kap. 6.5.3 a 6.5.6).

¹⁶ Parametry byly stanoveny pomocí heuristické optimalizace typu pokus–omyl v rámci simulačního modelu

	Přídavná výška na separaci kapek a demister	1 m
Kompresor	Maximální výstupní teplota	200 °C
	Polytropická účinnost	75 %
	Typ kompresoru	Šroubový
Výměníky tepla	Typ výměníku	Deskový
	Minimální teplotní příblžení ¹⁵	3-5 °C
	Návrhová tlaková ztráta	0,02 bar
	Součinitel prostupu tepla – předehřev 1	1 800 W/(m ² · K)
	Součinitel prostupu tepla – předehřev 2	1 700 W/(m ² · K)
Čerpadla	Součinitel prostupu tepla – odpařování	2 000 W/(m ² · K)
	Typ čerpadel	Radiální odstředivé
	Celková účinnost	50 %
Celkové	Konečná redukce objemu	95 %

6.4.2 Scénář B: MSF

Vícetupňová mžiková odparka (MSF), prezentovaná ve Scénáři B, je znázorněna na obr. 6.6. Přestože je počet stupňů předmětem optimalizace, obecně bývá vyšší než u běžných vícetupňových odparek (MEE) [96]. Kapalina vstupující do první komory má vyšší teplotu než rovnovážná teplota při daném tlaku, což vede k mžikovému výparu (tzv. flash). Poklesy tlaku mezi jednotlivými komorami odpovídají snižování rovnovážných teplot, čímž je zajištěno, že v každé komoře dojde k výparu. Aby bylo dosaženo obdobné intenzity výparu v jednotlivých komorách, udržují se obvykle konstantní teplotní rozdíly. Vzhledem k nelineární závislosti mezi rovnovážnou teplotou a tlakem nejsou tlakové poklesy v jednotlivých komorách rovnoměrné.



Obr. 6.6 Zjednodušené schéma navržené vícetupňové mžikové odparky (MSF).

Systém MSF obecně neumožňuje dosahovat vysokých koncentračních faktorů v průtočné konfiguraci, a proto je do návrhu zahrnuta vnitřní recirkulace. Po přehřevu vyčištěnou vodou se napájecí proud mísí s recirkulovaným proudem. Recirkulovaný proud je následně přehříván částečnou kondenzací par, čímž dochází k rekuperaci tepla a zvýšení účinnosti systému. Tyto kondenzátory se označují jako sekce pro rekuperaci tepla (HRS, z angl. Heat Recovery Sections) a jejich počet je zpravidla menší než počet komor. Pokud by počet HRS odpovídal počtu sekcí, muselo by v poslední komoře docházet ke kondenzaci s využitím kapaliny o teplotě rovné rovnovážné teplotě brýdové páry, což jsou z pohledu přenosu tepla nereálné podmínky. Výsledkem je nutnost zařazení sekce pro odvod tepla (HJS, z angl. Heat Rejection Section), kde je využito vnějšího chlazení k dosažení požadovaných teplotních rozdílů v kondenzačních sekcích. Přehled klíčových parametrů pro Scénář B je uveden v následující tabulce a dále rozveden, včetně nakládání s nimi, v 6.5.4.

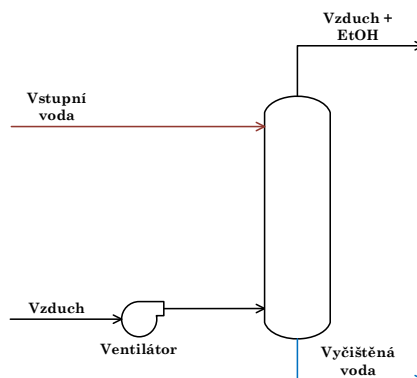
Tab. 6-4 Scénář B: Procesní parametry a výchozí předpoklady pro modelování.

	Parametr	Hodnota
Komory	Počet	až 8
	Návrhová rychlost páry v komorách	5 m/s
	Výška výplně v rektifikační modifikaci	1,5 m
	Typ výplně	Sulzer NeXRing™ #0.7 metal
	Přídavná výška na separaci kapek a demister	1 m
Ohřev a chlazení	Teplota horké vody	90 °C
	Teplota chladicí vody	30 °C
Výměníky tepla	Typ výměníku	Deskový
	Návrhová tlaková ztráta kondenzátorů	0,1 bar
	Návrhová tlaková ztráta ohřevného výměníku	0,3 bar
	Součinitel prostupu tepla – ohřevný výměník	1 800 W/(m ² ·K)
	Součinitel prostupu tepla – HRS	1 700 W/(m ² ·K)
	Součinitel prostupu tepla – HJS	1 000 W/(m ² ·K)
Čerpadla	Typ čerpadel	Radiální odstředivé
	Celková účinnost	50 %
Celkové	Konečná redukce objemu	95 %

6.4.3 Scénář C: Vzduchová stripovací kolona

Třetím analyzovaným případem je Scénář C, který představuje relativně jednoduchý systém vzduchové stripovací kolony (AS, z angl. Air Stripper). Odpadní voda je uváděna do kontaktu se vzduchem jakožto stripovacím plynem v protiproudé koloně. Dostatečný průtok vzduchu je zajištěn ventilátorem, který vhání vzduch do spodních částí kolony, jak ukazuje obr. 6.7. V průběhu kontaktu vzduch postupně získává

těkavé složky obsažené ve vodě, především ethanol, a opouští horní část kolony jako vzduch obohacený o ethanol. Vyčištěná voda opouští patu kolony a je z větší části zbavena kontaminantů.



Obr. 6.7 Zjednodušené schéma navržené vzduchové stripovací kolony.

Komplexita systému je nižší než ve scénářích A a B; zároveň je však méně svázán omezujícími podmínkami, což vede k širšímu rozsahu procesních parametrů a větší provozní obálce, jak ukazuje následující tabulka.

Tab. 6-5 Scénář C: Procesní parametry a výchozí předpoklady pro modelování.

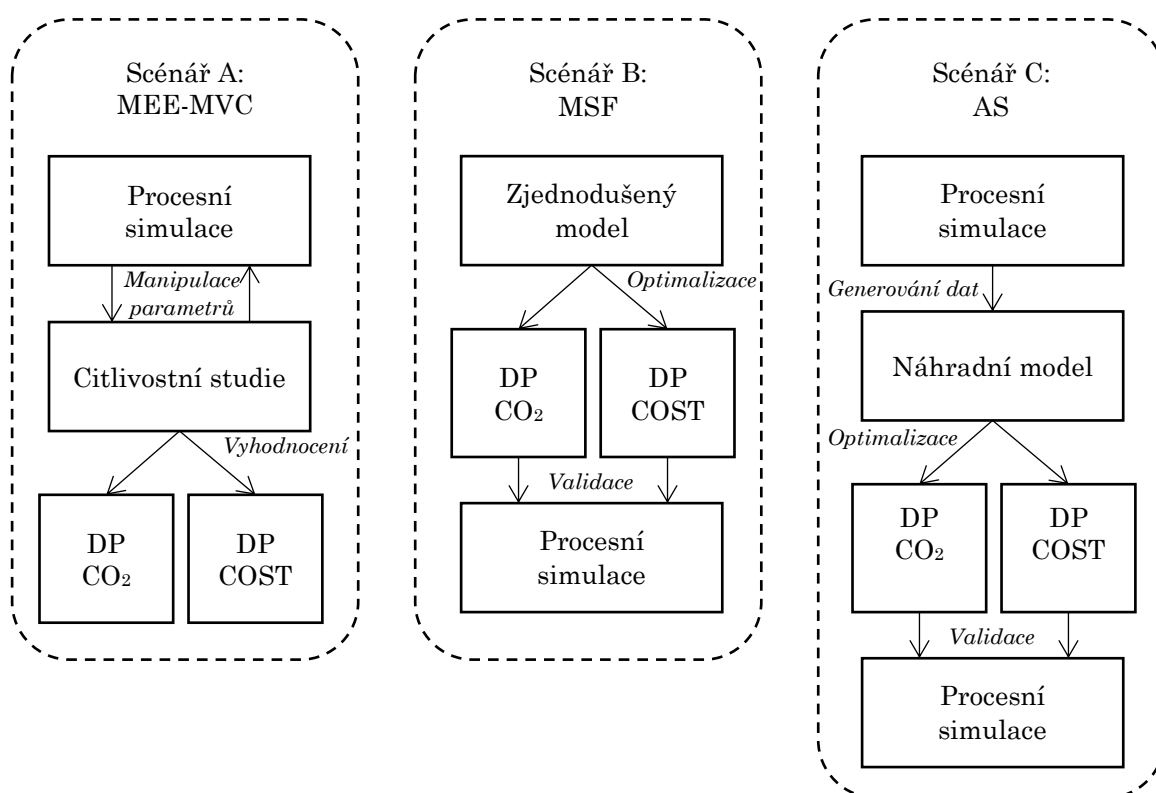
	Parametr	Hodnota
Kolona	Výška výplně	4–10 m
	Typ výplně	Sulzer NeXRing™ #1,5 metal
	Přídavná výška na separaci kapek a demister	1 m
Vzduch	Poměr vůči kapalně fázi	4000–10000 Nm ³ /m ³
	Teplota	10–50 °C
Ventilátor	Typ ventilátoru	Radiální s rovnými lopatkami
	Polytropická účinnost	70 %
Napájecí čerpadlo	Typ čerpadla	Radiální odstředivé
	Celková účinnost	50 %

6.5 Proveditelnost a technicko-ekonomicko-environmentální optimalizace

Tato dílčí kapitola popisuje celkový pracovní postup a výsledky vyhodnocení proveditelnosti a TEE optimalizace jednotlivých procesních scénářů. Zahrnuje obecný přehled (kap. 6.5.1), společné účelové funkce pro tři scénáře (kap. 6.5.2), podrobný popis na míru šitých postupů pro každý scénář (kap. 6.5.3 až 6.5.5) včetně zdůvodnění zvoleného optimalizačního přístupu. V kap. 6.5.6 až 6.5.8 následují výsledky poskytující hluboký vhled do charakteru nalezených optim a procesních aspektů.

6.5.1 Strategie postupu

Úvodní přehled (viz obr. 6.8) poskytuje zjednodušené shrnutí rozdílů mezi jednotlivými scénáři, které jsou dále rozpracovány v příslušných podkapitolách. **Scénář A** představuje systém s výrazně omezeným prostorem možných návrhů, a proto je použití citlivostní analýzy postačující pro prozkoumání návrhové oblasti, vyhodnocení účelových funkcí a nalezení přijatelných řešení. **Scénář B** je naopak charakterizován vyšší komplexitou a dlouhými výpočetními časy při použití procesní simulace; z tohoto důvodu se využívá zjednodušený model umožňující efektivní hledání optim v časově úsporném režimu, přičemž samotná simulace slouží k ověření přesnosti zjednodušeného modelu a k predikci jevů, které nejsou v tomto modelu zahrnuty. **Scénář C** se zabývá jednotkou, jejíž konstrukční parametry lze měnit v širokém rozsahu; z tohoto důvodu je výhodné využít náhradní model pro prozkoumání návrhové domény, nalezení optimálních bodů návrhu a ověření jejich platnosti pomocí původního modelu.



Obr. 6.8 Přehled rozdílů v metodickém postupu pro jednotlivé scénáře; DP je označení pro návrhový bod (z angl. Design Point).

6.5.2 Účelové funkce

Ve všech třech scénářích se typicky uvažují tři odlišné návrhové body, odvozené na základě příslušných účelových funkcí (viz obr. 6.8), a to:

- **Návrhový bod CO₂ (DP CO₂)** – založený na účelové funkci provozních emisí CO₂, které jsou určeny nepřímo na základě energetické náročnosti systému,
- **Návrhový bod COST (DP COST)** – využívající účelovou funkci kombinující provozní a investiční náklady technologie při daných návrhových parametrech,

- **Kompromisní bod (Trade-off)** – vycházející z konceptu *kompozitního ukazatele vhodnosti řešení* (angl. composite desirability), která slouží jako jednotné kritérium umožňující vyvážené hodnocení kompromisu mezi environmentální udržitelností a ekonomickou efektivností. Tato funkce se vypočítává jako geometrický průměr *dílčích ukazatelů vhodnosti* (angl. individual desirability) pro emise CO₂ a náklady. Přístup normalizuje obě účelové funkce na společnou škálu, kde hodnota 1 představuje nejpříznivější (minimální) výsledek a hodnota 0 nejméně žádoucí (maximální) výstup pro každé z jednotlivých kritérií.

Ve vybraných případech byly analyzována i další optima, např. kompromis mezi investičními náklady a emisemi CO₂ či minimalizace investičních nákladů jako samostatné kritérium. Tyto varianty jsou podrobněji rozpracovány v kapitole věnované výsledkům.

Každá účelová funkce je dále vyhodnocena zvlášť pro Českou republiku – jakožto zemi, v níž byla získána většina vstupních dat – a pro Itálii, jakožto největšího světového producenta vína. **Účelová funkce pro DP CO₂ je definována následovně:**

$$m_{CO_2,ann} = (P_{S,i}EF_{el,j} + \dot{Q}_{S,i}EF_{h,j}) \cdot AOH, \quad (6-1)$$

kde $m_{CO_2,ann}$ (kg/rok) představují roční emise CO₂, $EF_{el,j}$ and $EF_{h,j}$ (kg CO₂/kWh) jsou emisní faktory v zemi j (ČR nebo Itálie) pro výrobu elektřiny a tepla, $P_{S,i}$ (kW) je elektrický příkon Scénáře i , $\dot{Q}_{S,i}$ (kW) je potřeba tepla Scénáře i a AOH (h/rok) je roční fond pracovní doby.

Účelová funkce DP COST zahrnuje dvě hlavní složky: **investiční náklady**, vypočtené podle rovnic (6-3) až (6-7), a **provozní náklady**, dané rovnicí (6-8). Obě složky jsou převedeny na roční ekvivalent celkových nákladů C_A (EUR/rok) [18]:

$$C_A = C + i_{\min}C_{TCI}, \quad (6-2)$$

kde C (EUR/rok) jsou roční provozní náklady vypočtené rovnicí (6-8), i_{\min} (–) je požadovaná výnosnost and C_{TCI} (EUR) jsou celkové kapitálové investiční náklady, vypočtené následovně [97]:

$$C_{TCI} = (1 + c_{ins} + c_{ic} + c_{pip} + c_{el}) \sum_{i=1}^n PE_i, \quad (6-3)$$

kde c_{ins} , c_{ic} , c_{pip} , c_{el} (–) jsou podíly ceny dodaného zařízení na instalaci, měření a regulace, potrubní rozvody a elektrické systémy, PE_i (EUR) je cena klíčového zařízení dané kategorie i , určená následující lineární rovnicí pro většinu procesního vybavení (výjimky jsou uvedeny v tab. 6-6):

$$PE_i = a_i \sum_{j=1}^{n_i} EV_{i,j} + n_i b_i, \quad (6-4)$$

kde i je indexy kategorie zařízení a j index jednotlivých zařízení v rámci kategorie, a_i, b_i jsou lineární koeficienty pro kategorii i , a $EV_{i,j}$ je proměnná zařízení j (angl. equipment variable) v rámci kategorie i dle specifikace v tab. 6-6.

Tab. 6-6 Koeficienty pro výpočet ceny klíčového zařízení různých kategorií.

Kategorie	a [EUR/EV]	EV (proměnná zařízení)	b [EUR/unit]	Poznámka
Výměníky tepla	310	m ² teplosměnné plochy	1 220	
Čerpadla	460	kW el. příkonu	110	Autorská databáze založená na reálných obchodních nabídkách a nakoupeném zařízení
Procesní nádoby	30	kg oceli	3 230	
Demistery	4 030	m ² průřezu	–	
Distributory	9 680	m ² průřezu	–	
Výplň	7 930	m ³ výplně	–	
Vývěva	3 140	m ³ /h vstupního proudu	–	
Chladicí věž	40	kW chladicího výkonu	–	
Kompresor	N/A	kW příkonu	N/A	rov. (6-5)
Ventilátor	N/A	ft ³ /min reálného objemového průtoku	N/A	rov. (6-6)

Cena **kompresoru** ve scénáři A je stanovena pomocí empirické korelace pro šroubové kompresory v rozsahu 10 až 750 hp dle [18] upravené na metrické jednotky, odlišnou měnu a aktualizovaný index CE = 791 (CEPCI, říjen 2023):

$$C_{comp} = 6069,2P^{0,7243}, \quad (6-5)$$

kde C_{comp} (EUR) je cena kompresoru a P (kW) je jeho příkon.

Druhým typem zařízení nezahrnutým v databázi autorů je **radiální ventilátor s rovnými lopatkami** použitý ve scénáři C. Jeho cena byla stanovena rovnicí z [18] upravenou dle měny a inflace stejně jako u kompresoru:

$$C_{fan} = 1.283F_H e^{12,1667 - 1,6407 \cdot \ln(Q) + 0,1139 \cdot \ln^2 Q}, \quad (6-6)$$

where C_{fan} (EUR) je cena ventilátoru, Q (ft³/min) je objemový průtok vzduchu a F_H (–) je koeficient výtlačné výšky H (inH₂O). Tento koeficient byl aproximován kvadratickou rovnicí (nahrazující původní skokovou funkci v [18]) tak, aby se předešlo nespojitostem:

$$F_H = -4,3088 \cdot 10^{-4}H^2 + 3,0106 \cdot 10^{-2}H + 0,9935. \quad (6-7)$$

Poslední člen účelové funkce dle rovnice (6-2), roční provozní náklady, jsou stanoveny takto:

$$C = (P_{S,i}c_{el,j} + \dot{Q}_{S,i}c_{h,j}) \cdot AOH, \quad (6-8)$$

kde C (EUR/rok) jsou roční provozní náklady, $c_{el,j}$ and $c_{h,j}$ (EUR/kWh) jsou jednotkové ceny elektřiny a tepla v dané zemi j (ČR nebo Itálie), $P_{S,i}$ (kW) je elektrický příkon Scénáře i , $\dot{Q}_{S,i}$ (kW) je potřeba tepla Scénáře i , and AOH (h/rok) je roční fond pracovní doby

Přehled emisních faktorů, jednotkových cen a dalších relevantních hodnot pro kvantifikaci účelových funkcí je prezentován v následující tabulce.

Tab. 6-7 Hodnoty vstupních proměnných pro účelové funkce (jednotkové ceny jsou z roku 2022, emisní faktor elektřiny z roku 2021; emisní faktor tepla je považován za invariantní vzhledem k použití zemního plynu)

Účelová funkce	Parametr	Hodnota		Jednotka	Reference
		ČR	Itálie		
DP CO ₂	Emisní faktor elektřiny $EF_{el,j}$	0,544	0,284	kg/kWh	[98]
	Emisní faktor tepla $EF_{h,j}$	0,202		kg/kWh	[99]
DP COST	Jednotková cena elektřiny $c_{el,j}$	0,1607	0,28055	EUR/kWh	[100]
	Jednotková cena tepla $c_{h,j}$	0,0667	0,0841	EUR/kWh	[101]
	Požadovaná výnosnost i_{\min}		0,2	–	[18]
	Koef. instalace c_{ins}		0,47	–	
	Koef. měření a regulace c_{ic}		0,36	–	[97]
	Koef. potrubí c_{pip}		0,68	–	
	Koef. elektroinstalace c_{el}		0,11	–	

Tyto obecné postupy a výpočty jsou použity napříč všemi třemi scénáři, jejichž pracovní postup je podrobně rozpracován v následujících dílčích kapitolách.

6.5.3 Optimalizace Scénáře A

Scénář A lze charakterizovat jako komplexní nelineární systém s nízkou dimenzionalitou a krátkou výpočetní dobou modelu. U těchto systémů je po stanovení mezí proměnných systému analýza citlivosti i optimalizace relativně přímočará [102]. Mezi běžně využívané přístupy v tomto kontextu patří metoda Monte Carlo a Morrisova metoda citlivostní analýzy. Ačkoli tyto techniky nemusí být z hlediska výpočetní efektivity nejvhodnější pro systémy s nízkou dimenzionalitou, umožňují hlubší porozumění chování systému a stanovení optimálních parametrů.

V rámci dostupné literatury Sin et al. aplikovali globální citlivostní analýzu za účelem stanovení priorit zdrojů nejistot a kvantifikace jejich vlivu na výkonnost čistírny odpadních vod pomocí Monte Carlo simulace, čímž došlo ke zjednodušení návrhového procesu ČOV [103]. Obdobně Król et al. provedli citlivostní analýzu pomocí Morrisovy metody s cílem identifikovat klíčové parametry ovlivňující provoz městské čistírny odpadních vod, přičemž zohlednili nelineární charakter systému a přispěli k optimalizaci řízení procesu [104].

Přestože charakteristiky navrhovaného systému MEE-MVC se částečně odlišují od konvenčních systémů pro čištění odpadních vod, použitelnost uvedených přístupů z literatury zůstává relevantní. Vzhledem k deterministickému charakteru simulace procesu a jeho vstupních parametrů je použita Morrisova citlivostní analýza.

V modelu jsou tlaky ve druhé a třetí komoře určovány na základě zvoleného *minimálního teplotního rozdílu při odpařování* (tj. teplotní přiblížení mezi kondenzující párou a vařící kapalinou v navazující komoře). Tato řídicí proměnná ΔT_{SA} je považován za identický ve všech třech komorách, čímž se jednoznačně určují příslušné tlaky na základě vypočtených fázových rovnováh pára-kapalina. Výsledkem je, že pouze *tlak v první komoře* představuje další stupeň volnosti systému, označený jako $p_{SA,ch1}$. ΔT_{SA} se v rámci optimalizace pohybuje v rozsahu 3–5 K, v případě $p_{SA,ch1}$ je zkoumaný rozsah 0,10–0,40 bar(a)

Minimalizace účelových funkcí DP COST and DP CO₂ je omezena dvěma praktickými restrikcemi. První omezení se týká výstupní teploty z kompresoru, která je udržována pod 200 °C z důvodu prevence samovznícení mazacího oleje [105]. Druhé omezení se vztahuje na minimální tlak v systému (vyskytující se v poslední komoře), který je udržován nad 0,10 bar(a) z důvodu eliminace provozu v hlubokém vakuu, jenž by přinášel dodatečné technologické komplikace. Návrhové konfigurace nesplňující tato omezení jsou vyloučeny jako technicky nerealizovatelné.

Parametry byly analyzovány ve dvou krocích: počáteční hrubý vzorek pro prozkoumání návrhového prostoru (18 vzorků) a následně zpřesněné vzorkování v okolí bodů zájmu identifikovaných v první fázi, tedy celkem 31 vzorků. Tyto vzorky byly vyhodnoceny pomocí nástroje pro citlivostní analýzu (Scenario Tool®) v softwaru ProMax, odpovídající principiálně Morrisově metodě.

6.5.4 Optimalizace Scénáře B

S ohledem na historický význam a rozšířenost použití mžikového odpařování existuje množství know-how a porozumění jejím principům jak ve vědecké, tak v inženýrské komunitě. To umožňuje proces zobecnění pro modelování relativně složitých jevů a systémů [106]. Tato efektivní míra abstrakce významně zjednodušuje proces návrhu a následné optimalizace. Vhodně koncipovaný rámec, kombinující zjednodušený model pro účely počátečního návrhu zařízení, odhadů provozních a investičních nákladů a optimalizace, s následným využitím rigorózních

komerčních simulačních nástrojů (Aspen HYSYS, ProMax či MATLAB Simulink), představuje synergický přístup umožňující jak rychlé nalezení návrhového bodu, tak důkladnou validaci výsledků [107].

Jako příklad lze uvést studii proveditelnosti, kterou provedl Helal a jejímž cílem bylo navýšení výkonu MSF zařízení používaného v odsolovacích systémech. Studie vycházela ze zjednodušeného matematického modelu, dříve vytvořeného autory Al-Mutazem a Solimanem [108, 109]. Optimalizace byla provedena v prostředí MS Excel za využití vestavěného Řešitele pro maximalizaci výkonnosti jednotky. Výsledný optimalizovaný model byl následně porovnán s rigorózním matematickým modelem a vykazoval pouze minimální odchylky. V jiném případě použili Onishi et al. zjednodušený matematický model MSF pro účely odhadu celkových ročních nákladů. Finální konfigurace systému byla následně simulována v prostředí Aspen HYSYS; rozdíl mezi návrhovými a simulovanými parametry nepřesáhl 4 % [33].

V rámci této práce byl vytvořen na míru šitý zjednodušený model, založený na know-how a postupech abstrakce, jenž efektivně kvantifikuje všechny klíčové parametry související s materiálovou a energetickou bilancí, stejně jako ekonomickými parametry. Výsledkem těchto kvantifikací je stanovení optimálního počtu komor, počtu HJS a teplot na vstupu a výstupu odparky – tedy základních procesních parametrů daného systému. Výsledky potvrzující adekvátnost těchto zjednodušení, založené na srovnání s rigorózním modelem, což je ukázáno v kapitole 6.5.7. Podrobný soubor rovnic reprezentujících zjednodušený model je uveden v Příloze.

Mezi hlavní zjednodušení patří:

1. Vliv dalších složek rozpuštěných ve vodě na fázovou rovnováhu pára-kapalina je považován v obvyklých rozsazích za nevýrazný. Toto zjednodušení bylo ověřeno srovnáním s rigorózním modelem, které prokázalo, že separace těchto složek nemá významný dopad na materiálovou a energetickou bilanci.
2. Měrné skupenské teplo a měrná tepelná kapacita jsou považovány za konstantní, nezávislé na teplotě a tlaku.
3. Rovnovážné tlaky tudíž nejsou v rámci modelu predikovány ani považovány za relevantní.
4. V tepelných výměnících je předpokládán ideální protiproudý tok a logaritmický teplotní rozdíl, což při porovnání s použitím efektivního středního teplotního rozdílu v rigorózním modelu vede k minimálním odchylkám.

Zjednodušený model je implementován v prostředí MS Excel, přičemž optimalizace je prováděna pomocí vestavěného Řešitele pro tři cílové funkce s omezujícími podmínkami v tab. 6-8. Použito je nastavení pro evoluční algoritmus (EA), neboť se jedná o problém optimalizace typu Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP).

Tab. 6-8 Přehled omezení pro optimalizaci v rámci zjednodušeného modelu.

$30 \leq T_{in} \leq \min(100, T_{HW,in})$	Teploty v rozmezí 30–100 °C odpovídají rovnovážným tlakům v rozsahu hrubého; další omezení zajišťují klesající teplotní profil v systému MSF a vylučují teplotní překřížení s chladicí nebo ohřevnou vodou.
$\max(30, T_{CW,in}) \leq T_{out} \leq \min(100, T_{in})$	

$\{HJS, CH\} \in \mathbb{Z}; 1 \leq HJS \leq CH \leq 8$	Celkový počet komor a sekcí pro odvod tepla musí být kladná celá čísla menší nebo rovna 8.
$\Delta T_{HRSn,hot} \geq 2.5; \Delta T_{CW,min} \geq 2.5$	Minimální teplotní přiblížení v kondenzátorech musí být větší nebo roven 2,5 °C.
$\Delta T_{LM,HRSn} \geq 3; \Delta T_{LM,HW} \geq 3; \Delta T_{LM,CW} \geq 3$	Střední logaritmičtý teplotní rozdíl v kondenzátorech a ohřevném výměníku musí být větší nebo roven 3 °C.

Obecným výchozím předpokladem pro použití zjednodušeného modelu je potřeba rychlého vyhledání optimální konfigurace v rámci složitého MINLP problému, jehož plná integrace s rigorózním modelem v prostředí ProMax by byla prakticky obtížně proveditelná a časově náročná. Rigorózní model je naopak využit pro ověření přesnosti zjednodušeného modelu (a tedy validitu nalezených optim) a pro predikci parametrů, které zjednodušený model neposkytuje – zejména složení jednotlivých proudů, výkonnost rektifikačních sekcí a rovnovážné tlaky.

6.5.5 Optimalizace Scénáře C

Scénář C představuje optimalizační problém s menším množstvím omezení, a to zejména z důvodu absence procesní výměny tepla, která v ostatních dvou scénářích představuje nejvýraznější zdroj omezujících podmínek. Další charakteristickou vlastností Scénáře C je relativně rozsáhlá zkoumaná oblast provozních parametrů, neboť jsou variovány tři řízené veličiny v širokém rozsahu: teplota vzduchu T_{air} v intervalu 10 až 50 °C, poměr objemu vzduchu ku množství vody na vstupu V/L v rozmezí 4 000 až 10 000 Nm³/m³ a aktivní výška kolony h_{pack} (tj. výška výplně) mezi 4 a 10 m.

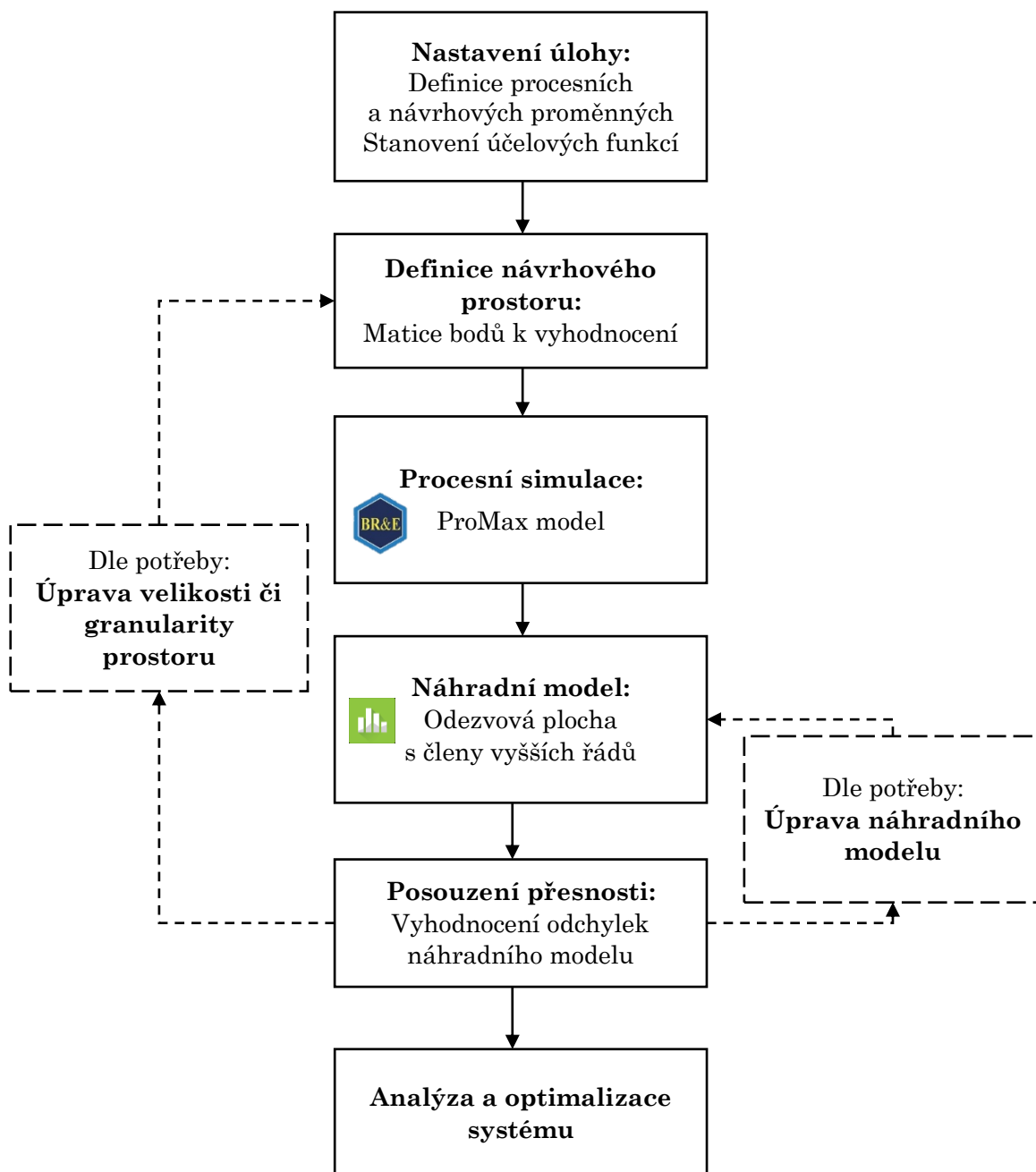
Přímá optimalizace účelových funkcí (DP COST, DP CO₂ a Trade-off pro ČR a Itálii) je v tomto případě nepraktická. Z tohoto důvodu se jako vhodné řešení nabízí vytvoření náhradního modelu (surrogate model), který umožní výrazně efektivnější průběh optimalizace a zároveň poskytne doplňující vhled do vztahů mezi jednotlivými procesními a návrhovými parametry.

Využitím standardního rámce pro tvorbu náhradních modelů dle [110] je možné vytvořit modely pro účely jak analýzy citlivosti (SA), tak i následné optimalizace. Tento přístup byl úspěšně aplikován např. Alhamelim et al., kteří využili syntetická data generovaná v softwaru ProMax na základě metody plánovaného experimentu typu Box-Behnken pro tvorbu náhradních modelů s cílem minimalizace energetické náročnosti úpravy zemního plynu [111]. Tato metodika kombinuje analytické nástroje, matematické programování a metody strojového učení za účelem zvýšení efektivity.

Výzkumní pracovníci z Progress and System Engineering Centre (PROSYS) dále rozvíjejí využití náhradního modelování a dalších pokročilých metod pro řešení rostoucí výpočetní náročnosti modelů čistíren odpadních vod [112, 113]. Tradiční metody, jako jsou např. Monte Carlo simulace, se ukázaly být pro tyto účely nepraktické, a proto jsou inovativní přístupy tohoto typu zásadní pro efektivní provádění optimalizace.

Schéma uvedené na obr. 6.9 znázorňuje rámec náhradního modelování aplikovaný ve Scénáři C. Proces začíná definicí řešeného problému, následuje vymezení

návrhového prostoru a provedení simulačních výpočtů v prostředí ProMax. Tyto simulace generují vstupní data potřebná pro sestavení náhradního modelu, kterým je obvykle vícestupňový polynomiální model odezvy vytvořený v prostředí Minitab [86]. Následně probíhá vyhodnocení přesnosti modelu s využitím chybových ukazatelů, přičemž iterativní zpětné vazby umožňují případné úpravy návrhového prostoru nebo samotného modelu. Proces je zakončen analýzou systému a optimalizací, kdy je náhradní model využit pro efektivní průzkum a optimalizaci procesu v rámci definovaných parametrických mezí.



Obr. 6.9 Podrobnější popis postupu u Scénáře C.

Odezvové plochy obsahují členy až do čtvrtého řádu. Aby se předešlo přeučení (overfitting), které bylo identifikováno při předběžných pokusech o tvorbu náhradního modelu, a aby výsledný náhradní model nebyl složitější, než je nezbytné

nutné, byla pro jeho sestavení použita metoda *forward selection* (členy jsou do modelu přidávány od nejnižších řádů po nejvyšší) v kombinaci s *k-fold křížovou validací* (5 podmnožin). Tento přístup představuje kompromis mezi přesností modelu a jeho schopností zobecnění, což je důležité zejména pro validní predikce v oblasti mimo body, na jejichž základě byly plochy odezvy sestaveny. Matice vysvětlujících proměnných je uvedena v následující tabulce.

Tab. 6-9 Matice vysvětlujících proměnných pro náhradní model Scénáře C.

Vysvětlující proměnná	Meze		Krok	Jednotka	Počet kroků
	Dolní	Horní			
Teplota vzduchu T_{air}	10	50	5	°C	9
Poměr vzduch/voda V/L	4 000	10 000	1 000	m ³ /m ³	7
Výška výplně kolony h_{pack}	3	10	1	m	8
Celkový počet bodů					504

Seznam výstupních proměnných zahrnuje většinu klíčových ukazatelů výkonnosti technologie. Průměr kolony je dopočítán v prostředí ProMax na základě předpokladu 70% míry zahlcení (angl. fraction flooding). Optimalizační úlohy pro ČR a Itálii se neliší pouze cenou energií a emisními faktory (uvedenými v tab. 6-7), ale rovněž vstupní teplotou vzduchu, která je reprezentována zjednodušeně jako průměrná teplota v Benátkách (14,4 °C) a v Břeclavi (10,7 °C), tedy v nejvýznamnějších vinařských oblastech daných zemí [114].

Tab. 6-10 Přehled odezev (závislých proměnných) a jejich jednotek pro náhradní model Scénáře C.

Kategorie	Závislá proměnná	Jednotka
Charakterizace vyčištěné vody	Koncentrace ethanolu	ppmw.
	Koncentrace kyseliny octové	ppmw.
	Redukce CHSK	%
	Výstupní průtok	m ³ /h
Parametry stripovací kolony	Průměr	m
	Měrný průtok kapaliny	m ³ /(m ² · h)
Spotřeba energie	Příkon čerpadla	kW
	Příkon ventilátoru	kW
DP COST	CAPEX	EUR
	OPEX Itálie	EUR/rok
	OPEX ČR	EUR/rok
DP CO ₂	Emise CO ₂ Itálie	t/rok
	Emise CO ₂ ČR	t/rok

Konečná optimalizace je prováděna na základě vytvořených náhradních modelů. Na základě předběžné analýzy plochy odezvy byla jako dosažitelný cíl stanovena 60% redukce CHSK, a to jak pro Itálii, tak i pro Českou republiku. Tento předpoklad umožňuje přímé srovnání výsledků.

Optimalizace s využitím náhradních modelů byla testována přímo v prostředí Minitab pomocí vestavěné funkce *Response Optimizer*. Nicméně při hledání některých optim byly zaznamenány nekonzistence, způsobené slabými gradienty v příslušných oblastech. I přesto jsou však polynomiální plochy odezvy snadno přenositelné do jiných platforem (např. Excel, Python apod.), což umožnilo tyto nedostatky překonat.

6.5.6 Výsledky Scénáře A

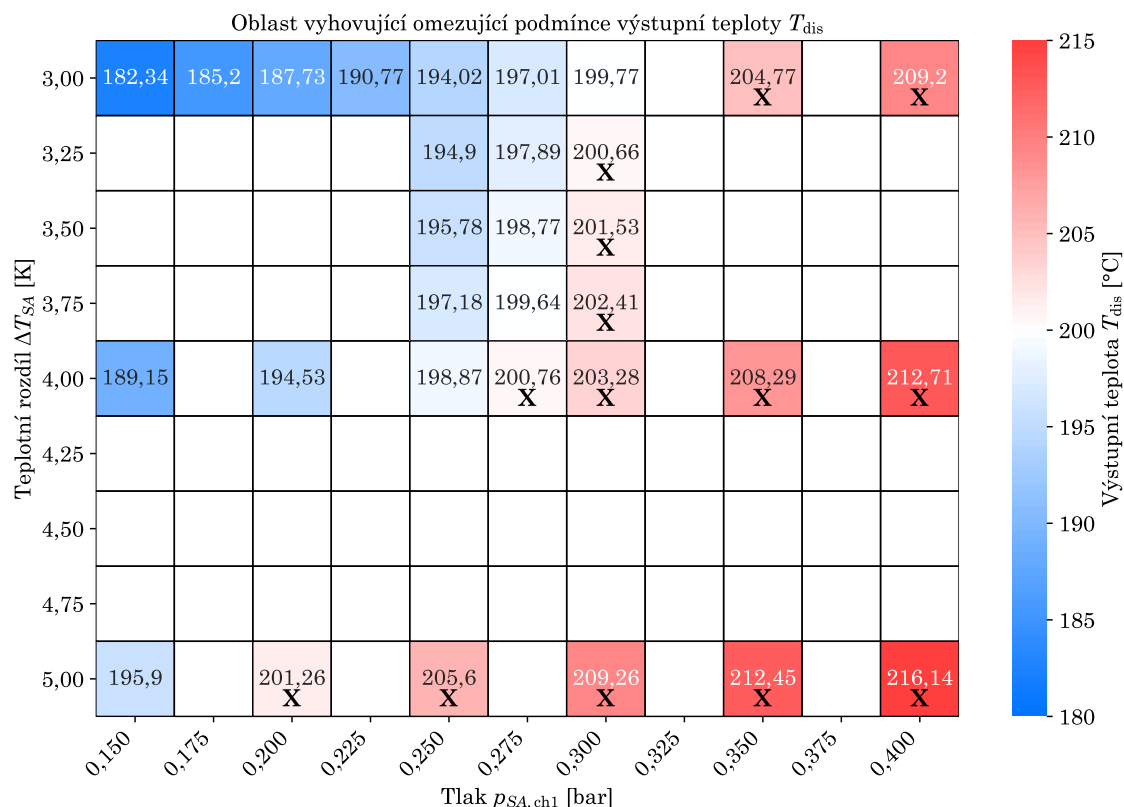
Ve scénáři A byla citlivostní analýza nejprve provedena na 18 návrhových konfiguracích, které byly definovány kombinací tří hodnot minimálního teplotního přiblížení (ΔT_{SA} v rozmezí 3 a 5 K, s krokem 1 K) a šesti hodnot tlaku v první komoře ($p_{SA,ch1}$ v rozmezí 0,15 and 0,4 bar, s krokem 0,05 bar). Hodnota tlaku původně uvažovaná jako omezení (0,1 bar) se ve všech případech optimalizace ukázala jako suboptimální, a proto byla dolní mez zvýšena na 0,15 bar. Důvodem je, že nižší tlak vede k vyššímu objemovému průtoku páry, a tedy ke zvětšení velikosti odpařovacích komor, což má negativní dopad na investiční náklady (CAPEX). V případě kompresoru – který představuje hlavní zdroj provozních emisí CO₂ a nákladů OPEX – je vliv tlaku méně výrazný, protože dochází ke kompenzování mezi požadovaným kompresním poměrem (nižším při nižších tlacích) a reálným objemovým průtokem (vyšším při nižších tlacích).

Bylo zjištěno, že bez ohledu na konkrétní návrhovou konfiguraci se redukce CHSK v čištěné vodě vzhledem ke vstupnímu proudu pohybuje stabilně mezi 91,5–91,9%. Koncentrace ethanolu v odděleném proudu kolísá v úzkém rozmezí 12,23–12,32 obj. %, přičemž variabilita ve výtěžnosti vody je minimální, a zůstává stabilně na úrovni 92,2%. Jako okrajová podmínka zůstává 5% vstupního proudu jako koncentrát, zatímco 2,8% se převede do ethanolu obsahujícího roztoku.

Na základě úvodního vyhodnocení bylo přistoupeno k **zpřesnění návrhového prostoru**, které vedlo k přidání **dalších 13 bodů** v oblastech, kde se pravděpodobně nacházela určitá optima:

- **Kompromisní bod (Trade-off)** se, za teplotního rozdílu 3 K, nachází mezi tlaky 0,15 a 0,25 bar, což vedlo k přidání **dvou dodatečných bodů**.
- **Optimum DP COST (a zároveň minimum CAPEX)** bylo identifikováno v oblasti tlaků mezi 0,25 a 0,3 bar a teplotních rozdílů mezi 3 a 4 K, což vedlo k přidání **dalších 11 bodů**.

Omezení výstupní teploty kompresoru, která musí být udržena pod hranicí 200 °C (kvůli riziku např. samovznícení mazacího oleje), se ukázalo jako **kritické** – při vyšších tlacích nebo větších teplotních přístupech byla tato teplota překročena (viz obr. 6.10). Ke zvýšení výstupní teploty dochází **dvěma mechanismy**: jednak vyšší tlak znamená teplejší vstupní proud do kompresoru (a tedy teplejší výstupní proud při stejném kompresním poměru), jednak větší teplotní přístup zvyšuje požadovaný kompresní poměr, což rovněž vede k vyšší výstupní teplotě.



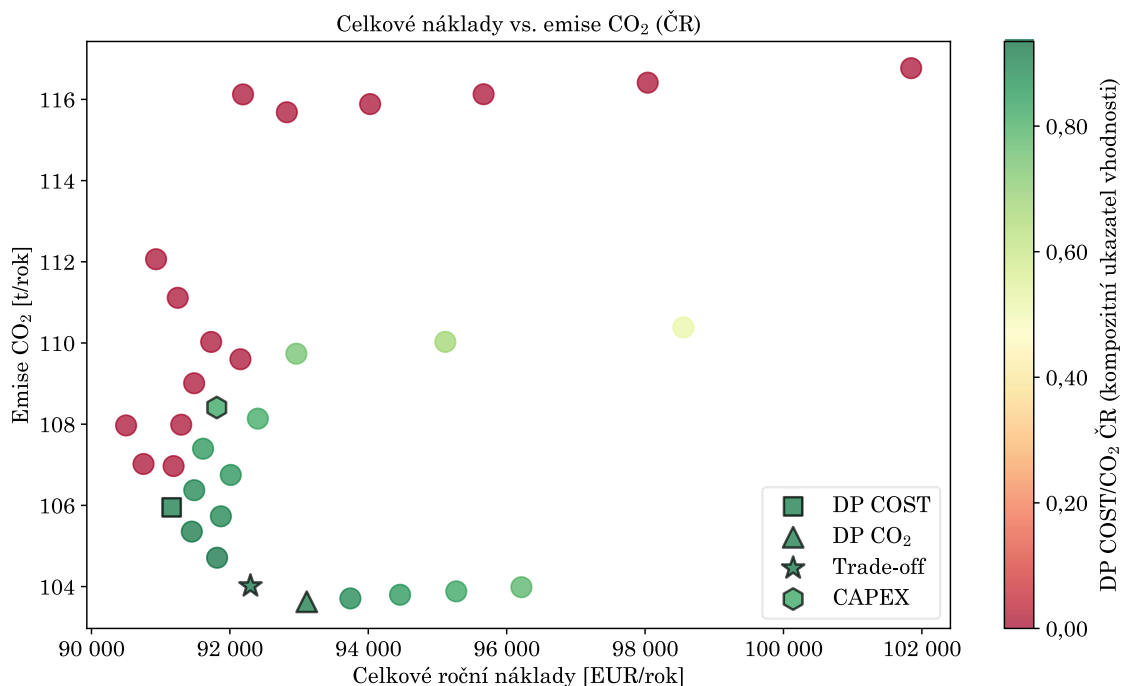
Obr. 6.10 Prostor přípustných řešení Scénáře A dle omezující podmínky teploty na výtlaku z kompresoru (vyřazené body jsou označené X, zatímco modré odstíny o různé sytosti značí splnění omezující podmínky).

V bodových grafech pro ČR a Itálii jsou pro nepřipustné návrhové konfigurace individuální ukazatele vhodnosti řešení (desirability) pro náklady i emise CO_2 – a tím pádem i výsledný kompozitní ukazatel vhodnosti – nastaven na nulu. Tím jsou tyto body efektivně vyloučeny z optimalizačního procesu.

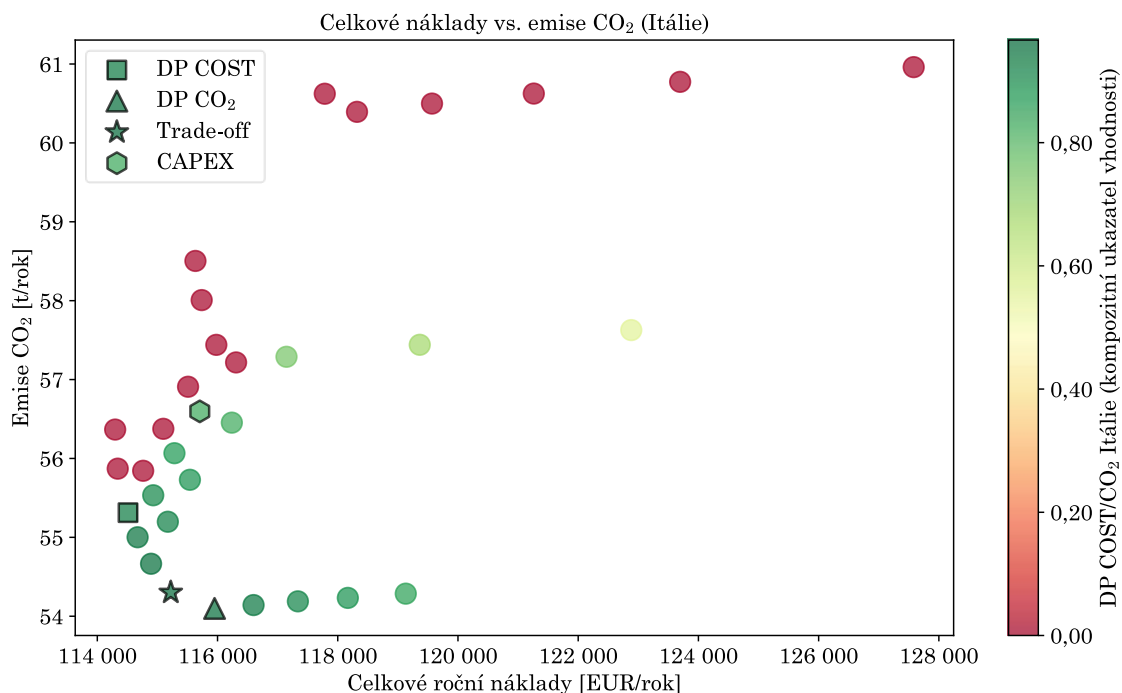
Z grafů je patrné, že optima – tedy DP COST, DP CO_2 , kompromisní bod a optimum investičních nákladů (CAPEX) – se nacházejí ve velmi těsné blízkosti v návrhovém prostoru, konkrétně v intervalu ΔT_{SA} mezi 3 a 3,75 K a tlaku v první komoře $p_{SA, ch1}$ mezi 0,2 a 0,3 bar.

Zásadním poznatkem je, že optimální hodnoty procesních proměnných jsou téměř identické pro ČR (obr. 6.11) i Itálii (obr. 6.12). Ačkoli relativní poloha jednotlivých hodnocených bodů se neliší, v absolutních hodnotách výsledků účelových funkcí tomu tak není. Například při kompromisním bodu činí roční emise CO_2 přibližně 54,3 t/rok pro Itálii oproti 104,0 t/rok pro Českou republiku, zatímco CRN dosahují cca 115 000 EUR/rok v Itálii a 92 000 EUR/rok v ČR.

Navzdory těmto rozdílům – které jsou dány regionálními odlišnostmi v nákladech na energii a emisních faktorech – potvrzuje shoda v optimálních procesních parametrech mezi oběma regiony vysokou robustnost návrhu.



Obr. 6.11 Bodový graf ukazující pro Scénář A a ČR vztah mezi celkovými ročními náklady (osa x) a emisemi CO₂ (osa y), polohu jednotlivých optim a množinu nevyhovujících bodů (červeně).

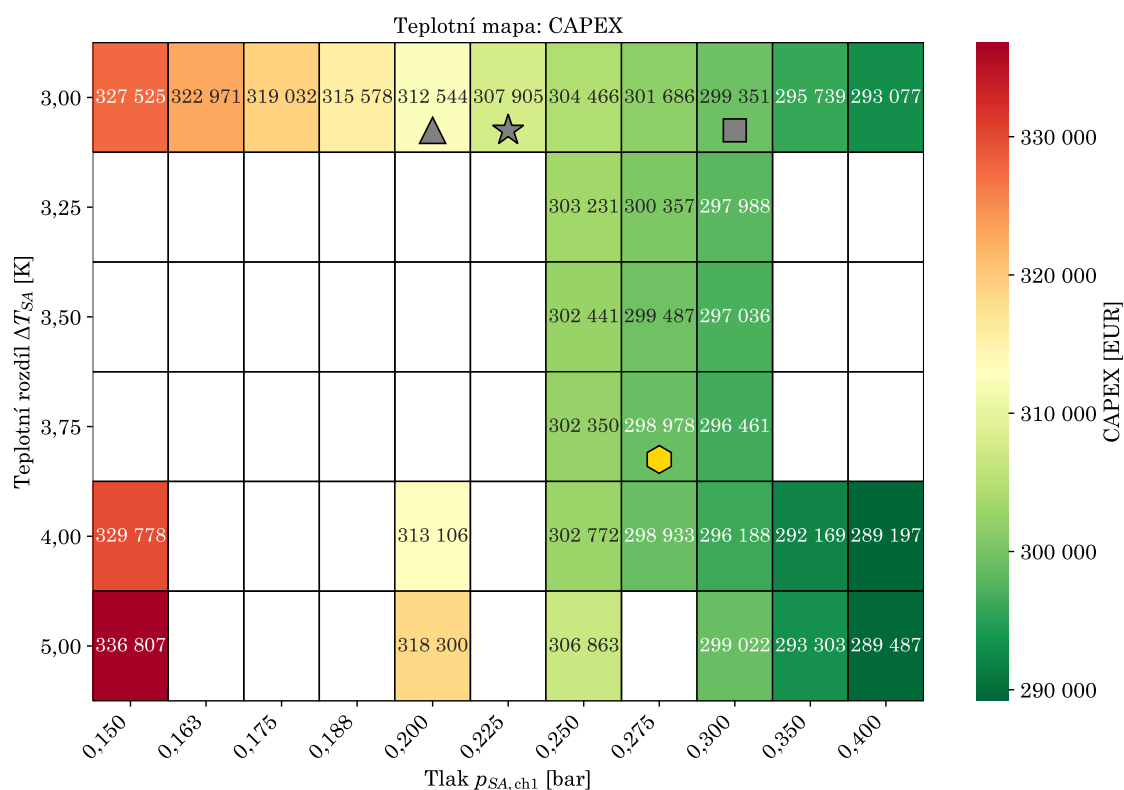


Obr. 6.12 Bodový graf ukazující pro Scénář A a Itálii vztah mezi celkovými ročními náklady (osa x) a emisemi CO₂ (osa y), polohu jednotlivých optim a množinu nevyhovujících bodů (červeně).

Blížkost optim z pohledu procesních proměnných je patrná z obr. 6.13. Obecně platí, že nižší hodnoty minimálního teplotního přiblížení (ΔT_{SA}) jsou výhodné zejména z hlediska provozních nákladů (OPEX) a emisí CO₂, neboť umožňují vyšší míru

zpětného získávání tepla, a tím snižují potřebu externí energie i s ní spojenou produkci emisí. Z pohledu účelové funkce DP COST (celkové roční náklady) tento přínos převažuje mírně suboptimální hodnoty CAPEX. Výsledkem je skutečnost, že tři z optim (DP COST, DP CO₂ a kompromisní bod) odpovídají hodnotě $\Delta T_{SA} = 3$ K.

Z hlediska investičních nákladů (CAPEX) se při změně ΔT_{SA} uplatňují dva protichůdné efekty: při nižších hodnotách ΔT_{SA} je zapotřebí větší celková teplosměnná plocha, zatímco při vyšších hodnotách je vyžadován větší kompresor kvůli vyššímu kompresnímu poměru. Z tohoto důvodu se hlavní variabilita CAPEX neprojevuje primárně ve vertikálním směru (v závislosti na teplotních spádech), ale ve vodorovném směru, tj. při změnách tlaku v první komoře – nižší tlaky totiž vedou k vyšším objemovým průtokům páry a tím k požadavku na větší rozměry odpařovací komory.



Obr. 6.13 Teplotní mapa pořizovacích nákladů Scénáře A (identická pro ČR a Itálii) se zvýrazněním čtyř optim (čtverec – DP COST, trojúhelník – DP CO₂, hvězda – kompromisní bod, šestiúhelník – minimální CAPEX).

Výsledky ukazují, že ekonomická hlediska (minimalizace celkových nákladů, případně pouze CAPEX) a environmentální hlediska (minimalizace emisí CO₂) jsou ve scénáři A v dobré shodě, což podporuje hypotézu, že navržený systém MEE-MVC může být navržen robustním způsobem tak, aby byl současně nákladově efektivní i environmentálně šetrný.

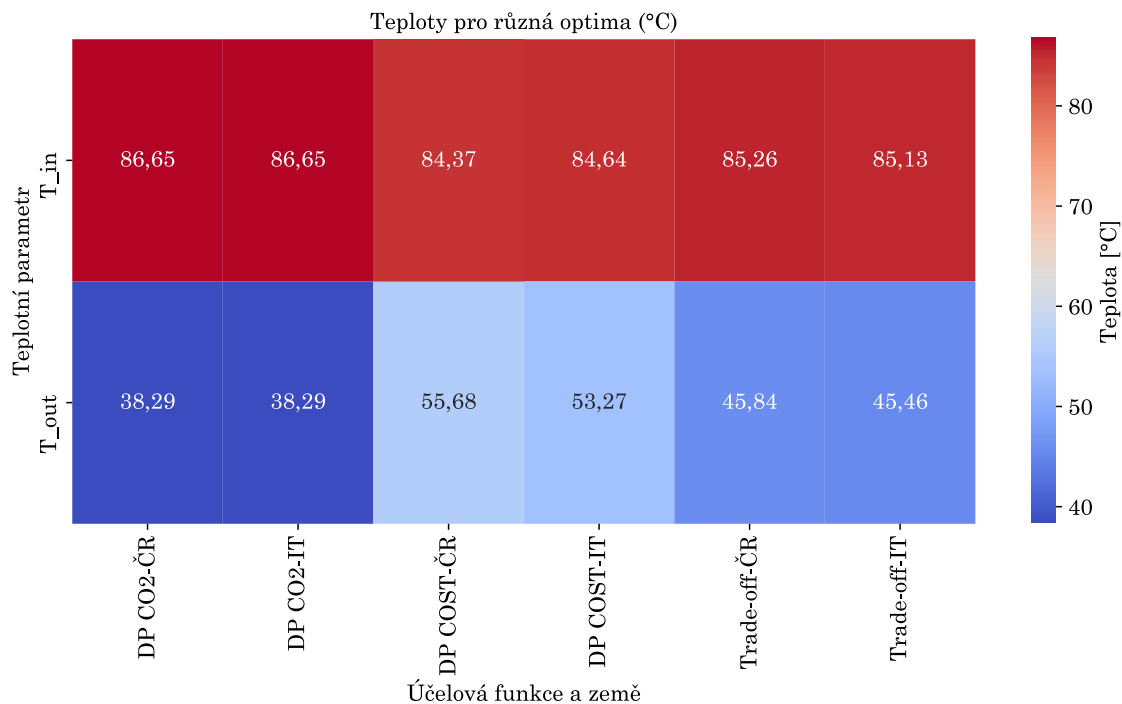
6.5.7 Výsledky Scénáře B

Scénář B vykazuje větší rozmanitost výsledků mezi jednotlivými optimy, a to navzdory skutečnosti, že optimalizovaný počet komor a sekcí pro odvod tepla je pro všechna řešení shodný, konkrétně 8 komor a 2 HJS (sekce pro odvod tepla). Jedinou výjimkou je návrhový bod s minimálními investičními náklady (CAPEX), který vede ke konfiguraci se třemi sekcemi pro odvod tepla. Tento směr však není opodstatněný, neboť dosažení pouze mírného snížení CAPEX (~5 %) vede k téměř 50% nárůstu OPEX a emisí CO₂. V důsledku toho jsou v rámci výsledků zachycena pouze tři optima: DP COST, DP CO₂ a kompromisní bod.

S ohledem na velmi dobrou shodu mezi zjednodušeným modelem a simulací v prostředí ProMax lze výsledky týkající se nákladů a emisí v této kapitole považovat za prakticky zaměnitelné (v praxi byly využity výsledky zjednodušeného modelu). Největší rozdíly byly pozorovány u optima DP CO₂, kde se hodnoty pro jednotlivé zařízení lišily v rozmezí od -2,2 % do 5,4 %, přičemž celkový rozdíl pro účelové funkce emisí CO₂ a CRN činil pouze -1,3 % a 0,8 %.

Stejně jako ve Scénáři A, i ve Scénáři B zůstávají hodnoty redukce CHSK, výtěžnosti vody a koncentrace ethanolu ve výstupním roztoku prakticky konstantní napříč všemi optimy. Mezi těmito parametry vykazuje největší (byť stále malou) odchylku redukce CHSK, která dosahuje hodnoty 91,1 % pro DP CO₂ a 91,9 % pro DP COST. Výtěžnost vody zůstává neměnná na úrovni 91 %. Nejvýraznějším rozdílem oproti Scénáři A je koncentrace ethanolu ve výstupním roztoku, která je v tomto případě nižší: 8,47 obj. % pro DP CO₂ a 8,55 obj. % pro DP COST. Tato redukce je přičítána skutečnosti, že ve Scénáři A jsou pro zpětný zisk ethanolu využívány pouze dvě ze tří komor, protože pára z poslední komory obsahuje jen minimální množství ethanolu a může být přímo použita jako vyčištěná voda. Naproti tomu ve Scénáři B jsou pro zpětný zisk ethanolu využívány všechny komory, což vede k získání více zředěného produktu ve srovnání se scénářem A.

Vzhledem k tomu, že hlavní schéma uspořádání procesu (tj. počet komor a sekcí pro odvod tepla) je ve všech optimálních řešeních identické, jedinými proměnnými procesními parametry jsou vstupní a výstupní teploty. Rozdíl teplot mezi jednotlivými komorami je rovnoměrný, což plně definuje provozní podmínky a umožňuje provedení všech dalších výpočtů. Hodnoty vstupní a výstupní teploty pro jednotlivá optima jsou uvedeny v obr. 6.14.

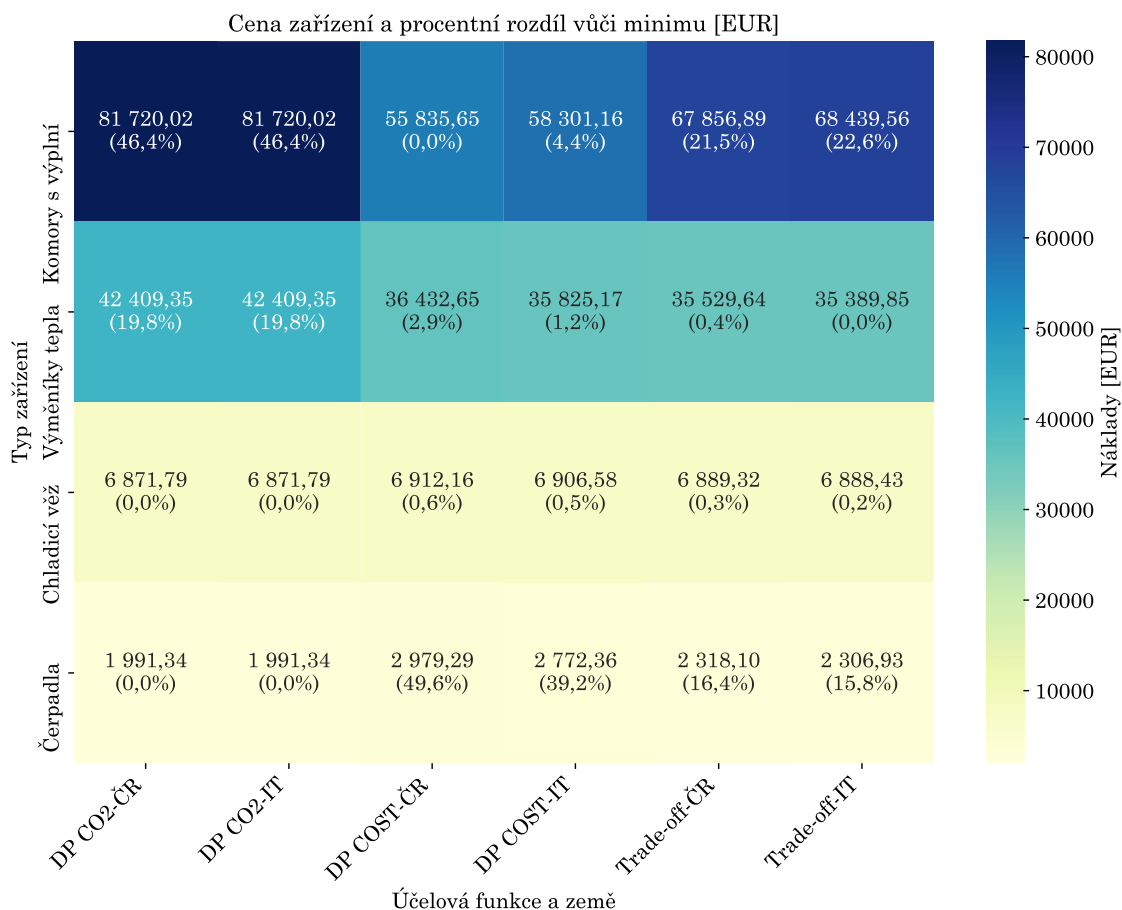


Obr. 6.14 Vstupní a výstupní teplota MSF pro různá optima Scénáře B.

Návrhové body odpovídající optimu DP CO₂ jsou identické pro ČR i Itálii a zároveň se překrývají s minimální energetickou náročností a OPEX. Pro dosažení těchto parametrů v systémech MSF se uplatňují dva klíčové mechanismy: a) minimalizace tepelné náročnosti prostřednictvím mírně vyšší míry rekuperace tepla, umožněné velmi malým teplotním přiblížením na teplém (vstupním) konci systému, b) minimalizace náročnosti na čerpání snížením míry recirkulace, čehož se pro stejný odpar docílí zvýšením teplotních rozdílů mezi komorami. Tato strategie je však vykoupena větší přestupní plochou a velikostí odpařovacích komor, což odpovídá použití nižších tlaků na chladném (výstupním) konci systému.

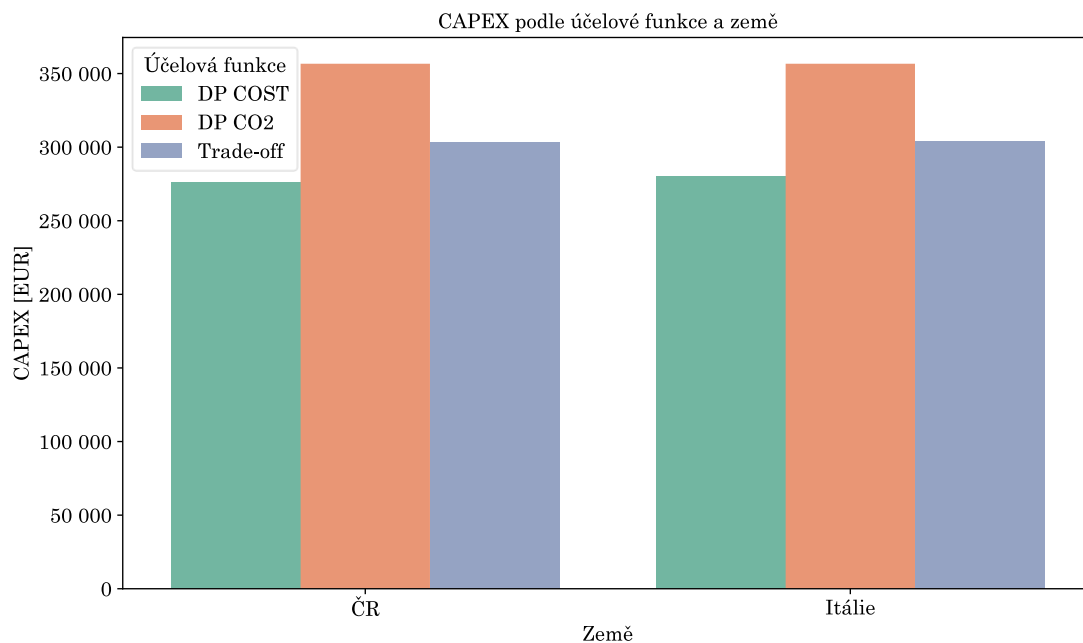
Optimum DP COST představuje kompromisní řešení, které vyvažuje energetickou náročnost (a tím i OPEX) s investičními náklady (CAPEX). Umožňuje vyšší recirkulační poměr, přičemž se zároveň snaží udržet náklady na komory a výměníky tepla na nižší úrovni.

Vzhledem k rozdílným nákladům na energii mezi Českou republikou a Itálií již optima DP COST a kompromisní řešení nejsou totožná a objevují se mezi nimi dílčí rozdíly. Například relativně vysoká cena elektřiny v Itálii vede k tomu, že DP COST optimum je dosaženo při nižším recirkulačním poměru. Tyto komplexní poznatky jsou znázorněny na obr. 6.15.



Obr. 6.15 Struktura pořizovacích nákladů klíčového zařízení pro různá optima Scénáře B.

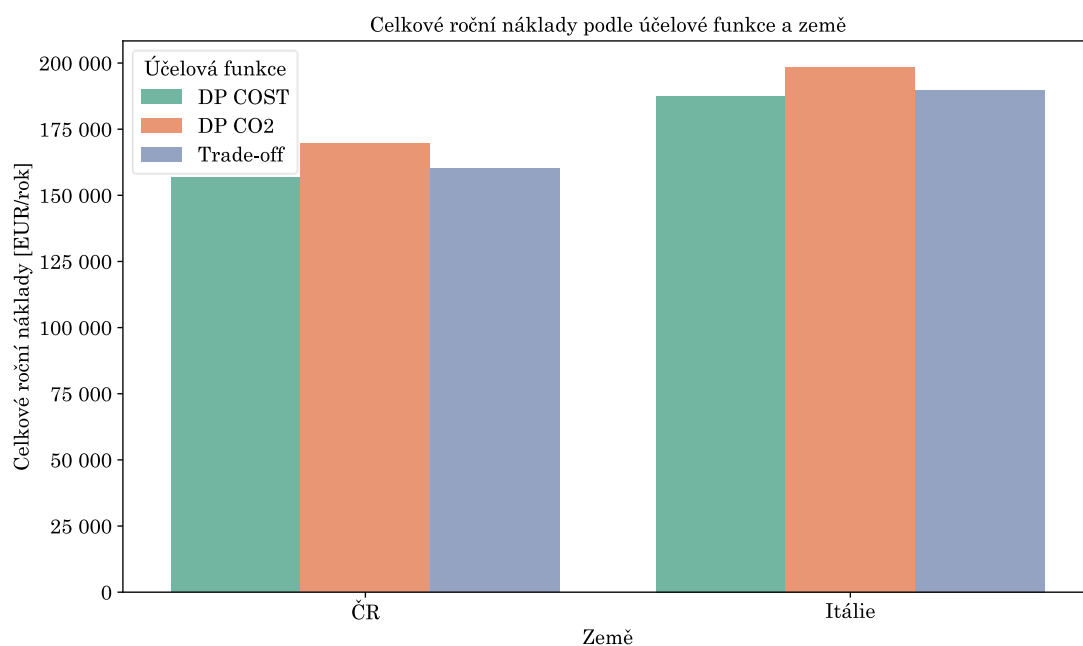
S ohledem na výše popsanou shodu návrhových bodů odpovídajících DP CO₂ pro obě země a pouze drobné rozdíly v případě optim DP COST a kompromisního bodu se ukazuje, že hodnoty CAPEX se mezi jednotlivými zeměmi liší jen minimálně. Největší rozdíl je patrný u optima DP COST, kde činí 275 900 EUR pro ČR a 280 200 EUR pro Itálii, což představuje navýšení o +1,6%. Naopak u kompromisního bodu je rozdíl již menší než 0,5%, přičemž hodnoty se pohybují mírně nad hranicí 300 000 €. Pro optimum DP CO₂ je hodnota identická pro obě země, konkrétně 356 700 €. Srovnání je patrné na obr. 6.16.



Obr. 6.16 Srovnání pořizovacích nákladů pro ČR a Itálii a jednotlivá optima Scénáře B.

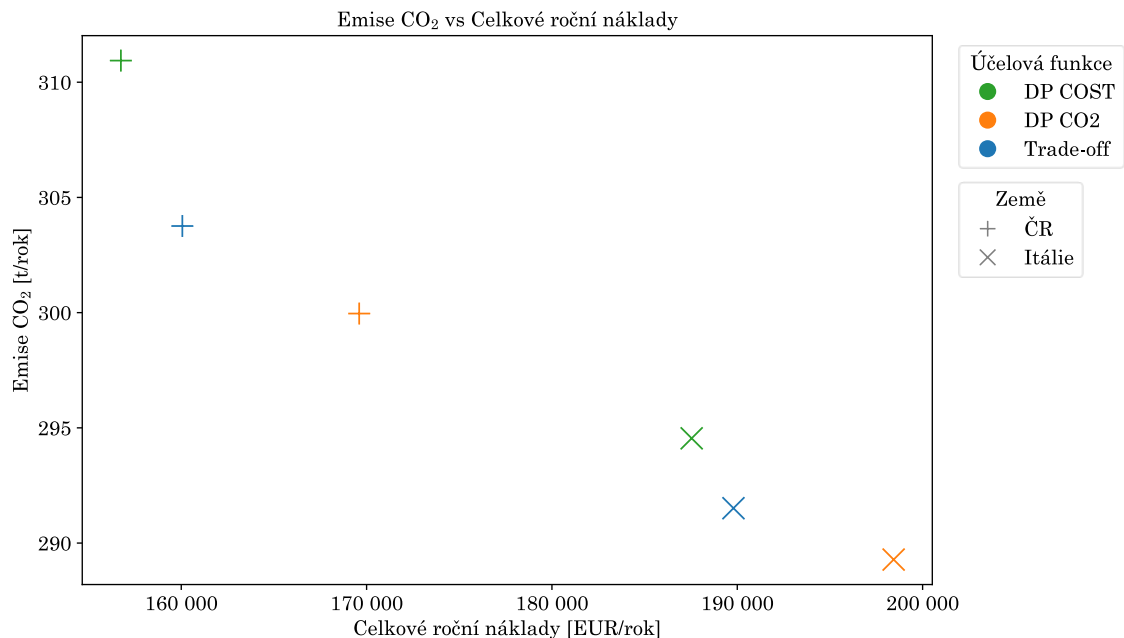
Z pohledu CRN jsou rozdíly v CAPEX u jednotlivých zemí částečně kompenzovány nižším OPEX pro body odpovídající DP CO₂. Přestože DP CO₂ vykazuje nejvyšší hodnoty CRN, jedná se pouze o přibližně 8 % a 6 % vyšší hodnoty ve srovnání s optimem DP COST pro Českou republiku a Itálii.

Rozdíly mezi jednotlivými zeměmi zde nejsou zdaleka tak výrazné jako ve Scénáři A, což je dáno skutečností, že rozdíl v cenách zemního plynu (hlavního energetického nosiče pro MSF) je podstatně menší než rozdíl v cenách elektřiny (hlavního zdroje energie pro MEE-MVC).



Obr. 6.17 Srovnání celkových ročních nákladů (CRN) pro ČR a Itálii a jednotlivá optima Scénáře B.

Skutečnost, že zemní plyn je uvažován jako primární energetický zdroj pro MSF, má za následek omezenou variabilitu emisí CO₂, neboť emisní faktor pro výrobu tepla je v obou zemích identický. Bodový graf na obr. 6.18 ukazuje, že návrhové body pro Českou republiku i Itálii jsou si poměrně blízké nejen z hlediska trendu, ale i z hlediska absolutních hodnot.



Obr. 6.18: Bodový graf ukazující pro Scénář B a jednotlivá optima vztah mezi celkovými ročními náklady (osa x) a emisemi CO₂ (osa y).

Z hlediska kompromisu mezi ekonomickými a environmentálními aspekty jsou kompromisní body mimořádně příznivé: CRN je v obou případech pouze o 2,1 % vyšší oproti DP COST, zatímco emise CO₂ jsou pouze o 0,8 % vyšší v případě Itálie a o 1,3 % v případě České republiky.

Skutečnost, že ve Scénáři B jednotlivá optima vykazují výrazné rozdíly v procesních parametrech, které významně ovlivňují většinu prvků navrhovaného zařízení, vyžaduje pečlivé rozhodnutí o směru návrhu. V tomto ohledu představují kompromisní řešení velmi atraktivní variantu, která zohledňuje jak ekonomická, tak environmentální kritéria.

6.5.8 Výsledky Scénáře C

Scénář C vykazuje výrazné rozdíly mezi Českou republikou a Itálií, což je dáno odlišnou teplotou vzduchu uvažovanou pro stripování v závislosti na klimatických podmínkách (10,7 °C pro ČR a 14,4 °C pro Itálii). Kromě obvyklých optim (DP COST, DP CO₂ a kompromisního bod) bylo dále nalezeno také dodatečná optimum s nejnižším CAPEX, což bylo umožněno rychlou optimalizací pomocí náhradního modelu (výpočet trvá maximálně několik sekund).

Shoda mezi výsledky simulací a náhradním modelem je vynikající – relativní chyby pro identifikovaná optima činí:

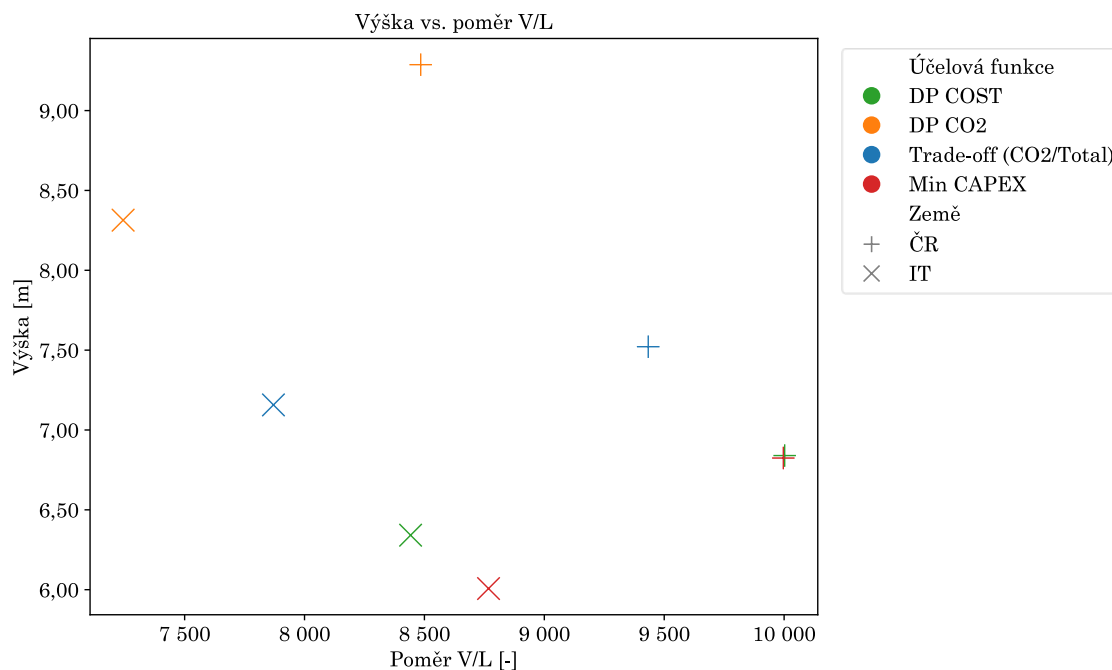
- –0,02 až 0,02 % pro CAPEX,
- –0,21 až 0,03 % pro CO₂,
- –0,08 až 0,01 % pro CRN,
- a –0,57 až 1,08 % pro koncentraci ethanolu, která je hlavní složkou ovlivňující hodnotu CHSK.

Přestože poslední z uvedených parametrů vykazuje největší odchylky, je model konzervativní, tj. predikuje vyšší koncentrace ethanolu než ProMax, s výjimkou kompromisních řešení a optima DP CO₂ pro Itálii.

Pro shrnutí: všechna optima jsou omezena požadavkem na 60% redukci CHSK, což je reálně dosažitelné pro obě země bez výrazného omezení návrhového prostoru a umožňuje přímé srovnání. Pro dané návrhové teploty činí horní meze redukce CHSK 64,7 % pro Českou republiku a 68,6 % pro Itálii.

Polohy jednotlivých optim v rámci návrhové oblasti jsou zobrazeny na obr. 6.19. Obecně platí, že snižování emisí CO₂ vede k použití vyšších kolon s nižšími poměry V/L. Naproti tomu CAPEX je v tomto scénáři hlavní složkou CRN, a proto jakýkoliv výskyt nákladového kritéria ve funkci účelové směřuje řešení k menší výšce kolony.

Pro ČR dochází k překryvu optim, což je způsobeno tím, že horní hranice poměru V/L byla nastavena na 10 000 m³/m³, aby byla zajištěna minimální měrný průtok kapaliny v koloně – u těchto bodů již činí relativně nízkých 1,3 m³/(m²·h). Toto překrytí nastává u všech optim, kde má ve funkci účelové dominantní roli CAPEX, tedy u DP COST a min. CAPEX. Naopak u DP CO₂ a kompromisního bodu je výsledkem návrh s vyšší kolonou a sníženým poměrem V/L.



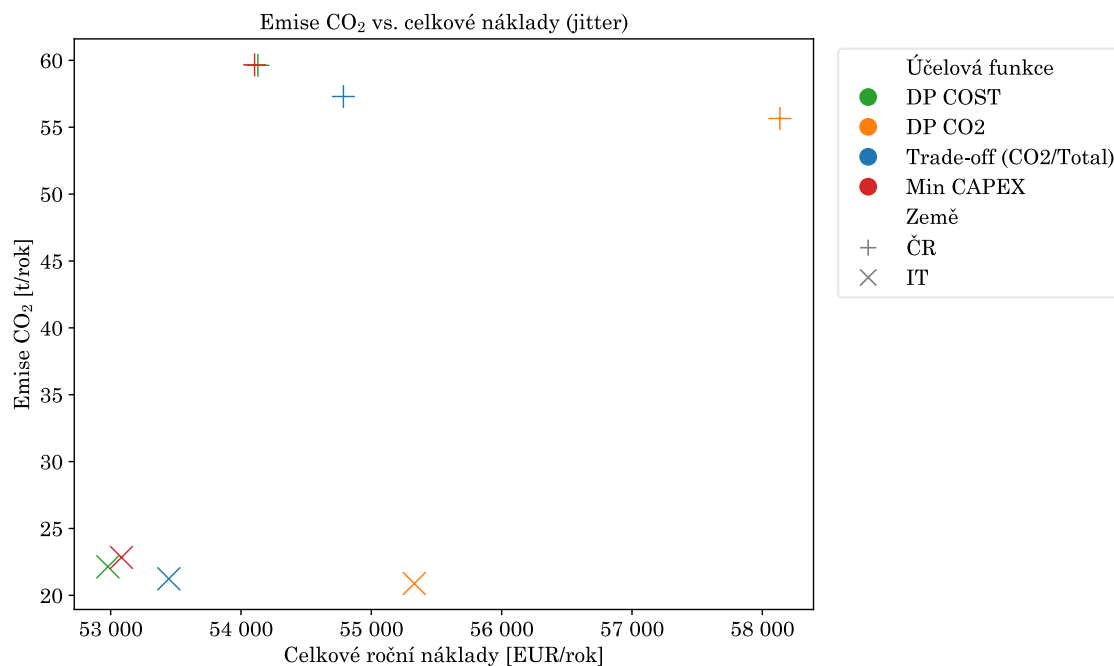
Obr. 6.19 Bodový graf zachycující umístění různých optim Scénáře C v závislosti na výšce kolony (osa y) a poměru V/L (osa x); pro odlišení překrývajících bodů je přidán drobný rozptyl.

Výrazně vyšší hodnoty poměru V/L nevedou k proporcionalnímu nárůstu energetických nároků, provozních nákladů, ani emisí CO_2 , neboť jsou spojeny s menšími výškami kolon, a tím i s nižšími tlakovými ztrátami na výplni. Vzhledem k tomu, že velikost a příkon ventilátoru jsou ovlivněny jak průtokem, tak tlakem, dochází mezi těmito dvěma vlivy k vzájemné kompenzaci. Například v Itálii je nárůst poměru V/L o 21 % z hodnoty $7\,246\text{ m}^3/\text{m}^3$ (DP CO_2) na $8\,768\text{ m}^3/\text{m}^3$ (Min. CAPEX) spojen pouze s 9% zvýšením energetické spotřeby z 9,2 na 10 kW.

Rozdílnost mezi emisními faktory a cenami energie v obou zemích je zřetelnější při pohledu na obr. 6.20. V Itálii je vliv OPEX na CRN výraznější, což vyrovnává tyto roční náklady mezi oběma zeměmi, přestože jsou v ČR typické výrazně vyšší kolony a tím i vyšší investiční náklady (CAPEX).

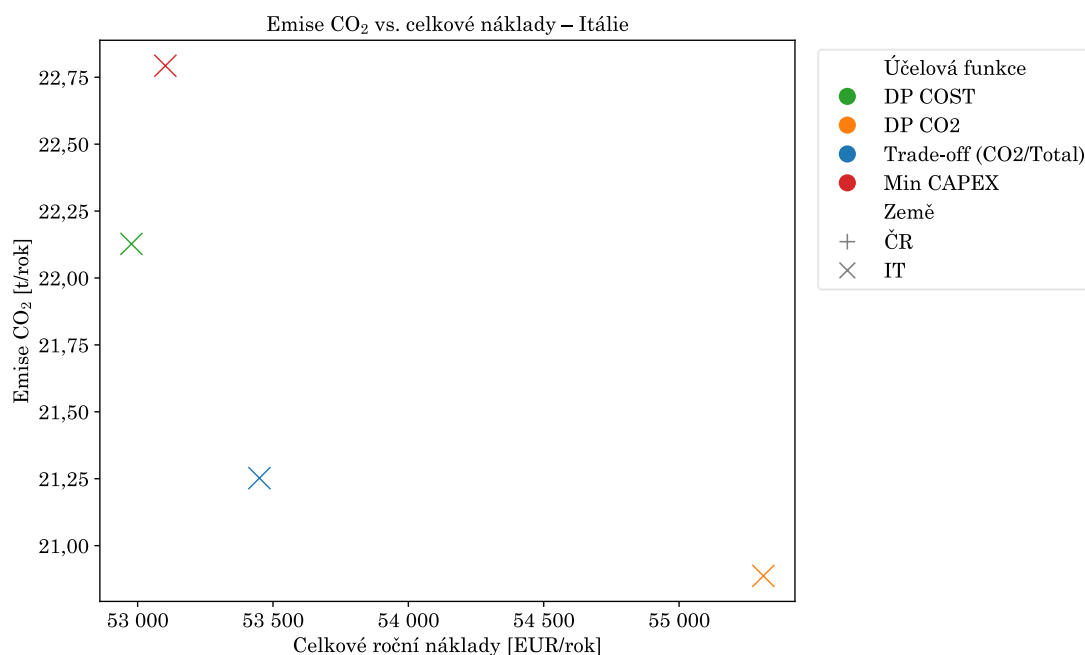
Optimum DP CO_2 v Itálii vede k poklesu emisí CO_2 o 5,6 % ve srovnání s optimum DP COST, zatímco zvýšení CRN činí pouze 4,4 %, což hovoří ve prospěch environmentálně příznivější varianty. V ČR jsou redukce emisí CO_2 a nárůst nákladů vzájemně srovnatelné – přibližně 7 % oběma směry.

Ve všech případech však kompromisní bod zůstává nejatraktivnější variantou, neboť ztráta v jednotlivých účelových funkcích oproti jednokriteriálním optimům činí zpravidla pouze 1–3 %.



Obr. 6.20 Bodový graf ukazující pro Scénář B a jednotlivá optima vztah mezi celkovými ročními náklady (osa x) a emisemi CO₂ (osa y); pro odlišení překrývajících bodů je přidán drobný rozptyl (pozn. optima min. CAPEX and DP COST pro Itálii identická nejsou).

Podrobnější analýza pro Itálii na obr. 6.21 ukazuje, že relativní uspořádání návrhových bodů úzce odpovídá Scénáři A (viz obr. 6.12). Vzhledem k tomu, že CAPEX tvoří převážnou část CRN – přibližně 60 % v Itálii a 70 % v České republice – je bod minimálního CAPEX horizontálně velmi blízko bodu DP COST (tj. z hlediska nákladů), zatímco nárůst emisí CO₂ (vertikální) je v porovnání s bodem DP CO₂ výraznější.



Obr. 6.21 Detailní bodový graf ukazující pro Scénář C a Itálii jednotlivá optima vztah mezi celkovými ročními náklady (osa x) a emisemi CO_2 (osa y).

V souladu s předchozími scénáři se kompromisní bod nachází výrazně pod hypotetickou spojnicí bodů DP COST a DP CO_2 , což představuje jeho přidanou hodnotu.

6.6 Škálovatelnost

Pro hlubší posouzení vhodnosti jednotlivých scénářů při různých kapacitách byly výpočty provedeny pro celkem čtyři průtoky: 0,5; 1, 2 a 3 m^3/h , které reprezentují jak malé, tak větší průmyslová vinařství. Procesní parametry odpovídají kompromisním (Trade-off) optimům a zůstávají konstantní, proto je dopad na emise a účinnost čištění minimální: ve scénářích A a B se nemění, zatímco ve scénáři C dochází k mírnému zlepšení redukce CHSK z cca 59 % při 0,5 m^3/h na 64 % při 3 m^3/h .

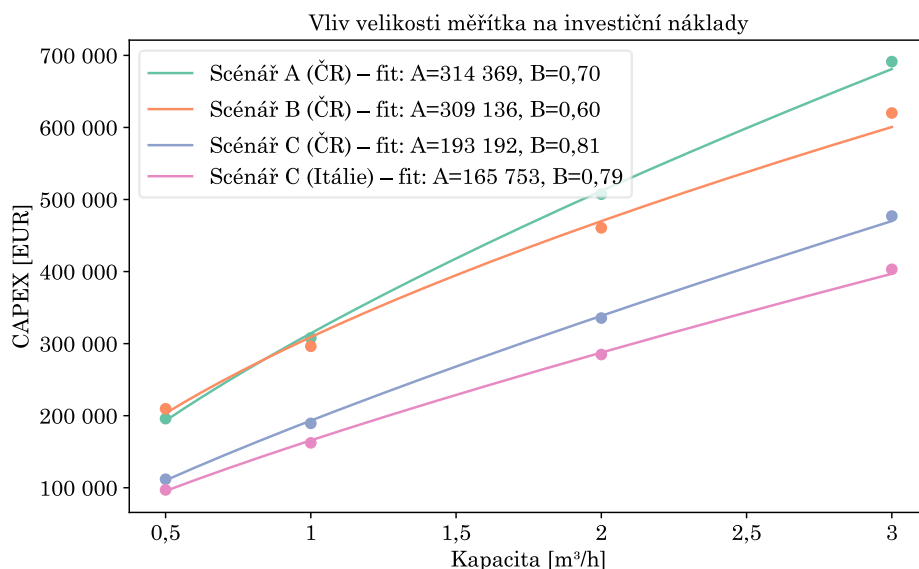
Efekt škálování je hodnocen z hlediska:

- investičních nákladů (CAPEX),
- měrné spotřeby energie (kWh/m^3),
- měrných provozních nákladů (EUR/m^3) a
- měrných emisí CO_2 (kg/m^3).

Pro popis závislosti CAPEX na kapacitě byla použita mocninná funkce ve tvaru $\text{CAPEX} = A \cdot \text{Kapacita}^B$ kde exponent B charakterizuje míru úspory z rozsahu – nižší exponent značí strmější pokles měrných investičních nákladů. Tato závislost je znázorněna na obr. 6.22.

Z grafu vyplývá, že kapacita 1 m^3/h leží blízko průsečíku scénářů A a B, jejichž CAPEX je v základním případě velmi podobný (rozdíl 4 %), ale při 3 m^3/h již rozdíl narůstá na 12 % ve prospěch Scénáře B. To je dáno tím, že Scénář B má nejnižší exponent (0,6) – odpovídá známému „six-tenths rule“, následuje Scénář A s exponentem 0,7, a Scénář C vykazuje hodnotu 0,80–0,82.

Z toho vyplývá, že scénář C je atraktivní především pro malé kapacity – např. při 0,5 m^3/h je jeho CAPEX přibližně poloviční oproti ostatním scénářům. S rostoucím měřítkem však tuto výhodu ztrácí. Obecně měřítko zásadně neovlivňuje výsledky porovnání prezentované v kap. 6.7.2 – jak je ukázáno dále, ani přes redukovaný CAPEX Scénáře B pro větší měřítko není z pohledu CRN výhodnější než Scénář A.



Obr. 6.22 Vliv velikosti měřítka na investiční náklady – vzhledem k zanedbatelným rozdílům u Scénářů A a B jsou ČR a Itálie odlišeny jen pro Scénář C.

Energetické parametry vykazují ve Scénářích A a B téměř lineární závislost na kapacitě, což znamená, že měrné hodnoty nejsou výrazně ovlivněny změnou měřítka v rozsahu od 0,5 do 3 m³/h. Ve Scénáři A klesá měrná spotřeba energie (SEC) z 25,9 na 22,6 kWh/m³, zatímco ve Scénáři B se snižuje z 182,5 na 179,1 kWh/m³. Ve Scénáři C je pokles relativně výraznější – v České republice SEC klesá z 13,2 na 12,2 kWh/m³, zatímco v Itálii z 10,0 na 9,0 kWh/m³.

Podobný trend lze pozorovat také u měrných emisí CO₂ (SCO₂) a měrných provozních nákladů (SOPEX), neboť tyto veličiny jsou přímo úměrné energetické náročnosti procesu. Nejvýraznější pokles specifických parametrů nastává při přechodu z 0,5 na 1 m³/h a nad touto hodnotou se již změny stabilizují.

6.7 Výsledný návrh

S ohledem na výhody kompromisních bodů ve všech třech scénářích jsou tyto body využity pro vzájemné srovnání jednotlivých scénářů a popis nejslibnějšího (výsledného) návrhu. Srovnání probíhá na třech úrovních:

- Zohlednění výše uvedených predikcí škálovatelnosti;
- Porovnání referenčního případu – při kapacitě 1 m³/h;
- Doplnující analýzy, např. z hlediska robustnosti návrhu a provozní spolehlivosti jednotlivých jednotkových operací.

6.7.1 Shrnutí poznatků napříč scénáři

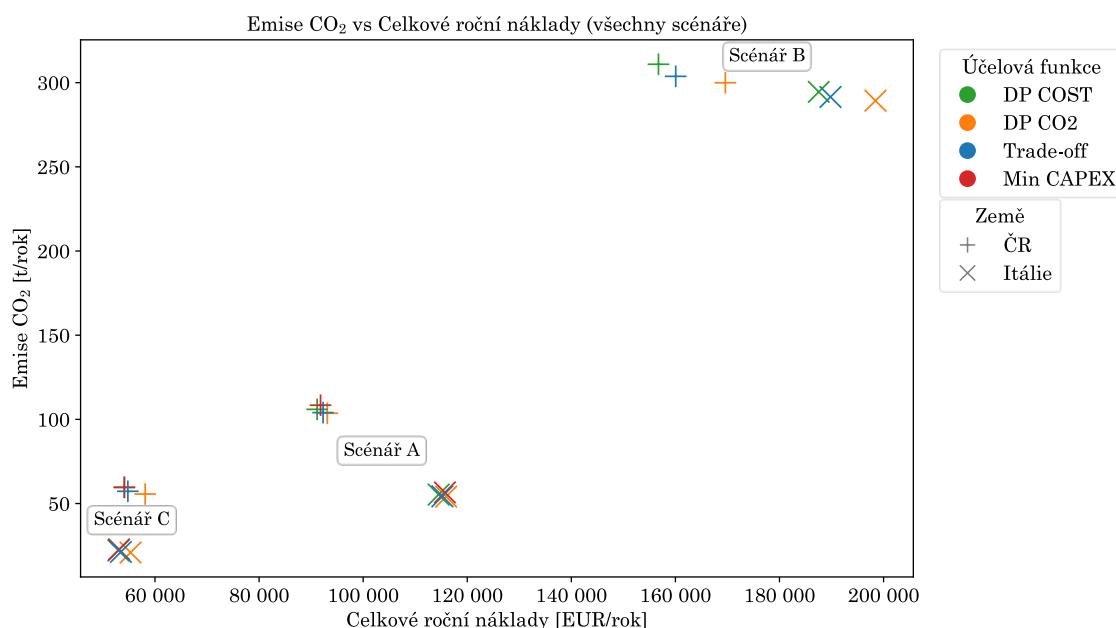
Obr. 6.23 poskytuje přehled hodnot CRN a emisí CO₂ pro nalezená optima ve Scénářích A, B a C, a to pro ČR i Itálii.

Optima (DP COST, DP CO₂ a kompromisní řešení) ve Scénářích A a C jsou relativně těsně seskupena. Ve Scénáři A je tato blízkost dána především minimálními rozdíly v základních procesních parametrech – ekonomické a environmentální cíle jsou v rámci zkoumaného návrhového prostoru velmi dobře sladěny, což vede k těsnému seskupení optim.

Ve Scénáři C je pozorovaná konzistence důsledkem kompenzačních efektů:

- pro DP CO₂ jsou nižší provozní náklady vyváženy vyššími a investičně náročnějšími kolonami,
- zatímco u DP COST je nižší výška kolony kompenzována vyšším průtokem vzduchu, a tedy i vyšším OPEX.

Výsledkem je relativně úzké rozmezí CRN, přestože mezi jednotlivými návrhy existují významné rozdíly v konfiguraci procesu.



Obr. 6.23 Bodový graf ukazující vztah mezi celkovými ročními náklady (osa x) a emisemi CO₂ (osa y) pro všechny nalezená optima v rámci tří scénářů a dvou zemí.

Scénář C navíc vykazuje nejmenší rozdíl hodnot CRN mezi ČR a Itálií. Tento jev je způsoben vyšší cenou elektřiny v Itálii, která zvyšuje podíl OPEX na CRN. Díky tomu jsou výrazně vyšší kolony použité v České republice (a s nimi související vyšší CAPEX) kompenzovány nižšími energetickými náklady, což v konečném důsledku vede k téměř vyrovnaným hodnotám CRN v obou zemích.

Naopak ve Scénáři B mají vstupní proměnné výrazný vliv na návrh zařízení, a na rozdíl od scénářů A a C zde neexistují silné kompenzační mechanismy, což se projevuje větším rozptylem optim z hlediska nákladů a emisí CO₂. Například optimum DP CO₂ současně odráží minimální energetickou náročnost a OPEX, kterých je dosaženo díky vyšší míře rekuperace tepla a sníženým nárokům na čerpání, nicméně za cenu větších přestupních ploch a objemnějších komor, což vzdaluje toto optimum od bodu DP COST z hlediska CRN.

Jako základ pro komparativní analýzu scénářů byly zvoleny kompromisní body (Trade-off), a to vzhledem k jejich konzistentním výhodám napříč všemi scénáři – představují vyvážené řešení mezi ekonomickými a environmentálními cíli při pouze marginálních ústupcích.

Ve všech třech scénářích leží kompromisní body pod hypotetickou spojnicí mezi DP COST a DP CO₂ v prostoru emisí CO₂ vs. CRN, což podtrhuje jejich efektivitu: dosahují lepšího kombinovaného výsledku, než jaký by bylo možné očekávat při

jednoduchém lineárním kompromisu. Díky tomu tvoří robustní a reprezentativní základ pro kvantitativní srovnání scénářů, které je obsahem následující dílčí kapitoly.

6.7.2 Kvantitativní porovnání

Komplexní kvantitativní přehled výsledků je uveden v tab. 6-11. Výsledky lze rozdělit do tří hlavních kategorií:

- ekonomické ukazatele,
- energetické charakteristiky
- emise a výstupní charakteristiky proudů (včetně emisí CO₂ a kvality vyčištěné vody).

Scénáře A a B jsou si z hlediska CAPEX a provozních parametrů velmi podobné. Rozdílný charakter využívaných energetických zdrojů – elektricky poháněný odparný systém ve scénáři A versus teplem poháněný proces ve scénáři B – se však výrazně odráží v poměru OPEX mezi Českou republikou a Itálií. Zatímco ve scénáři A je OPEX v Itálii o 75 % vyšší než v Česku, ve scénáři B činí tento rozdíl 30 %.

Obecně lze říci, že scénář B, založený na přímé výrobě tepla ze zemního plynu, je nejen ekonomicky méně výhodný, ale také významně náročnější z hlediska emisí CO₂ – emise jsou 3–6krát vyšší než ve scénáři A. Výsledná hodnota CHSK ve vyčištěné vodě se v obou případech pohybuje okolo 700 mg/l, což může být dostačující pro vypouštění do kanalizace, avšak tuto hodnotu nelze paušálně aplikovat, neboť záleží na konkrétních legislativních požadavcích dané kanalizační sítě.

Scénář C se svou povahou od prvních dvou scénářů výrazně liší. Nejenže se jedná o méně kapitálově náročné řešení, ale jeho provozní náklady jsou přibližně poloviční oproti scénáři A (55 % v Česku, 39 % v Itálii). Zásadním omezením je však omezená schopnost samostatné redukce CHSK, zejména v období vinobraní, kdy může vstupní CHSK dosahovat nízkých desítek tisíc mg/l. V tomto kontextu je scénář C vhodnější jako předúprava než jako samostatné čistící řešení.

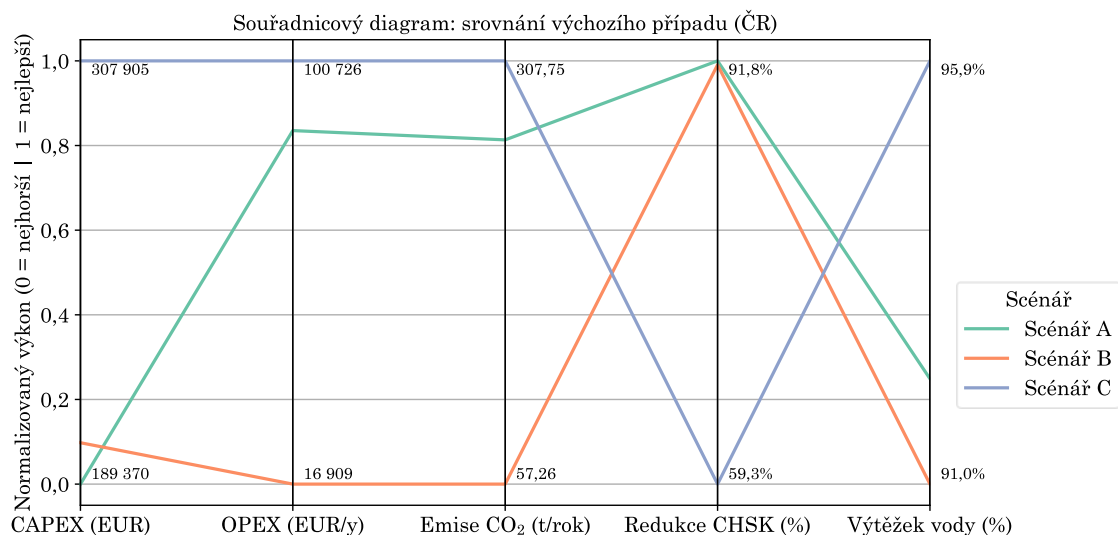
Navíc scénář C neprodukuje ethanolový roztok, což lze vnímat jako potenciálně negativní z hlediska provozní ekonomiky i principů cirkulární ekonomiky – u scénářů A a B představuje získaný ethanol cenný vedlejší produkt.

Tab. 6-11 Srovnání ukazatelů výkonnosti napříč scénáři a zeměmi (kompromisní body)

	Scénář A		Scénář B		Scénář C	
	ČR	Itálie	ČR	Itálie	ČR	Itálie
CAPEX (EUR)	307 903		296 314	297 362	189 370	162 293
OPEX (EUR/rok)	30 716	53 640	100 726	130 615	16 909	20 988
CRN (EUR/rok)	92 297	115 221	159 989	190 088	54 784	53 447
El. příkon (kW)	23,9	23,9	5,9	5,9	13,2	9,4
Tep. příkon (kW)	0,00	0,00	174,6	174,6	0,00	0,00
Emise CO ₂ (t/rok)	104,0	54,3	307,8	295,4	57,3	21,2
CHSK _{voda} (mg/l)	674	674	699	701	3 357	3 351
Redukce CHSK (%)	91,8	91,8	91,5	91,5	59,3	59,4
Výtěžek vody (%)	92,2	92,2	91,0	91,0	95,9	96,4

CHSK _{konc} (mg/l)	41 731	41 731	41 993	41 993	N/A	N/A
Roztok ethanolu (obj.%)	12,3	12,3	8,5	8,5	N/A	N/A
SEC (kWh/m ³)	23,90	23,90	180,48	180,44	13,16	9,35
SOPEX (EUR/m ³)	3,84	6,71	12,59	16,33	2,11	2,62
SCO ₂ (kg/m ³)	13,00	6,79	38,47	36,93	7,16	2,66

Pro nejdůležitější parametry, které je možné mezi jednotlivými scénáři přímo porovnat, je v obr. 6.24 uvedeno normalizované srovnání všech tří scénářů. Rozdíl ve výtěžnosti vody je primárně dán skutečností, že Scénář C neprodukuje ani koncentrát, ani ethanolový roztok. Při zjednodušeném součtu normalizovaných výkonnostních ukazatelů (s výjimkou výtěžnosti vody) dosahuje nejlepšího hodnocení Scénář C, těsně následovaný Scénářem A, zatímco nejhůře si vede Scénář B.



Obr. 6.24 Normalizované hodnocení scénářů A, B a C (vyšší hodnota je výhodnější pro redukci CHSK a výtěžnost vody, nižší hodnota je výhodnější pro CAPEX, OPEX a emise CO₂) pro ČR.

Srovnání jednotlivých scénářů lze shrnout následovně:

- Scénář A představuje nejkomplexnější variantu – vyžaduje vyšší investiční náklady, avšak nabízí relativně nízké provozní náklady a emise CO₂, nejvyšší redukci CHSK a zároveň nejvyšší koncentraci ethanolu ve výstupním roztoku.
- Scénář B by mohl být atraktivní za předpokladu využití odpadního tepla jako zdroje energie, což by vedlo k výraznému snížení provozních nákladů a – v závislosti na použité metodice hodnocení – pravděpodobně i ke snížení emisí CO₂. Za těchto podmínek by byla atraktivita scénářů A a B výrazně vyrovnanější.
- Scénář C je ekonomicky výhodný a vykazuje nízké emise CO₂, nicméně jeho schopnost redukce CHSK je omezená a nevznikají žádné vedlejší produkty.

6.7.3 Další závěry a omezení

Nad rámec podrobného kvantitativního srovnání a analýzy škálovatelnosti je nezbytné věnovat pozornost také dalším aspektům a omezením jednotlivých scénářů.

Za účelem posouzení provozní robustnosti a stability návrhu byly provedeny výpočty při poloviční a dvojnásobné koncentraci znečištění oproti hodnotám uvedeným v tab. 6-2. Výsledky ukazují, že míra redukce CHSK zůstává ve všech případech prakticky nezměněná, což znamená, že úroveň kontaminace vyčištěné vody je přímo úměrná vstupní koncentraci. V praxi to potvrzuje, že příslušné technologie jsou odolné vůči vysokému chemickému zatížení, přičemž jejich relativní výkonnost není těmito špičkami zásadně ovlivněna, i když kvalita vyčištěné vody může být snížena. Vyšší kontaminace zároveň vede k nárůstu koncentrace ethanolu (téměř lineární) ve výstupním roztoku a k lineárnímu zvýšení koncentrace kontaminantů v koncentrátu. Strategie zvládnutí vysokých hodnot CHSK spočívá zejména v snížení refluxního poměru v rektifikační modifikaci (Scénáře A a B) nebo ve zvýšení průtoku vzduchu a/nebo přehřevu vzduchu (Scénář C).

Scénář A vykazuje nejvyšší návrhovou robustnost, neboť jedna z hlavních rozhodovacích proměnných – minimální teplotní příblížení – je shodná pro body DP COST, DP CO₂ i kompromisní bod, a ostatní proměnné (zejména tlak) se mění jen minimálně. Provozní flexibilita je však omezená, neboť hlavním akčním členem je kompresor, jehož provoz je navíc limitován výstupní teplotou.

Scénář B vykazuje vyšší variabilitu návrhových bodů, protože optimální konfigurace se liší zejména ve velikostech teplosměnných ploch, recirkulačním poměru a velikosti komor. Oproti tomu však umožňuje lepší provozní přizpůsobení, a to jak na straně zdroje energie (dodávka tepla), tak i na straně odvodu tepla (chladicí smyčka), což přispívá k vyšší adaptabilitě na proměnlivost odpadní vody.

Scénář C je výrazně citlivější na zvolený návrhový bod, a proto vyžaduje konzervativní přístup k návrhu (předimenzování) pro zajištění stabilního provozu při odchylkách od ideálních podmínek. To zvyšuje riziko, že reálné provozní výsledky se budou odlišovat od zde prezentovaných optim.

Hlavní omezení studie jsou následující:

- Optimalizační rámec nezohledňuje sekundární přínosy, jako jsou zredukované náklady na likvidaci odpadní vody, snížení emisí při nevypouštění neupravené vody, potenciální úspory z opětovného využití vody, nebo zpeněžení získaného ethanolu. Zahrnutí těchto faktorů do budoucích optimalizací by mohlo významně posunout optimální návrhové body a nabídnout komplexnější hodnocení výkonnosti systému.
- Rektifikační modifikace nebyla dosud experimentálně ověřena. Ačkoliv predikce rovnovážných a transportních jevů jsou validní, klíčovým aspektem k ověření je vysoký refluxní poměr, zejména v situaci, kdy parciální kondenzátor využívá rekuperaci tepla s malým teplotním rozdílem. To činí řízení procesu technicky náročným.
- Model předpokládá, že ethanol je hlavním přispěvatelem k CHSK, což je v souladu s literaturou i vlastními experimentálními daty. V některých extrémních případech však tento předpoklad nemusí být plně reprezentativní. Doporučeným směrem dalšího výzkumu je celoroční sledování variability složení odpadních vod (např. obdobně jako [115]) a jeho propojení s optimalizací skladování a provozu vinařství, za účelem

maximalizace účinnosti ethanolem zaměřené úpravy a získání vysoce kvalitní vody a ethanolu.

- Ve Scénáři C je uvažována průměrná roční teplota vzduchu, ačkoliv proces je silně teplotně závislý – výkonnost může být nižší v zimním období a výrazně vyšší v létě. Tato teplotní citlivost by mohla být využita ve prospěch systému, např. využitím odpadního tepla z provozu vinařství (např. z chladicích jednotek) k předehřevu vzduchu. To by sice znamenalo navýšení CAPEX, ale mohlo by to vést k výraznému zlepšení redukce CHSK, blížícímu se Scénářům A a B. Hlavním omezením stripování vzduchem nicméně zůstává její neschopnost odstraňovat cukry a organické kyseliny, což limituje dosažitelnou redukci CHSK přibližně na 73 % pro uvažované složení odpadní vody.
- Pokud by scénář C měl sloužit pro přímou úpravu surové odpadní vody, bylo by nutné odstranit suspendované látky před vstupem do zařízení, případně zavést režim proplachů pro údržbu výplně kolony. Naproti tomu technologie založené na odpařování jsou méně citlivé na obsah pevných látek, což potvrzují jak experimentální data, tak i průmyslové aplikace těchto technologií u proudů s výrazně vyššími koncentracemi nerozpuštěných složek [87].

6.7.4 SWOT analýza scénářů

Pro shrnutí srovnání a nastínění směrů dalšího výzkumu byla pro všechny tři scénáře vytvořena SWOT analýza¹⁷, která je uvedena v tab. 6-12. Tato komplexní kvalitativní syntéza ve spojení s kvantitativními daty z modelu umožňuje vést diskusi, zaměřenou především na srovnání s dosavadními výzkumy a s konvenčními přístupy k čištění odpadních vod z vinařského provozu.

¹⁷ Silné a slabé stránky, jakož i příležitosti a rizika z angl. Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats (SWOT).

Tab. 6-12 SWOT analýza všech tří scénářů.

	Scénář A	Scénář B	Scénář C
Silné stránky	<ul style="list-style-type: none"> • Produkce ethanolového roztoku jako vedlejšího produktu • Relativně nízké provozní náklady a emise CO₂ • Robustní návrh s nízkou citlivostí na rozhodovací proměnné • Odolnost vůči vysoké úrovni kontaminace 	<ul style="list-style-type: none"> • Produkce ethanolového roztoku jako vedlejšího produktu • Nižší měrné investiční náklady při vyšších kapacitách • Vyšší procesní flexibilita oproti scénáři A • Odolnost vůči vysoké úrovni kontaminace 	<ul style="list-style-type: none"> • Nejvyšší procesní flexibilita • Jednoduchý proces s malými nároky na prostor • Nejnížší CAPEX a OPEX, zejména při malých kapacitách
Slabé stránky	<ul style="list-style-type: none"> • Vyžaduje krok nakládání s koncentrátem • Omezená procesní flexibilita 	<ul style="list-style-type: none"> • Vyžaduje krok nakládání s koncentrátem • Vysoké provozní náklady a emise CO₂ při přímém ohřevu zemním plynem 	<ul style="list-style-type: none"> • Nutnost předimenzování kvůli vysoké citlivosti na návrh • Žádné vedlejší produkty • Omezená schopnost separace cukrů a kyselin z vody
Rizika	<ul style="list-style-type: none"> • Náročnost řízení procesu, zejména při aplikaci rektifikační modifikace 	<ul style="list-style-type: none"> • Náročnost řízení procesu, zejména při aplikaci rektifikační modifikace 	<ul style="list-style-type: none"> • Výkyvy výkonnosti v závislosti na teplotě okolí • Usazování nerozpuštěných látek ve výplni • Potenciální emise do ovzduší
Příležitosti (budoucí práce)	<ul style="list-style-type: none"> • Zlepšení kvality vyčištěné vody na úroveň vhodné pro zpětné využití • Zvýšení koncentrace roztoku ethanolu pro vyšší tržní hodnotu • Využití koncentrátu pro výrobu bioplynu (koncept biorafinérie) • Využití obnovitelných zdrojů energie pro snížení OPEX a emisí CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Zlepšení kvality vyčištěné vody na úroveň vhodné pro zpětné využití • Zvýšení koncentrace roztoku ethanolu pro vyšší tržní hodnotu • Využití koncentrátu pro výrobu bioplynu (koncept biorafinérie) • Využití odpadního tepla, či tepla z obnovitelných zdrojů pro eliminaci méně příznivého 	<ul style="list-style-type: none"> • Předehřev vzduchu s využitím odpadního tepla ke stabilizaci či zvýšení účinnosti • Využití obnovitelných zdrojů energie ke snížení emisí • Integrace do hybridního systému jako doplněk ke Scénáři A či B

6.7.5 Diskuze

Téměř dvě desetiletí po průkopnické práci Colina et al. (2005) [77], zaměřené na čištění vinařských odpadních vod se zvláštním důrazem na odstraňování ethanolu, tato studie navazuje a významně rozšiřuje její závěry. Předkládá komplexní, prakticky orientovanou analýzu tří různých konfigurací procesu ve dvou zemích, včetně technicko-ekonomického hodnocení a kvantifikace provozních emisí CO₂. Navíc byl pro každou konfiguraci vytvořen vhodný rámec pro optimalizaci návrhu, přičemž byla rovněž posouzena jejich škálovatelnost.

Zatímco obecný přístup této studie spočívá v izolovaném hodnocení tří samostatných konfigurací, pro účely přímého srovnání s prací Colina et al. byla rovněž posouzena hybridní konfigurace, ve které jsou jednotky odpařování a stripování zařazeny za sebou, což bylo identifikováno jako perspektivní varianta ve SWOT analýze. Toto vyhodnocení podtrhuje celkový potenciál technologií zaměřených na odstraňování ethanolu pro účely recyklace a opětovného využití vody.

V případě sekvence stripování–odpařování (Scénář C + Scénář A) dosahuje celková redukce CHSK 97,6 %, přičemž CHSK vyčištěné vody činí 199 mg/l. Tato varianta je však spojena s výrazně nižší koncentrací ethanolu ve výstupním roztoku, protože většina ethanolu je odstraněna již během stripování. Opačné uspořádání – odpařování–stripování – umožňuje zachování záchyty ethanolu a zároveň přináší výhodu, že voda vstupující do stripovací jednotky již neobsahuje suspendované látky a cukry. V tomto případě je redukce CHSK nepatrně vyšší (97,8 %, CHSK vody = 185 mg/l), avšak za cenu nižší výtěžnosti vody (86,8 % oproti 88,6 %).

Colin et al. uvádějí, že samotné stripování vedlo k redukci CHSK v rozsahu 78–85 %, zatímco tato studie pracuje s návrhovou hodnotou 60 %. Maximální dosažitelné hodnoty pro uvažované teploty činí 64,7 % (Česko) a 68,6 % (Itálie), s teoretickým maximem ~73 % při přehřevu vzduchu. Mírný rozdíl lze přičíst nižším koncentracím netěkavých cukrů ve studii Colina et al. a použití jiného stripovacího média (pára vs. vzduch). Celková redukce CHSK po obou procesech dosahovala ve studii Colina et al. 99–99,7 %, což je srovnatelné s výsledky této studie, zejména vzhledem k výše uvedeným rozdílům ve stripovací účinnosti.

Zatímco Colin et al. navrhuje stripování jako předúpravu, tato studie ukazuje, že jeho použití jako dočišťovacího kroku je rovněž atraktivní a může přinést další výhody. Z hlediska energetické náročnosti odpovídají výsledky této studie závěrům Colina et al., kteří uváděli elektrickou spotřebu 25 kWh/m³. V této studii dosahuje spotřeba pro hybridní, avšak neoptimalizovaný scénář v Itálii hodnoty 33,4 kWh/m³. Colin et al. však rovněž uvádějí spotřebu páry 80 kg/m³, což odpovídá cca 48 kWh/m³ tepelné energie, takže emise CO₂ v této studii jsou výrazně nižší (na úrovni 56 % pro italské emisní faktory), pravděpodobně díky vyšší účinnosti vícestupňového odpařování.

Colin et al. rovněž diskutují konkurenceschopnost této technologie vůči konvenčním biologickým procesům. Vzhledem k rozsahu této studie lze nyní toto srovnání kvantifikovat, zejména z ekonomického hlediska. Sekvenční vsádkové reaktory (SBR) jsou hojně využívány ve vinařství [54], a to zejména pro menší provoz [116].

Při stanovení objemu SBR byl použit objemový organický náboj 0,8 kg_{CHSK}/m³ · d⁻¹ [117] což odpovídá novějším studiím uvádějícím typický rozsah 0,5–1,5 kg_{CHSK}/m³ · d⁻¹, přičemž vyšší účinnosti CHSK se dosahuje při nižších hodnotách – až

k $0,3 \text{ kg}_{\text{CHSK}}/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ [51]. Tyto systémy obvykle dosahují účinnosti redukce CHSK 93–99 %, nicméně při sezónních špičkách byly zaznamenány poklesy pod 90 % [51], což znevýhodňuje SBR oproti technologiím zaměřeným na ethanol.

Pro průtok $1 \text{ m}^3/\text{h}$ vychází potřebný objem SBR $247,5 \text{ m}^3$ a při měrných investičních nákladech $2146 \text{ EUR}/\text{m}^3$ lze CAPEX odhadnout na $531\,079 \text{ EUR}$. Energetická náročnost SBR byla odhadnuta na $3,3 \text{ kWh}/\text{kg}_{\text{CHSK}}$ dle [118], což odpovídá el. příkonu $27,2 \text{ kW}$. Tento údaj je však optimistický – Bolzonella et al. (2019) uvádějí rozsah $2\text{--}15 \text{ kWh}/\text{kg}_{\text{CHSK}}$, s průměrem $7,4 \text{ kWh}/\text{kg}_{\text{CHSK}}$ na základě šesti vinařských ČOV [51]. Li et al. dále uvádějí, že tvoří energie $25\text{--}60\%$ celkových provozních nákladů (OPEX) [118], nicméně pro spravedlivé srovnání nejsou další složky OPEX zohledněny ani v jednom případě

Ve srovnání se scénářem A je CAPEX technologie SBR o $58\text{--}72\%$ vyšší pro kapacity $0,5\text{--}3 \text{ m}^3/\text{h}$, přičemž i optimistický odhad OPEX ukazuje, že provozní náklady SBR jsou o 14% vyšší. Dokonce i výše diskutovaná hybridní konfigurace (Scénář A + C) se ukazuje jako ekonomicky konkurenceschopná, s o $6\text{--}13\%$ nižším CAPEX, byť s o 23% vyšší energetickou náročností. Tato dodatečná spotřeba by však mohla být významně snížena integrací tepla mezi oběma procesy, neboť hybridní konfigurace byla hodnocena pouze ilustrativně a nebyla optimalizována.

Závěrem lze konstatovat, že technologie zaměřené na odstraňování ethanolu přinášejí oproti SBR několik významných výhod: a) ekonomická konkurenceschopnost i pro malé vinařské provozy, b) redukce CHSK je prakticky nezávislá na vstupní kontaminaci, což zajišťuje funkční stabilitu během období vinobraní, c) produkce ethanolového roztoku jako hodnotného vedlejšího produktu, d) na rozdíl od kalu z biologického čištění umožňuje koncentrát lepší zachování organických látek, a tím vyšší potenciál pro výrobu bioplynu, e) kompaktní konstrukce zařízení, vyžadující menší prostor a nižší nároky na stavební úpravy.

6.8 Shrnutí případové studie

Tato studie dokládá inovativní potenciál technologií zaměřených na odstraňování ethanolu při úpravě odpadních vod z vinařského provozu prostřednictvím hodnocení tří pro daný účel navržených konfigurací: vícestupňové odparky s mechanickou kompresí (MEE-MVC), vícestupňové mžikové odparky (MSF) a vzduchové stripovací kolony (AS). Pomocí na míru šitých optimalizačních postupů byla identifikována robustní kompromisní řešení mezi ekonomickou proveditelností a environmentální výkonností, čímž bylo potvrzeno, že nákladová efektivita a udržitelnost mohou být do značné míry ve shodě.

Systém MEE-MVC vyniká schopností produkovat vysoce kvalitní ethanolový roztok společně s vyčištěnou vodou, čímž podporuje zpětný zisk a využití. Obdobně i systém MSF vykazuje robustní provozní parametry a příznivější investiční náklady s rostoucím měřítkem, díky čemuž je atraktivní zejména pro větší provozy. Naproti tomu stripování vzduchem představuje kompaktní a investičně nenáročné řešení, které však neumožňuje získávání koncentrovanějšího ethanolu ani recyklaci vody, a je proto vhodné spíše jako předúprava nebo součást hybridních systémů určených k dočištění.

Klíčová zjištění zahrnují:

- **Robustní charakter:** Všechny konfigurace dosahují významné redukce CHSK (v odpařovacích systémech přesahující 90 %), což je řadí mezi konkurenceschopné alternativy ke konvenčním biologickým metodám.
- **Spojené ekonomické a environmentální přínosy:** Vyvinuté optimalizační postupy umožnily identifikaci vyváženého kompromisu mezi celkovými ročními náklady a emisemi CO₂. Tento multikriteriální přístup podporuje snížení spotřeby energie i minimalizaci environmentální a uhlíkové stopy, a je v souladu s širšími Cíli udržitelného rozvoje (SDGs).
- **Škálovatelnost a provozní odolnost:** Hodnocené technologie prokázaly vysokou adaptabilitu pro různé kapacity, což je činí vhodnými pro malá i velká vinařství, přičemž robustnost návrhu zajišťuje stabilní výkonnost i při sezónních a provozních výkyvech.
- **Konzervativní porovnání:** Studie byla záměrně založena na konzervativním scénáři se vstupy energie z fosilních paliv, čímž poskytuje poměrně přísné srovnání s tradičními technologiemi. Přesto se navrhované konfigurace ukázaly jako konkurenceschopné, a zároveň bylo prokázáno, že integrací obnovitelných zdrojů lze environmentální přínosy dále výrazně zvýšit.

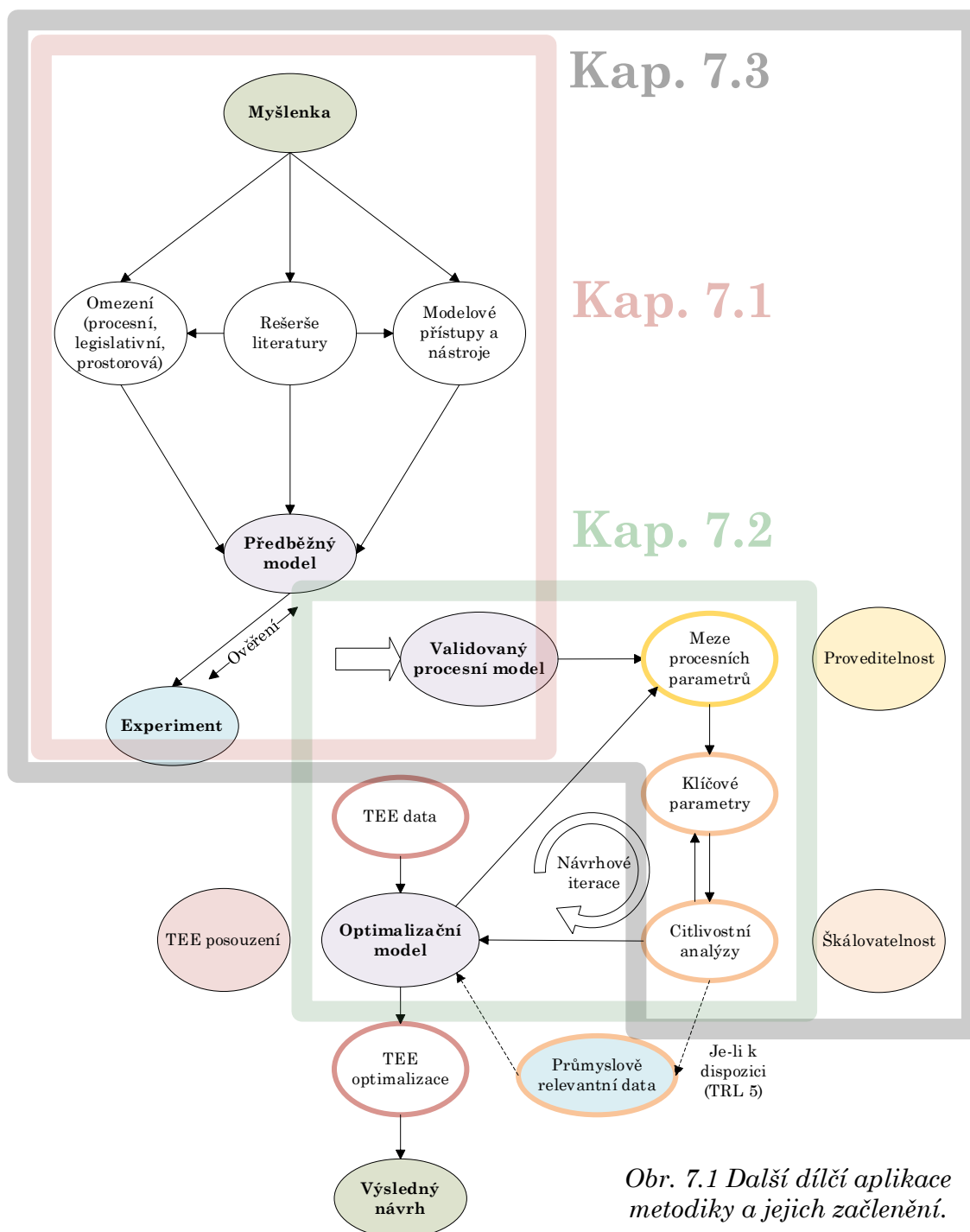
Budoucí výzkum by se měl zaměřit na integraci hybridních koncepcí s obnovitelnými zdroji energie a na dynamickou adaptaci procesu, s cílem dále optimalizovat technologie orientované na odstraňování ethanolu. Takové přístupy mohou snížit spotřebu energie a emise CO₂, zvýšit provozní flexibilitu a současně posílit zhodnocení hodnotných látek. Zvláště slibná je integrace obnovitelné elektřiny, odpadního tepla a dalších nízkouhlíkových zdrojů, která může výrazně zlepšit jak environmentální výkonnost, tak ekonomickou proveditelnost. Tyto strategie rovněž podporují vyšší kvalitu vyčištěné vody, vyšší koncentraci ethanolu a možnost výroby bioplynu z koncentrátu, čímž přispívají k naplňování cílů cirkulární ekonomiky a uhlíkové neutrality v rámci vinařského průmyslu.

Samotná hybridní koncepce je momentálně již dále vyvíjena v rámci projektu R3WISION. V souladu s ochranou duševního vlastnictví a zásadou „otevřeno jak jen možno“ je tato navazující práce představena v kap. 7.2.

Celkově výsledky této studie nejenže rozšiřují poznání v oblasti čištění odpadních vod z vinařství, ale zároveň přispívají k rozvoji udržitelného hospodaření s vodou a principů cirkulární ekonomiky v odvětví. Prokázaná schopnost současného dosažení ekonomických a environmentálních cílů činí tyto technologie perspektivní cestou k udržitelnému opětovnému využití vody a získávání surovin v dalších příbuzných průmyslových aplikacích (např. pivovary, lihovary).

7 Inovační potenciál metodiky a budoucí práce

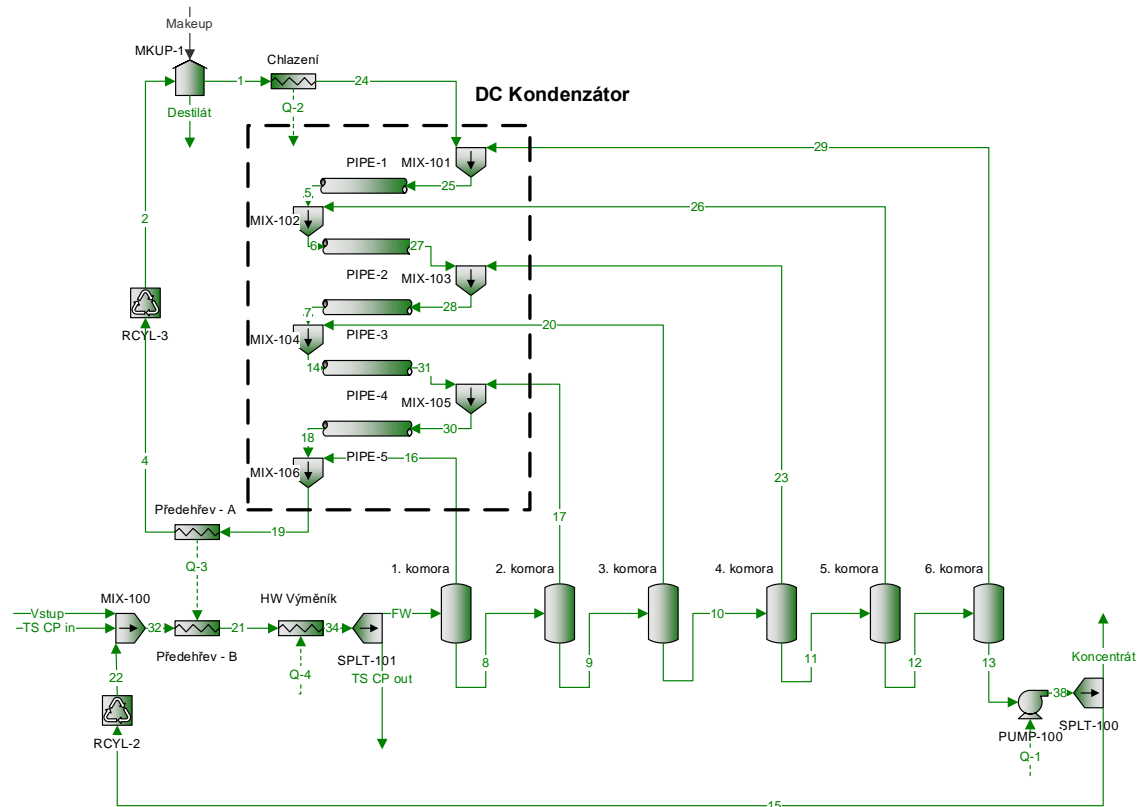
Tato kapitola je přehledem dílčích aplikací metodiky v rámci trojice aktuálních či nedávno dokončených výzkumných projektů ze tří rozličných oblastí. U této trojice je důraz kladen jednak na inovativnost řešení, jednak na osobní přínos autora. Kapitola 7.1 ukazuje aktivity v rámci projektu REDIGE (Pilotní jednotka pro redukci digestátu v bioplynových stanicích), kapitola 7.2 se věnuje projektu R3VISION (Jednotka pro oběhové vodní hospodářství ve vinařských provozech) a kapitola 7.3 prezentuje nasazení v projektu RECOVOS (Jednotka přímé osmózy pro recyklaci průmyslových odpadních vod). Následující obrázek rámcově ukazuje, které části metodiky jsou pro každou tuto kapitolu relevantní.



Obr. 7.1 Další dílčí aplikace metodiky a jejich začlenění.

7.1 Pilotní jednotka pro zahušťování digestátu

V rámci projektu REDIGE bylo navrženo inovativní řešení přímého kondenzátoru brýdových par, pracovně označovaného jako DC¹⁸ kondenzátor. V souladu s metodikou byla tato myšlenka po úvodním sběru dat transformována do **předběžného modelu** (viz obr. 7.2), kde lze blíže zkoumat parametry průtoku v chladicí smyčce, teplotního přiblížení mezi sloupcem kapaliny a brýdovými parami, zpětného zisku tepla v předehřevu, geometrie kondenzátoru či tlakových poměrů.



Obr. 7.2 Snímek zachycující konfiguraci předběžného modelu; jednotlivé úseky PIPE-1 až PIPE-5 představují vertikální inkrementy DC kondenzátoru mezi přípojnými hrdly brýdových par z komor (v tomto případě konfigurace se 6 komorami).

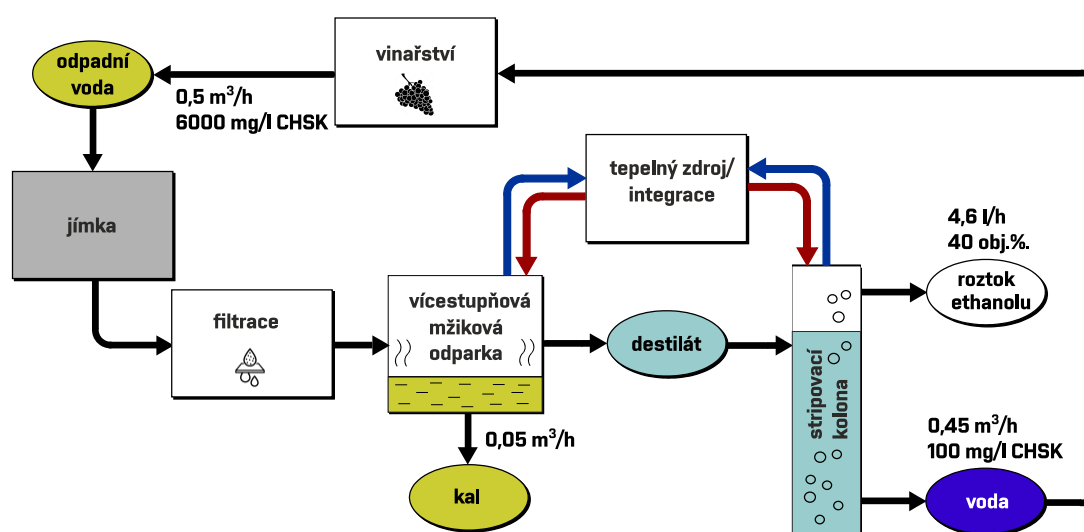
Na základě tohoto předběžného výpočtu byl navržen prototyp DC kondenzátoru o průměru 200 mm se sypanou výplní a dvěma vstupy pro brýdové páry, s následným **experimentem**. Hlavním parametrem k ověření bylo teplotní přiblížení, které při přímém kontaktu typicky nelze v konvenčních simulačních software predikovat. Odhadované teplotní přiblížení 3–5 K bylo v rámci experimentů ověřeno, díky čemuž **validovaný procesní model** této jednotkové operaci mohl být zapracován do celkové koncepce pilotní jednotky.

Toto řešení je chráněným průmyslovým vlastnictvím jako užitný vzor č. 37499 *Zařízení pro kondenzaci brýdových par z vícestupňové odparky*. Hlavní výhody tkví v **nahrazení obvyklé, investičně náročné série kondenzátorů** (pro každou komoru zvláště) **jedním kompaktním kondenzátorem**, dále **snazším řízením tlaků mezi komorami a snížené potřebě údržby**.

¹⁸ Z angl. Direct Contact = přímá kondenzace brýdových par v objemu kapaliny.

7.2 Poloprovozní jednotka na zpracování vinařských odpadních vod

Souběžně s komplexním posouzením individuálních procesních konfigurací popsaných v případové studii kap. 6 dochází k vývoji **poloprovozní recyklační jednotky**, která bude v roce 2025 nasazena v konkrétním vinařství. Ta dále rozvíjí myšlenku hybridní konfigurace, systematictější procesní výměny tepla i environmentálně přívětivějších zdrojů energie. Vzhledem k inovativnímu charakteru řady dílčích technologických řešení a ochraně komerčních zájmů, včetně možného patentové přihlášky, se následující text omezuje na publikovatelné výstupy primárně metodického charakteru.



Obr. 7.3 Základní uspořádání poloprovozní jednotky na zpracování OVV, se zpětným využíváním vody ve vinařství a produkcí roztoku ethanolu o vyšší koncentraci; ukázána je predikovaná materiálová bilance a kvalita výstupních proudů.

Poloprovozní jednotka by oproti konvenčním technologiím i výsledkům případové studie měla poskytovat následující výhody:

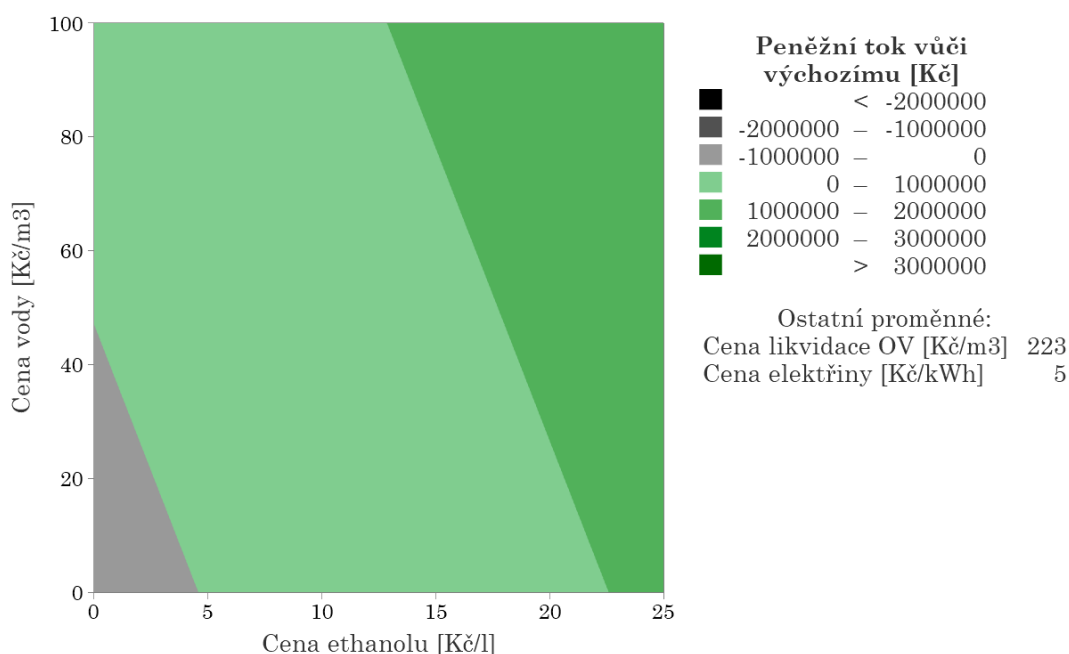
- modulární kontejnerové řešení redukující dobu a rozsah stavebních prací,
- srovnatelné provozní náklady,
- dodatečné výnosy plynoucí z vedlejších produktů (zejm. roztoku ethanolu, oproti případové studii 3–5krát koncentrovanějšího),
- dosažená úroveň kvality a tím možnosti recyklace vody (může přispět k také k lepšímu jménu vinařství díky udržitelnějšímu provozu).

V rámci řešení tohoto projektu se nadále uplatňuje metodika z kap. 5.3. Níže je uveden příklad **ekonomického hodnocení, proveditelnosti** (ve smyslu konkurenceschopnosti oproti konvenčním technologiím) a **citlivostních analýz**.

Vzhledem k místním specifikům a možné fluktuaci ekonomických parametrů ovlivňujících provozní náklady a výnosy technologie, byla provedena holistická citlivostní analýza uvažující široký rozsah čtveřice parametrů:

- cena vody 0–100 Kč/m³,
- prodejní cena ethanolové vody 0–25 Kč/l,
- náklady na likvidaci odpadní vody 0–500 Kč/m³,
- cena elektřiny 0–10 Kč/kWh.

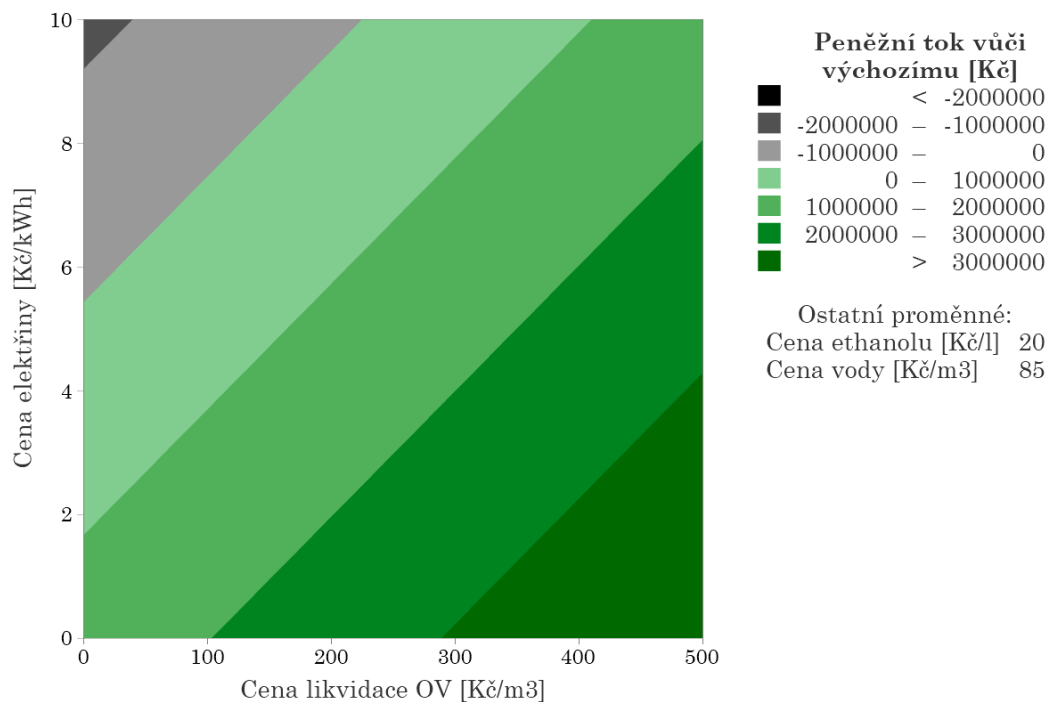
Pro potřeby vizualizace byly vždy dva parametry zafixovány na hodnotách odpovídající výchozímu případu (kapacita 1 m³/h, cena vody 85 Kč/m³, cena ethanolového produktu 20 Kč/l, cena elektřiny 5 Kč/kWh, údržba 130 000 Kč/rok). Jak ukazuje obr. 7.4, že s výjimkou dostupnosti velmi levné vody (vlastní studna ve vinařství) a současné neprodejnosti ethanolového produktu je recyklační technologie výhodnější oproti konvenčním technologiím.



Obr. 7.4 Vrstevnicový graf peněžního toku recyklační technologie v závislosti na ceně vody a ceně ethanolového produktu; zelená oblast vyznačuje výhodnost recyklační technologie¹⁹.

Zajímavý je graf, který umožňuje srovnání s externími subjekty, které mohou pro vinařství odpadní vody likvidovat. Dle konzultací s provozovateli vinařství se náklady s tímto spojené skládají z dopravy (cca 30–60 Kč/m³) a samotného zpracování, jehož cena může mít výrazný rozptyl, dle informací od 100 Kč (bioplynová stanice) po 700 Kč/m³ (externí ČOV). Jak ukazuje obr. 7.5, zejména v případě externí ČOV tyto ušetřené náklady spolehlivě kompenzují případné vyšší ceny elektřiny.

¹⁹ Fixní hodnota likvidace OV ve výši 223 Kč/m³ je hodnota odpovídající stavu, kdy biologická ČOV pokrývá náklady, což umožňuje předmětné porovnání.

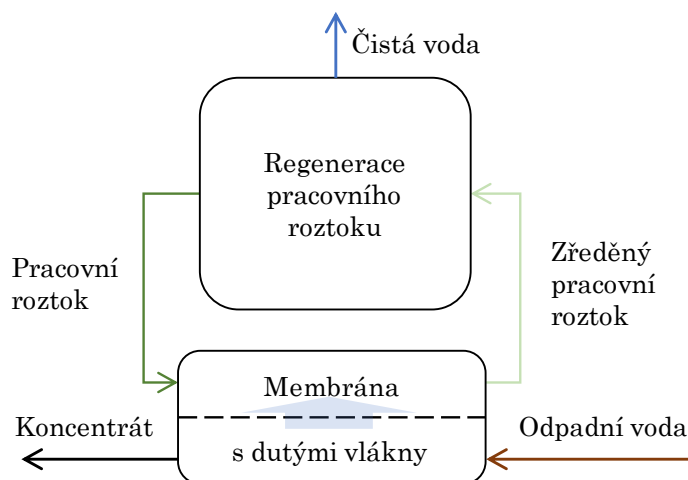


Obr. 7.5 Peněžní tok recyklační technologie jako funkce na ceny vody a ceny elektřiny.

Tyto výsledky ukazují, že **posun technologie** od prostého čištění odpadních vod (téměř výlučně se záporným peněžním tokem) **směrem k recyklaci usnadňuje investiční rozhodování vinařství a představuje přidanou hodnotu v podobě možné návratnosti v řádu let.**

7.3 Adaptace přímé osmózy na průmyslové odpadní vody

Poslední prezentovaná dílčí aplikace metodiky je v rámci projektu RECOVOS, v němž se autor v roli hlavního řešitele zaměřuje na recyklaci průmyslových odpadních vod pomocí membránového procesu přímé osmózy. Ta je schematicky zachycena na obr. 7.6.



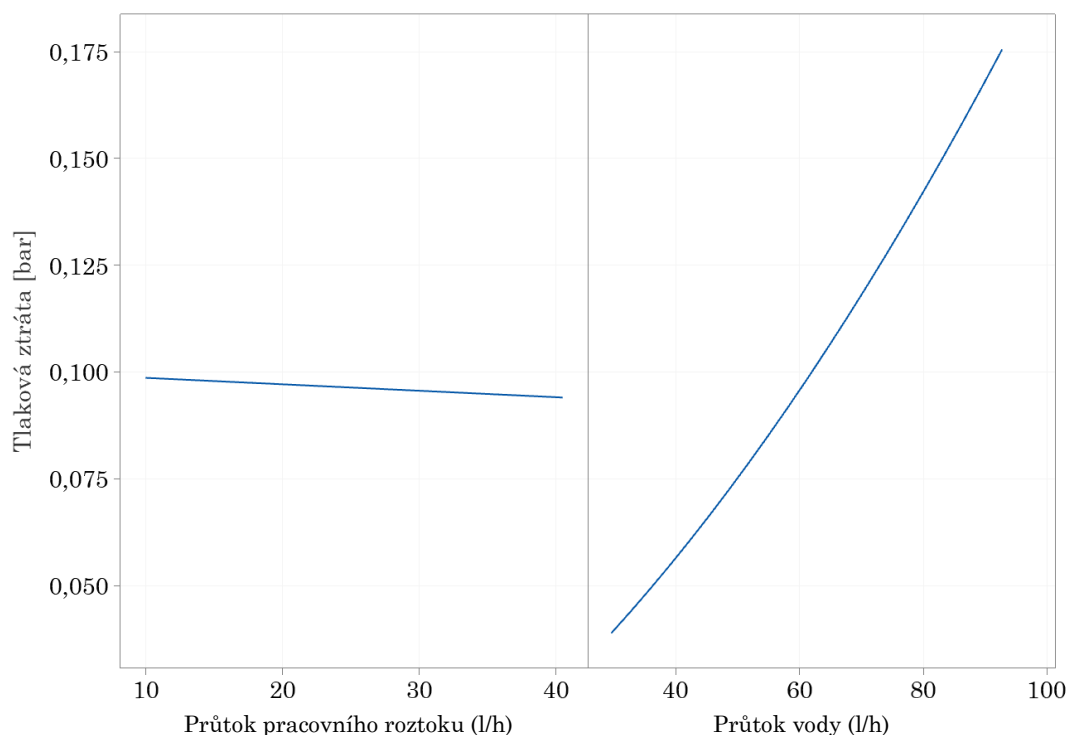
Obr. 7.6 Základní uspořádání a procesní proudy v jednotce přímé osmózy.

Rozvíjeny zde byly aktivity od prvotní **myšlenky**, přes **sběr dat** a **vytvoření předběžného modelu** pro návrhové účely, až po stavbu a vývoj funkčního vzorku. Na tu navázala **experimentální činnost**, vznik **validovaného procesního modelu a technická optimalizace** (s přesahem do ekonomiky, ale prozatím bez konkrétní kvantifikace).

Předběžný model se zaměřoval zejména na hydraulické aspekty jednotky a umožňující vyhodnocovat rozličné provozní stavy vč. mezních stavů, kterých by na reálné jednotce bylo nebezpečné či nemožné dosáhnout. Mimo jiné obsahuje dílčí modely tlakové ztráty membránových modulů, které byly vytvořeny reverzním inženýrstvím, protože přesná geometrie je předmětem utajovaného know-how výrobce. Díky vyhodnocení mezních hodnot průtoků, tlaků a pracovních bodů čerpadla byly zvoleny konkrétní typy průtokoměrů a tlakoměrů.

Tento model také umožnil realizovat univerzální design, ve kterém jsou osazeny membrán dvou různých kapacit: menší o jmenovité kapacitě 60 l/h, která umožní déleodobé testy zanášení a provozní stability při únosných objemech nádrží, o jmenovité kapacitě 400 l/h, která představuje průmyslově relevantní use case (bude zdrojem **průmyslově relevantních dat**).

Úvodní experimenty byly koncipovány jako plánovaný experiment, díky kterému byla vyhodnocena **citlivost jednotky na trojici klíčových parametrů** (na obr. 7.7 je pro ilustraci ukázána závislost tlakové ztráty na straně odpadní vody – ta protéká dutá vlákna). Vzniklé regresní modely byly využity pro **minimalizaci** koncentrace a objemu pracovního roztoku a nalezení provozního bodu pro experimenty s reálnými odpadními vodami.



Obr. 7.7 Vliv klíčových proměnných na tlakovou ztrátu podél dutých vláken (strana odpadní vody).

V aktuálním, druhém roce řešení projektu pokračují činnosti směrem **TEE posouzení**, které z velké části závisí na plánovaných činnostech na, aktuálně již osazené, větší membráně.

7.4 Budoucí práce

Na základě souboru zjištění této dizertační práce lze identifikovat několik perspektivních směrů dalšího výzkumu:

- **Integrace hierarchie technologií** (vertikální rozšíření) včetně pokročilých membránových procesů dostupných na Ústavu procesního inženýrství (mikrofiltrace, ultrafiltrace, reverzní a přímá osmóza);
- **Horizontální rozšíření** aplikovatelnosti metodiky na další typy průmyslových odpadních vod;
- **Začlenění environmentálních a socioekonomických aspektů** prostřednictvím hodnocení životního cyklu (LCA²⁰);
- **Aplikace na hybridní systémy** kombinujících membránové a tepelné procesy;
- **Inteligentní optimalizace procesů** s využitím pokročilých simulačních a prediktivních nástrojů.

Nejbližším logickým krokem rozvoje metodiky je její komplexní aplikace na pokročilé membránové procesy, kterými Ústav procesního inženýrství disponuje. Konkrétně se nabízí začlenění mikrofiltrace, ultrafiltrace, reverzní osmózy a přímé osmózy do hierarchického rámce procesních technologií. Tento přístup umožní detailnější selekci vhodné technologie na základě typu a charakteru odpadní vody, cílové kvality produktu a ekonomických i environmentálních aspektů provozu. Vytvoření hierarchického modelu technologií včetně jasně definovaných přechodových kritérií mezi jednotlivými technologiemi by zároveň přispělo k systematictějšímu návrhovému postupu.

Horizontální rozšíření metodiky představuje její adaptaci na širší spektrum průmyslových odpadních vod. Vedle digestátu a vinařských odpadních vod se nabízí aplikace na odpadní vody z potravinářského průmyslu (např. pivovarnictví, mlékárenská výroba), automobilního průmyslu, prádelny či recyklace plastů. Každý typ vody přináší specifické výzvy – od vysoké variability organického zatížení přes přítomnost těžkých kovů až po přítomnost mikropolutantů. Testování a adaptace metodiky v těchto oblastech by prokázala její robustnost a zároveň umožnila vybudovat širší znalostní bázi aplikovatelnosti.

S ohledem na rostoucí důraz na udržitelnost je vhodné rozšířit návrhovou metodiku o nad rámec provozních emisí CO₂, konkrétně o hodnocení environmentálních dopadů pomocí analýzy životního cyklu (LCA). Tento přístup umožní kvantifikovat nejen přímé dopady technologie (např. spotřebu energie a vody), ale také nepřímé externality (např. produkci emisí skleníkových plynů, spotřebu surovin). Integrace LCA již v raných fázích návrhu poskytne komplexnější podklad pro rozhodování mezi alternativními technologiemi a podpoří výběr řešení optimalizovaných nejen ekonomicky, ale i environmentálně.

Další směr rozvoje spočívá v důrazu na hybridní systémy, které se v případové studii ukázaly jako perspektivní. Konkrétněji je možné uvažovat o doposud nezahrnutých

²⁰ Z angl. Life-Cycle Assessment

kombinacích membránových a odpařovacích technologií, případně stripování či krystalizace. Hybridní přístupy umožňují zvýšit účinnost procesu, snížit energetickou náročnost a dosáhnout vyšší kvality recyklované vody. Výzkum by měl být zaměřen na identifikaci optimálních kombinací technologií v závislosti na vlastnostech odpadní vody a cílové kvalitě produktu.

S narůstající komplexitou technologií a požadavků na jejich flexibilitu je žádoucí rozvoj nástrojů pro inteligentní návrh a optimalizaci procesů. Perspektivní cestou je využití pokročilých simulačních nástrojů v kombinaci se strojovým učením, které umožní predikci chování systému v širokém rozsahu provozních podmínek a rychlou identifikaci vhodných procesních konfigurací. Vytvoření digitálních dvojčat (digital twins) vybraných procesů může výrazně urychlit návrhovou fázi, usnadnit škálování technologií a umožnit dynamické řízení v reálném čase.

Závěr

Tato dizertační práce představila systematický postup vedoucí k vytvoření a prvotnímu ověření **metodiky pro ekonomický a environmentální návrh technologií recyklace průmyslových odpadních vod** se zaměřením na oblast minimalizace/eliminace vypouštění odpadních vod (MVOV/EVOV).

Dizertační práce přispívá aktuálnímu stavu poznání dvěma zásadními způsoby: **a) představuje komplexní metodiku s významným aplikačním a inovačním potenciálem** doloženým nasazením v trojici výzkumných projektů v mladém odvětví MVOV/EVOV, **b) prezentuje samostatné vědecké výstupy (zejména v oblasti odpadních vod z vinařství)**, které s využitím metodiky vznikly.

Práce byla strukturována do **šesti dílčích cílů (kap. 1)**. Nejprve byl formulován **výchozí přístup** k tématu, který reflektoval aktuální výzvy v oblasti hospodaření s vodou, nedostatku přírodních zdrojů a legislativních požadavků Evropské unie (kap. 2). Následně byla provedena **rešerše odborné literatury**, jež identifikovala klíčová bílá místa ve výzkumu MVOV/EVOV (kap. 3). Dalším krokem byla **volba oblastí aplikovatelnosti**, v rámci níž byly vybrány odpadní vody z vinařství a digestát z bioplynových stanic a v těchto oblastech byl popsán současný stav poznání (kap. 4).

Vytvoření předběžné metodiky vycházelo z rozdělení návrhového procesu do fází sběru dat, proveditelnosti, škálovatelnosti a optimalizace s ohledem na ekonomická, příp. environmentální kritéria (kap 5.1). V rámci kap. 5.2 a 5.3 je popsáno **vylepšení předběžné metodiky** na základě zjištění z praktické aplikace zahušťování digestátu v BPS: bylo provedeno **zpřesnění názvosloví** a kategorizace jednotlivých kroků, **včlenění návrhových iterací** s vazbou na provozní data a bližší upřesnění **aplikovatelnosti dle úrovně technologické připravenosti (TRL)**.

Výsledná metodika byla aplikována na **případovou studii vinařských odpadních vod** (kap. 6), která byla analyzována ve třech technologických scénářích:

- A: vícestupňová odparka s mechanickou kompresí par (MEE-MVC),
- B: vícestupňová mžiková odparka (MSF),
- C: vzduchová stripovací kolona.

Výsledky případové studie ukázaly, že **Scénář A (MEE-MVC)** dosahuje **redukce CHSK >91 %**, energetické náročnosti **23,9 kWh/m³** a **emisí CO₂ na úrovni 6,8 kg/m³** při italských provozních podmínkách. Výsledky pro hybridní řešení kombinující scénáře A a C naznačují potenciál **~98% redukce CHSK** při energetické náročnosti kolem **35 kWh/m³**. Validace modelů experimentálními daty prokázala přesnost a/nebo konzervativní charakter predikcí pro klíčové parametry jako je koncentrace ethanolu v destilátu či vystripované vodě.

Mimořádnou přidanou hodnotou této práce je zaměření na **tělavé organické látky, zejména ethanol**, které jsou v kontextu vinařských odpadních vod hlavními přispěvateli organického znečištění. **Velmi zajímavým vzorcem identifikovaným týmem Ústavu procesního inženýrství je opomíjení tělavého ethanolu jako hlavního přispěvatele organického znečištění.** Až na jedinou známou studii doposud neexistovala cílená technologická řešení zaměřená na tento aspekt, což podtrhuje originalitu a perspektivnost zde prezentovaného přístupu.

Vedle hlavní případové studie **byl ukázán inovační potenciál metodiky dílčími aplikacemi v dalších aktuálních výzkumných projektech** Ústavu procesního inženýrství (kap. 7). Za zmínku stojí zejména na výsledcích případové studie stavějící vývoj **poloprovozní recyklační jednotky pro vinařství** s očekávaným zprovozněním v roce 2025 a vyšší kvalitou produktů (vyšší koncentrace ethanolové roztoku, lepší potenciál pro znovuvyužití vody). Taktéž bylo zahájeno **vertikální rozšíření aplikací metodiky** v rámci hierarchie technologií o **membránový proces přímé osmózy**. Tento krok otevírá nové možnosti v oblasti hybridních systémů kombinujících separační a koncentrační operace, a přináší metodice vyšší míru prokazatelné univerzálnosti.

Budoucí práce bude zaměřena především na:

- využití metodiky v oblasti tlakových membránových procesů, které v hierarchii MVOV/EVOV hrají důležitou roli (vertikální rozšíření),
- ověření metodiky na širším spektru odpadních vod s různým charakterem znečištění (horizontální rozšíření),
- rozvoj prediktivních modelů umožňujících rychlé adaptace návrhů při změnách vstupních podmínek, a
- rozšíření optimalizačních kritérií o aspekty životního cyklu technologií (LCA).

Výsledky této práce potvrzují, že obor **minimalizace vypouštění odpadních vod (MVOV/EVOV)** se **posouvá díky vznikajícím metodikám a velmi aktivním výzkumu do fáze komplexního přístupu, potažmo rozšířených komerčních aplikací**. Vyvinutá metodika představuje nejen nástroj pro efektivní návrh technologií, ale i **platformu pro propojení ekonomických, environmentálních a technologických aspektů**. V globálním měřítku se tak práce významně podílí na prosazování principů cirkulární ekonomiky a odpovědného nakládání s vodními zdroji – klíčových pilířů udržitelného rozvoje 21. století.

Seznam použitých zdrojů

- [1] JOSÉ COCA-PRADOS a GEMMA GUTIÉRREZ-CERVELLÓ. *Water Purification and Management* [online]. 1. vyd. Dordrecht: Springer, 2011 [vid. 2022-06-28]. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. ISBN 978-90-481-9774-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-90-481-9775-0
- [2] UNESCO WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. *The United Nations World Water Development Report 2024: water for prosperity and peace* [online]. B.m.: UNESCO, 2024 [vid. 2025-04-26]. ISBN 978-92-3-100657-9. Dostupné z: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388948>
- [3] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *Europe's state of water 2024 – The need for improved water resilience* [online]. B.m.: Publications Office of the European Union, 2024. Dostupné z: doi:doi/10.2800/02236
- [4] ABDELFATTAH, I. a A. M. EL-SHAMY. Review on the escalating imperative of zero liquid discharge (ZLD) technology for sustainable water management and environmental resilience. *Journal of Environmental Management* [online]. 2024, **351**, 119614 [vid. 2025-04-26]. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi:10.1016/J.JENVMAN.2023.119614
- [5] PROCHÁZKOVÁ, Michaela, Michal TOUŠ, David HORŇÁK, Václav MIKLAS, Marek VONDRA a Vítězslav MÁŠA. Industrial wastewater in the context of European Union water reuse legislation and goals. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2023, **426**, 139037 [vid. 2024-09-19]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/J.JCLEPRO.2023.139037
- [6] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse. *Official Journal of the European Union* [online]. 2020 [vid. 2022-04-12]. Dostupné z: <http://www.bbc.com/news/world-europe-40803619>
- [7] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast). *Official Journal of the European Union*. 2024.
- [8] DIRECTORATE-GENERAL FOR ENVIRONMENT. *Call for evidence begins on EU Water Resilience Strategy - European Commission* [online]. 2025 [vid. 2025-04-26]. Dostupné z: https://environment.ec.europa.eu/news/call-evidence-begins-eu-water-resilience-strategy-2025-02-04_en
- [9] MANSOUR, Fatima, Sabla Y. ALNOURI, Mahmoud AL-HINDI, Fouad AZIZI a Patrick LINKE. Screening and cost assessment strategies for end-of-Pipe Zero Liquid Discharge systems. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2018, **179**, 460–477 [vid. 2025-04-29]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.01.064
- [10] EL CHAM, Edgard, Sabla ALNOURI, Fatima MANSOUR a Mahmoud AL-HINDI. Design of end-of-pipe zero liquid discharge systems under variable operating parameters. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, **250**,

- 119569 [vid. 2025-04-29]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/J.JCLEPRO.2019.119569
- [11] MORGANTE, C., F. VASSALLO, C. CASSARO, G. VIRRUSO, D. DIAMANTIDOU, N. VAN LINDEN, A. TREZZI, C. XENOIANNI, R. KTORI, M. RODRIGUEZ, G. SCELFO, S. RANDAZZO, A. TAMBURINI, A. CIPOLLINA, G. MICALÈ a D. XEVGENOS. Pioneering minimum liquid discharge desalination: A pilot study in Lampedusa Island. *Desalination* [online]. 2024, **581**, 117562 [vid. 2025-04-29]. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:10.1016/J.DESAL.2024.117562
- [12] PUNDIR, A., M. S. THAKUR, B. GOEL, RADHA, A. KUMAR, S. PRAKASH, M. THAKUR a M. KUMAR. Innovations in tannery wastewater management: a review of zero liquid discharge technology. *International Journal of Environmental Science and Technology* [online]. 2024, **22**(5), 3873–3894 [vid. 2025-04-29]. ISSN 17352630. Dostupné z: doi:10.1007/S13762-024-05986-X/FIGURES/3
- [13] CIPOLLETTA, Giulia, Nicola LANCIONI, Çağrı AKYOL, Anna Laura EUSEBI a Francesco FATONE. Brine treatment technologies towards minimum/zero liquid discharge and resource recovery: State of the art and techno-economic assessment. *Journal of Environmental Management* [online]. 2021, **300**, 113681 [vid. 2025-04-24]. ISSN 0301-4797. Dostupné z: doi:10.1016/J.JENVMAN.2021.113681
- [14] MÁŠA, Vítězslav, Petr STEHLÍK, Michal TOUŠ a Marek VONDRA. Key pillars of successful energy saving projects in small and medium industrial enterprises. *Energy* [online]. 2018, **158**, 293–304 [vid. 2025-05-05]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/J.ENERGY.2018.06.018
- [15] STEHLIK, Petr. Up-to-Date Waste-to-Energy Approach [online]. 2016, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology [vid. 2022-09-16]. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-15467-1
- [16] TONG, Tiezheng a Menachem ELIMELECH. The Global Rise of Zero Liquid Discharge for Wastewater Management: Drivers, Technologies, and Future Directions. *Environmental Science and Technology* [online]. 2016, **50**(13), 6846–6855 [vid. 2022-01-27]. ISSN 15205851. Dostupné z: doi:10.1021/ACS.EST.6B01000
- [17] TOWLER, Gavin a Ray SINNOTT. *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design* [online]. B.m.: Elsevier, 2021 [vid. 2025-04-09]. ISBN 9780128211793. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-821179-3.01001-3
- [18] SEIDER, W D, D R LEWIN, J D SEADER, S WIDAGDO, R GANI a K M NG. *Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation* [online]. B.m.: Wiley, 2016. ISBN 9781119261292. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=ifvKDwAAQBAJ>
- [19] COKER, A. Kayode. Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants: Volume 1, Fourth Edition. *Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants: Volume 1, Fourth Edition* [online]. 2007, **1**, 1–996 [vid. 2025-04-09]. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-7506-7766-0.X5000-3

- [20] LI, Zongkun, Xiaoqian MA, Yanfen LIAO a Ning ZHAO. Characteristics analysis and parameters optimization of desulfurization wastewater evaporation in a rotary spray drying tower. *Powder Technology* [online]. 2022, **399** [vid. 2022-06-28]. ISSN 1873328X. Dostupné z: doi:10.1016/J.POWTEC.2022.117211
- [21] LIU, Xin, Shi BU, Lin ZHANG, Yuzhu ZHOU, Jiamei FANG, Chengcheng SHI, Weigang XU a Chen XU. Experimental and numerical investigation on evaporation characteristics of high salinity wastewater by rotary spray. *Desalination* [online]. 2021, **517** [vid. 2022-06-28]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/J.DESAL.2021.115263
- [22] XU, Yin, Baosheng JIN, Zheng ZHOU a Wenjian FANG. Experimental and numerical investigations of desulfurization wastewater evaporation in a lab-scale flue gas duct: evaporation and HCl release characteristics. *Environmental Technology (United Kingdom)* [online]. 2021, **42(9)**, 1411–1427 [vid. 2022-06-28]. ISSN 1479487X. Dostupné z: doi:10.1080/09593330.2019.1669722
- [23] SHUANG-CHEN, Ma, Chai JIN, Chen JIA-NING, Wu KAI, Wan ZHONG-CHENG a Zhang JING-RUI. Numerical simulation of bypass evaporation system treating FGD wastewater using high temperature flue gas. *Environmental Technology (United Kingdom)* [online]. 2020, **41(6)**, 751–763 [vid. 2022-06-28]. ISSN 1479487X. Dostupné z: doi:10.1080/09593330.2018.1509892
- [24] MA, Shuangchen, Jin CHAI, Gongda CHEN, Kai WU, Yajun XIANG, Zhongcheng WAN, Jingrui ZHANG a Hongtao ZHU. Partitioning characteristic of chlorine ion in gas and solid phases in process of desulfurization wastewater evaporation: model development and calculation. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 2019, **26(8)**, 8257–8265 [vid. 2022-06-28]. ISSN 16147499. Dostupné z: doi:10.1007/S11356-018-04070-5
- [25] FU, Jiangtao, Ning HU, Zhongqing YANG a Li WANG. Experimental study on zero liquid discharge (ZLD) of FGD wastewater from a coal-fired power plant by flue gas exhausted heat. *Journal of Water Process Engineering* [online]. 2018, **26**, 100–107 [vid. 2022-06-28]. ISSN 22147144. Dostupné z: doi:10.1016/J.JWPE.2018.10.005
- [26] LIAO, Shuxin, Wenyu ZHU, Fuquan TANG, Wei ZHENG a Shuangchen MA. Research and engineering application on evaporation technology of FGD wastewater using low-temperature flue gas. *Clean Coal Technology* [online]. 2021, **27(6)**, 200–206 [vid. 2022-06-28]. ISSN 10066772. Dostupné z: doi:10.13226/J.ISSN.1006-6772.20102302
- [27] TANG, Di, Jie SONG a Adrian Wing Keung LAW. Application of feed flow reversal for nanofiltration of highly concentrated industrial wastewaters. *Desalination* [online]. 2020, **485** [vid. 2022-06-28]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/J.DESAL.2020.114462
- [28] WANG, Zhangxin, Akshay DESHMUKH, Yuhao DU a Menachem ELIMELECH. Minimal and zero liquid discharge with reverse osmosis using

- low-salt-rejection membranes. *Water Research* [online]. 2020, **170** [vid. 2022-06-28]. ISSN 18792448. Dostupné z: doi:10.1016/J.WATRES.2019.115317
- [29] CINGOLANI, Diego, Anna Laura EUSEBI a Paolo BATTISTONI. Osmosis process for leachate treatment in industrial platform: Economic and performances evaluations to zero liquid discharge. *Journal of Environmental Management* [online]. 2017, **203**, 782–790 [vid. 2022-06-28]. ISSN 10958630. Dostupné z: doi:10.1016/J.JENVMAN.2016.05.012
- [30] NATHOO, Jeeten a Dyllon Garth RANDALL. Thermodynamic modelling of a membrane distillation crystallisation process for the treatment of mining wastewater. *Water Science and Technology* [online]. 2016, **73**(3), 557–563 [vid. 2022-06-28]. ISSN 02731223. Dostupné z: doi:10.2166/WST.2015.515
- [31] LI, Kun, Wen Cheng MA, Hong Jun HAN, Chun Yan XU, Yuxing HAN, Dexin WANG, Wei Wei MA a Zheng Wen ZHANG. Application of nanofiltration model for prediction of rejecting typical refractory compounds in coal gasification brine. *Desalination and Water Treatment* [online]. 2019, **170**, 46–54 [vid. 2022-06-28]. ISSN 19443986. Dostupné z: doi:10.5004/DWT.2019.24612
- [32] TIZBIN, Shahriar, Ali JAFARIAN a Jamal DARAND. Numerical investigation of hydrodynamics and crystal growth in a forced circulation crystallizer. *Desalination* [online]. 2020, **496** [vid. 2022-06-28]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/J.DESAL.2020.114739
- [33] ONISHI, Viviani C., Mohammad H. KHOSHGOFTAR MANESH, Raquel SALCEDO-DÍAZ, Rubén RUIZ-FEMENIA, Juan A. LABARTA a José A. CABALLERO. Thermo-economic and environmental optimization of a solar-driven zero-liquid discharge system for shale gas wastewater desalination. *Desalination* [online]. 2021, **511** [vid. 2022-06-28]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/J.DESAL.2021.115098
- [34] ZHANG, Xinmiao, Chenlin ZHANG, Fanning MENG, Chenghong WANG, Pengfei REN, Qi ZOU a Jinyi LUAN. Near-zero liquid discharge of desulfurization wastewater by electrodialysis-reverse osmosis hybrid system. *Journal of Water Process Engineering* [online]. 2021, **40** [vid. 2022-06-28]. ISSN 22147144. Dostupné z: doi:10.1016/J.JWPE.2021.101962
- [35] HIGGINS, Thomas E., Dennis FINK, Krystal PEREZ a Christina JOINER. Enhancing FGD wastewater ZLD design and insights from simulated brine-solidification. *Air and Waste Management Association - Power Plant Pollutant Control „MEGA” Symposium, MEGA 2016*. 2016, 517–530.
- [36] HE, Charlie, Guy CARPENTER, Mark URBAN, Zhuang LIU, Jun WANG a Paul WESTERHOFF. Prescribed pretreatment for limiting constituents in reclaimed water concentrate. *Water Quality Technology Conference and Exposition 2011*. 2011, 438–457.
- [37] CHRISTOPHERSEN, David. Water reuse strategies: Steel industry case studies. *NACE - International Corrosion Conference Series*. 2008, 083701–0837015. ISSN 03614409.
- [38] DESHMUKH, Akshay, Zi Hao FOO, Caleb STETSON, Hyeonseok LEE, Christopher J. ORME, Aaron D. WILSON a John H. LIENHARD.

- Thermodynamics of solvent-driven water extraction from hypersaline brines using dimethyl ether. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2022, **434** [vid. 2022-06-28]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/J.CEJ.2021.134391
- [39] SONG, Yafei, Zhe LI, Qiao ZHU, Zhibin HUANG a Zhenmin CHENG. Precipitation Behavior of Salts in Supercritical Water: Experiments and Molecular Dynamics Simulations. *Processes* [online]. 2022, **10**(2) [vid. 2022-06-28]. ISSN 22279717. Dostupné z: doi:10.3390/PR10020423
- [40] FRÉDETTE, Chloé, Yves COMEAU a Jacques BRISSON. Design of a zero liquid discharge leachate treatment system using an evapotranspiration willow bed. *Water Research* [online]. 2022, **209** [vid. 2022-06-28]. ISSN 18792448. Dostupné z: doi:10.1016/J.WATRES.2021.117950
- [41] PANAGOPOULOS, Argyris a Vasiliki GIANNIKA. Comparative techno-economic and environmental analysis of minimal liquid discharge (MLD) and zero liquid discharge (ZLD) desalination systems for seawater brine treatment and valorization. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* [online]. 2022, **53**, 102477 [vid. 2025-04-24]. ISSN 2213-1388. Dostupné z: doi:10.1016/J.SETA.2022.102477
- [42] MACEDO, Antónia, Rita FRAGOSO, Inês SILVA, Tânia GOMES, Cátia F. MARTINS, João Bengala FREIRE a Elizabeth DUARTE. Mango Peel Nanofiltration Concentrates to Enhance Anaerobic Digestion of Slurry from Piglets Fed with Laminaria. *Membranes 2023, Vol. 13, Page 371* [online]. 2023, **13**(4), 371 [vid. 2025-04-24]. ISSN 2077-0375. Dostupné z: doi:10.3390/MEMBRANES13040371
- [43] MAGALHÃES, Natalie C., Ana F.R. SILVA, Paulo V.M. CUNHA, Jörg E. DREWES a Míriam C.S. AMARAL. Role of nanofiltration or reverse osmosis integrated to ultrafiltration-anaerobic membrane bioreactor treating vinasse for the conservation of water and nutrients in the ethanol industry. *Journal of Water Process Engineering* [online]. 2020, **36**, 101338 [vid. 2025-04-24]. ISSN 2214-7144. Dostupné z: doi:10.1016/J.JWPE.2020.101338
- [44] INTERNATIONAL ORGANISATION OF VINE AND WINE. *World Wine Production Outlook: OIV First Estimates 07.11.2023* [online]. 2023 [vid. 2024-02-05]. Dostupné z: https://www.oiv.int/sites/default/files/documents/OIV_World_Wine_Production_Outlook_2023_2.pdf
- [45] EUROPEAN COMMISSION. *EU agricultural outlook for markets, income and environmentt, 2021-2031* [online]. 2021 [vid. 2022-04-11]. Dostupné z: doi:10.2762/753688
- [46] COSTA, Joaquim M., Margarida OLIVEIRA, Ricardo J. EGIPTO, João F. CID, Rita A. FRAGOSO, Carlos M. LOPES a Elisabeth N. DUARTE. Water and wastewater management for sustainable viticulture and oenology in South Portugal – a review. *Ciência e Técnica Vitiwinícola* [online]. 2020, **35**(1), 1–15. ISSN 2416-3953. Dostupné z: doi:10.1051/ctv/20203501001
- [47] LATESSA, Sara H., Liam HANLEY a Wendong TAO. Characteristics and practical treatment technologies of winery wastewater: A review for wastewater management at small wineries. *Journal of Environmental*

- Management* [online]. 2023, **342**, 118343. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2023.118343
- [48] GOMES, Ana, Amadeu BORGES, José A. PERES a Marco S. LUCAS. Bioenergy Production from Agro-Industrial Wastewater Using Advanced Oxidation Processes as Pre-Treatment. *Catalysts* [online]. 2023, **13**(8), 1186. ISSN 2073-4344. Dostupné z: doi:10.3390/catal13081186
- [49] IOANNOU, L. A., G. Li PUMA a D. FATTA-KASSINOS. Treatment of winery wastewater by physicochemical, biological and advanced processes: A review. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2015, **286**, 343–368 [vid. 2022-02-02]. ISSN 18733336. Dostupné z: doi:10.1016/J.JHAZMAT.2014.12.043
- [50] MADER, A.E., G.A. HOLTMAN a P.J. WELZ. Treatment wetlands and phyto-technologies for remediation of winery effluent: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment* [online]. 2022, **807**. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150544
- [51] BOLZONELLA, David, Matteo PAPA, Cinzia DA ROS, Lokeshwer ANGA MUTHUKUMAR a Diego ROSSO. Winery wastewater treatment: a critical overview of advanced biological processes. *Critical Reviews in Biotechnology* [online]. 2019, **39**(4), 489–507 [vid. 2022-02-02]. ISSN 15497801. Dostupné z: doi:10.1080/07388551.2019.1573799
- [52] LAURENSEN, S., N.S. BOLAN, E. SMITH a M. MCCARTHY. Review: Use of recycled wastewater for irrigating grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research* [online]. 2012, **18**(1), 1–10. Dostupné z: doi:10.1111/j.1755-0238.2011.00170.x
- [53] EUROPEAN COUNCIL. Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban waste-water treatment . *Official Journal of the European Communities*. 1991, **34**, 40–52. ISSN 0378-6978.
- [54] KYZAS, George Z., Maria P. SYMEONIDOU a Kostas A. MATIS. Technologies of winery wastewater treatment: A critical approach. *Desalination and Water Treatment* [online]. 2016, **57**(8), 3372–3386 [vid. 2022-02-02]. ISSN 19443986. Dostupné z: doi:10.1080/19443994.2014.986535
- [55] MELCHIORS, Emeline a Flavio Bentes FREIRE. Winery Wastewater Treatment: a Systematic Review of Traditional and Emerging Technologies and Their Efficiencies. *Environmental Processes* [online]. 2023, **10**(3), 43. ISSN 2198-7491. Dostupné z: doi:10.1007/s40710-023-00657-4
- [56] DAVIDIDOU, K. a Z. FRONTISTIS. Advanced oxidation processes for the treatment of winery wastewater: a review and future perspectives. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* [online]. 2021, **96**(9), 2436–2450. Dostupné z: doi:10.1002/jctb.6772
- [57] MASI, F., J. ROCHEREAU, S. TROESCH, I. RUIZ a M. SOTO. Wineries wastewater treatment by constructed wetlands: A review. *Water Science and Technology* [online]. 2015, **71**(8), 1113–1127. Dostupné z: doi:10.2166/wst.2015.061

- [58] ZACHAROF, M.-P. Grape Winery Waste as Feedstock for Bioconversions: Applying the Biorefinery Concept. *Waste and Biomass Valorization* [online]. 2017, **8**(4), 1011–1025. Dostupné z: doi:10.1007/s12649-016-9674-2
- [59] LOFRANO, G. a S. MERIC. A comprehensive approach to winery wastewater treatment: a review of the state-of-the-art. *Desalination and Water Treatment* [online]. 2016, **57**(7), 3011–3028. Dostupné z: doi:10.1080/19443994.2014.982196
- [60] MOSSE, K. P.M., A. F. PATTI, E. W. CHRISTEN a T. R. CAVAGNARO. Review: Winery wastewater quality and treatment options in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research* [online]. 2011, **17**(2), 111–122 [vid. 2022-02-02]. ISSN 13227130. Dostupné z: doi:10.1111/J.1755-0238.2011.00132.X
- [61] MALANDRA, Lida, Gideon WOLFAARDT, Ancha ZIETSMAN a Marinda VILJOEN-BLOOM. Microbiology of a biological contactor for winery wastewater treatment. *Water Research* [online]. 2003, **37**(17), 4125–4134 [vid. 2022-04-12]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1354(03)00339-7
- [62] RIZZO, Luigi, Giusy LOFRANO a Vincenzo BELGIORNO. Olive Mill and Winery Wastewaters Pre-Treatment by Coagulation with Chitosan. *Separation Science and Technology* [online]. 2010, **45**(16), 2447–2452. ISSN 0149-6395. Dostupné z: doi:10.1080/01496395.2010.487845
- [63] BRAZ, Rui, António PIRRA, Marco S. LUCAS a José A. PERES. Combination of long term aerated storage and chemical coagulation/flocculation to winery wastewater treatment. *Desalination* [online]. 2010, **263**(1–3), 226–232. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2010.06.063
- [64] ANDREOTTOLA, G., M. CADONNA, P. FOLADORI, G. GATTI, F. LORENZI a P. NARDELLI. Heavy metal removal from winery wastewater in the case of restrictive discharge regulation. *Water Science and Technology* [online]. 2007, **56**(2), 111–120. ISSN 0273-1223. Dostupné z: doi:10.2166/wst.2007.479
- [65] KARA, Serdar, Ercan GÜRBULAK, Murat EYVAZ a Ebubekir YÜKSEL. Treatment of winery wastewater by electrocoagulation process. *Desalination and Water Treatment* [online]. 2013, **51**(28–30), 5421–5429. ISSN 1944-3994. Dostupné z: doi:10.1080/19443994.2013.770223
- [66] JORGE, Nuno, Ana R. TEIXEIRA, Carlos C. MATOS, Marco S. LUCAS a José A. PERES. Combination of coagulation–flocculation–decantation and ozonation processes for winery wastewater treatment. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2021, **18**(16), 8882 [vid. 2024-02-05]. ISSN 16604601. Dostupné z: doi:10.3390/IJERPH18168882/S1
- [67] LUCAS, M.S., J.A. PERES a G. LI PUMA. Treatment of winery wastewater by ozone-based advanced oxidation processes (O_3 , O_3/UV and $O_3/UV/H_2O_2$) in a pilot-scale bubble column reactor and process economics. *Separation and Purification Technology* [online]. 2010, **72**(3), 235–241. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2010.01.016

- [68] NAVARRO, P., J. SARASA, D. SIERRA, S. ESTEBAN a J.L. OVELLEIRO. Degradation of wine industry wastewaters by photocatalytic advanced oxidation. *Water Science and Technology* [online]. 2005, **51**(1), 113–120. ISSN 0273-1223. Dostupné z: doi:10.2166/wst.2005.0014
- [69] LUCAS, M.S., J.A. PERES, B.Y. LAN a G. LI PUMA. Ozonation kinetics of winery wastewater in a pilot-scale bubble column reactor. *Water Research* [online]. 2009, **43**(6), 1523–1532. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2008.12.036
- [70] VELEGRAKI, T. a D. MANTZAVINOS. Solar photo-Fenton treatment of winery effluents in a pilot photocatalytic reactor. *Catalysis Today* [online]. 2015, **240**, 153–159. ISSN 09205861. Dostupné z: doi:10.1016/j.cattod.2014.06.008
- [71] ANASTASIOU, Natasa, Maria MONOU, Dionissios MANTZAVINOS a Despo KASSINOS. Monitoring of the quality of winery influents/effluents and polishing of partially treated winery flows by homogeneous Fe(II) photo-oxidation. *Desalination* [online]. 2009, **248**(1–3), 836–842. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2008.11.006
- [72] BAÍA, A., A. LOPES, M.J. NUNES, L. CIRÍACO, M.J. PACHECO a A. FERNANDES. Removal of Recalcitrant Compounds from Winery Wastewater by Electrochemical Oxidation. *Water (Switzerland)* [online]. 2022, **14**(5). Dostupné z: doi:10.3390/w14050750
- [73] SHAH, Anu, John BULLERI, Richard ROSS, John CARTER a Michael LONG. Successful Plant Scale Winery Wastewater Treatment Using Membrane Bioreactor in Northern California. *Proceedings of the Water Environment Federation* [online]. 2008, **2008**(13), 3408–3425. ISSN 1938-6478. Dostupné z: doi:10.2175/193864708788733107
- [74] RUÍZ, C., M. TORRIJOS, P. SOUSBIE, J. LEBRATO MARTÍNEZ, R. MOLETTA a J.P. DELGENÈS. Treatment of winery wastewater by an anaerobic sequencing batch reactor. *Water Science and Technology* [online]. 2002, **45**(10), 219–224. ISSN 0273-1223. Dostupné z: doi:10.2166/wst.2002.0336
- [75] SIGGE, G.O., T.J. BRITZ, P.C. FOURIE a C.A. BARNARDT. The efficacy of ozone as a pre- and post-treatment option for UASB-treated food processing wastewaters. *Water Science and Technology* [online]. 2005, **52**(1–2), 167–173. ISSN 0273-1223. Dostupné z: doi:10.2166/wst.2005.0513
- [76] GRISMER, M.E., M.A. CARR a H.L. SHEPHERD. Evaluation of constructed wetland treatment performance for winery wastewater. *Water Environment Research* [online]. 2003, **75**(5), 412–421. Dostupné z: doi:10.2175/106143003X141213
- [77] COLIN, T., A. BORIES, Y. SIRE a R. PERRIN. Treatment and valorisation of winery wastewater by a new biophysical process (ECCF®). *Water Science and Technology* [online]. 2005, **51**(1), 99–106 [vid. 2022-02-02]. ISSN 02731223. Dostupné z: doi:10.2166/WST.2005.0012
- [78] AIROLDI, Gianfranco, Paolo BALSARI a Fabrizio Stefano GIOELLI. Results of a survey carried out in piemonte region winery on slurry characteristics and

- disposal methods. In: *III internacional specialized conference on sustainable viticulture and winery waste management*. 2004, s. 335–338.
- [79] MIKLAS, Václav, Michal TOUŠ, Marta MIKLASOVÁ, Vítězslav MÁŠA a David HORŇÁK. Winery Wastewater Treatment Technologies: Current Trends and Future Perspective. *Chemical Engineering Transactions* [online]. 2022, **94**, 847–852 [vid. 2023-01-31]. ISSN 22839216. Dostupné z: doi:10.3303/CET2294141
- [80] DROSG, Bernhard, Werner FUCHS, Teodorita AL, Seadi Michael MADSEN a Bernd LINKE. Nutrient recovery by biogas digestate processing [online]. 2015 [vid. 2022-08-17]. Dostupné z: https://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/NUTRIENT_RECOVERY_RZ_web2.pdf
- [81] SENGUPTA, Sukalyan, Tabish NAWAZ a Jeffrey BEAUDRY. Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater. *Current Pollution Reports* [online]. 2015, **1**(3), 155–166 [vid. 2022-08-17]. ISSN 21986592. Dostupné z: doi:10.1007/S40726-015-0013-1/TABLES/2
- [82] MIKLAS, Václav. *Integrace technologie pro zahušťování digestátu v bioplynové stanici*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [83] MONFET, Evelyne, Geneviève AUBRY a Antonio Avalos RAMIREZ. Nutrient removal and recovery from digestate: a review of the technology. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1336348> [online]. 2017, **9**(2), 247–262 [vid. 2022-08-17]. ISSN 17597277. Dostupné z: doi:10.1080/17597269.2017.1336348
- [84] ČESKÁ BIOPLYNOVÁ ASOCIACE. Strategická výzkumná agenda oboru bioplyn 2014 [online]. 2014 [vid. 2022-08-26]. Dostupné z: www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/SVA_CzBA_2014_FINAL.pdf
- [85] VANEECKHAUTE, Céline, Violtje LEBUF, Evi MICHELS, Evangelina BELIA, Peter A. VANROLLEGHEM, Filip M.G. TACK a Erik MEERS. Nutrient Recovery from Digestate: Systematic Technology Review and Product Classification. *Waste and Biomass Valorization* [online]. 2017, **8**(1), 21–40 [vid. 2022-09-26]. ISSN 1877265X. Dostupné z: doi:10.1007/S12649-016-9642-X
- [86] VONDRA, Marek. *Zařízení pro zahušťování odpadní vody z bioplynových stanic*. Brno, 2017. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [87] VONDRA, Marek, Vítězslav MÁŠA a Petr BOBÁK. The energy performance of vacuum evaporators for liquid digestate treatment in biogas plants. *Energy* [online]. 2018, **146**, 141–155 [vid. 2022-09-01]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/J.ENERGY.2017.06.135
- [88] MIKLASOVÁ, Marta, Václav MIKLAS a KOMENDOVÁ RENATA. Studentská odborná konference Chemie je život 2022. In: Petr DZIK, ed. *Influence of Winery Wastewater Storage Period on its Processability in Wastewater Recycling Technology*. 2022, s. 40–41. ISBN 978-80-214-6117-8.
- [89] BRYAN RESEARCH & ENGINEERING LLC. *ProMax*. 2023

- [90] PITZER, Kenneth S. a Janice J. KIM. Thermodynamics of Electrolytes. IV. Activity and Osmotic Coefficients for Mixed Electrolytes. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 1974, **96**(18), 5701–5707 [vid. 2024-05-30]. ISSN 15205126. Dostupné z: doi:10.1021/JA00825A004/ASSET/JA00825A004.FP.PNG_V03
- [91] BILLET, R. a M. SCHULTES. Prediction of Mass Transfer Columns with Dumped and Arranged Packings: Updated Summary of the Calculation Method of Billet and Schultes. *Chemical Engineering Research and Design* [online]. 1999, **77**(6), 498–504 [vid. 2024-05-30]. ISSN 0263-8762. Dostupné z: doi:10.1205/026387699526520
- [92] ONDA, Kakusaburo, Hiroshi TAKEUCHI a Yoshio OKUMOTO. Mass transfer coefficients between gas and liquid phases in packed columns. *Journal of Chemical Engineering of Japan* [online]. 1968, **1**(1), 56–62 [vid. 2024-05-30]. ISSN 0021-9592. Dostupné z: doi:10.1252/JCEJ.1.56
- [93] MIKLAS, Václav, Michal TOUŠ a Vítězslav MÁŠA. Winery Wastewater Treatment: Synergy Between Model and Experiment for Air Stripping Unit. In: *Book of Abstracts of the Energy, Sustainability and Climate Change Conference*. Volos, Greece: University of Thessaly, 2022, s. 102–102. ISSN 2653-8911.
- [94] BAKER, James R., Mark W. MILKE a James R. MIHELIC. Relationship between chemical and theoretical oxygen demand for specific classes of organic chemicals. *Water Research* [online]. 1999, **33**(2), 327–334 [vid. 2025-03-21]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:10.1016/S0043-1354(98)00231-0
- [95] PITTER, Pavel a Jan. CHUDOBA. Biodegradability of organic substance in the aquatic environment. [online]. 1990, 306 [vid. 2022-08-23]. Dostupné z: doi:10.3/JQUERY-UIJS
- [96] CURTO, Domenico, Vincenzo FRANZITTA a Andrea GUERCIO. A review of the water desalination technologies. *Applied Sciences (Switzerland)* [online]. 2021, **11**(2), 1–36 [vid. 2024-04-10]. ISSN 20763417. Dostupné z: doi:10.3390/APP11020670
- [97] PETERS, M S, K D TIMMERHAUS a R E WEST. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* [online]. B.m.: McGraw-Hill Education, 2003. McGraw-Hill chemical engineering series. ISBN 9780072392661. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=3uVFkBBHyP8C>
- [98] BASTOS, J, F MONFORTI-FERRARIO a G MELICA. GHG Emission Factors for Electricity Consumption [online]. 2024. Dostupné z: <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/919df040-0252-4e4e-ad82-c054896e1641>
- [99] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *IPCC - Emission Factor Database (2023) – with minor processing by Our World in Data* [online]. 2023 [vid. 2024-06-28]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-dioxide-emissions-factor>
- [100] EUROPEAN COMMISSION. *Electricity prices for non-household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards)* [online]. 2024 [vid. 2024-06-27]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.2908/NRG_PC_205

- [101] EUROPEAN COMMISSION. Gas prices components for non-household consumers - annual data. *Eurostat* [online]. 2024 [vid. 2024-06-27]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.2908/NRG_PC_203_C
- [102] SOBOL, I. M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation* [online]. 2001, **55**(1–3), 271–280 [vid. 2024-07-16]. ISSN 0378-4754. Dostupné z: doi:[10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6)
- [103] SIN, Gürkan, Krist V. GERNAEY, Marc B. NEUMANN, Mark C.M. VAN LOOSDRECHT a Willi GUJER. Global sensitivity analysis in wastewater treatment plant model applications: Prioritizing sources of uncertainty. *Water Research* [online]. 2011, **45**(2), 639–651 [vid. 2024-07-16]. ISSN 0043-1354. Dostupné z: doi:[10.1016/J.WATRES.2010.08.025](https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2010.08.025)
- [104] KRÓL, Paweł, Alberto GALLINA, Michał LUBIENIECKI, Tadeusz UHL a Tadeusz ŻABA. Sensitivity analysis of a municipal wastewater treatment plant model. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2019, **252**, 05010 [vid. 2024-07-16]. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:[10.1051/MATECCONF/201925205010](https://doi.org/10.1051/MATECCONF/201925205010)
- [105] KIM, Chul Jin, Hyo Hyun CHOI a Chae Hoon SOHN. Auto-ignition of lubricating oil working at high pressures in a compressor for an air conditioner. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2011, **185**(1), 416–422 [vid. 2024-07-18]. ISSN 0304-3894. Dostupné z: doi:[10.1016/J.JHAZMAT.2010.09.049](https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2010.09.049)
- [106] KENIG, Eugeny Y. a Sergei BLAGOV. Modeling of Distillation Processes. *Distillation: Fundamentals and Principles* [online]. 2014, 383–436 [vid. 2024-07-16]. Dostupné z: doi:[10.1016/B978-0-12-386547-2.00010-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386547-2.00010-7)
- [107] PRIFTI, Kristiano, Andrea GALEAZZI, Massimo BARBIERI a Flavio MANENTI. A Capex Opex Simultaneous Robust Optimizer: Process Simulation-based Generalized Framework for Reliable Economic Estimations. *Computer Aided Chemical Engineering* [online]. 2022, **51**, 1321–1326 [vid. 2024-07-16]. ISSN 1570-7946. Dostupné z: doi:[10.1016/B978-0-323-95879-0.50221-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95879-0.50221-6)
- [108] HELAL, Ahmed M. Uprating of Umm Al Nar East 4–6 MSF desalination plants. *Desalination* [online]. 2003, **159**(1), 43–60 [vid. 2024-07-16]. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:[10.1016/S0011-9164\(03\)90044-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)90044-0)
- [109] AL-MUTAZ, I. S. a M. A. SOLIMAN. Simulation of MSF desalination plants. *Desalination* [online]. 1989, **74**(C), 317–326 [vid. 2024-07-16]. ISSN 0011-9164. Dostupné z: doi:[10.1016/0011-9164\(89\)85059-3](https://doi.org/10.1016/0011-9164(89)85059-3)
- [110] SUDRET, Bruno. Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions. *Reliability Engineering & System Safety* [online]. 2008, **93**(7), 964–979 [vid. 2024-07-16]. ISSN 0951-8320. Dostupné z: doi:[10.1016/J.RESS.2007.04.002](https://doi.org/10.1016/J.RESS.2007.04.002)
- [111] ALHAMELI, Falah, Mohammed ALKATHERI, Ali ELKAMEL, Ali ALMANSOORI a Peter DOUGLAS. Surrogate-Based Process Optimization: A Case Study on Simple Natural Gas Processing Plant. *Proceedings of the*

International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. 2020, **10**, 1484–1495. ISSN 2169-8767.

- [112] AL, Resul, Chitta Ranjan BEHERA, Alexandr ZUBOV a Gürkan SIN. Systematic framework development for the construction of surrogate models for wastewater treatment plants. *Computer Aided Chemical Engineering* [online]. 2018, **44**, 1909–1914 [vid. 2024-07-16]. ISSN 1570-7946. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-64241-7.50313-X
- [113] AL, Resul, Chitta Ranjan BEHERA, Alexandr ZUBOV, Krist V. GERNAEY a Gürkan SIN. Meta-modeling based efficient global sensitivity analysis for wastewater treatment plants – An application to the BSM2 model. *Computers & Chemical Engineering* [online]. 2019, **127**, 233–246 [vid. 2024-07-16]. ISSN 0098-1354. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPHEMENG.2019.05.015
- [114] CLIMATE DATA. *Climate data for cities worldwide* [online]. 2024 [vid. 2024-08-19]. Dostupné z: <https://en.climate-data.org/>
- [115] HOWELL, C.L. a P.A. MYBURGH. Management of winery wastewater by re-using it for crop irrigation - A review. *South African Journal of Enology and Viticulture* [online]. 2018, **39**(1), 116–131. Dostupné z: doi:10.21548/39-1-2475
- [116] ANDREOTTOLA, G., P. FOLADORI a G. ZIGLIO. Biological treatment of winery wastewater: An overview. *Water Science and Technology* [online]. 2009, **60**(5), 1117–1125 [vid. 2025-03-13]. ISSN 02731223. Dostupné z: doi:10.2166/WST.2009.551
- [117] TORRIJOS, M. a R. MOLETTA. *Winery wastewater depollution by sequencing batch reactor* [online]. 1997. Dostupné z: doi:10.1016/S0273-1223(96)00903-1
- [118] LI, Jinze, Walter Z. TANG a Li GU. Energy efficiency assessment of China wastewater treatment plants by unit energy consumption per kg COD removed. *Environmental Technology (United Kingdom)* [online]. 2023, **44**(2), 278–292 [vid. 2025-03-12]. ISSN 1479487X. Dostupné z: doi:10.1080/09593330.2021.1969596

Přehled výzkumných, pedagogických a profesních aktivit

Publikační činnost

MIKLAS, V.; HORŇÁK, D.; TOUŠ, M.; KOLLMANN, M.; PROCHÁZKOVÁ, M.; VONDRA, M.; MÁŠA, V. Sustainability-Driven Optimization in Ethanol-Focused Winery Wastewater Management. *Journal of Water Process Engineering*. (v 2. kole recenzního řízení)

HORŇÁK, D.; PROCHÁZKOVÁ, M.; MIKLAS, V.; VONDRA, M.; TOUŠ, M.; KOLLMANN, M.; JIA, X.; ŘÍHOVÁ, M.; PIŠANOVÁ, M.; MÁŠA, V. Minimal Liquid Discharge System for Sustainable Dairy Wastewater Management. *Separation and Purification Technology*. (v 2. kole recenzního řízení)

PROCHÁZKOVÁ, M.; TOUŠ, M.; HORŇÁK, D.; MIKLAS, V.; VONDRA, M.; MÁŠA, V. Industrial wastewater in the context of European Union water reuse legislation and goals. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 426, no. 1, p. 1-11. ISSN: 0959-6526.

VONDRA, M.; BUZÍK, J.; HORŇÁK, D.; PROCHÁZKOVÁ, M.; MIKLAS, V.; TOUŠ, M.; JEGLA, Z.; MÁŠA, V. Technology for Hot Spring Cooling and Geothermal Heat Utilization: A Case Study for Balneology Facility. *ENERGIES*, 2023, vol. 16, no. 7, ISSN: 1996-1073.

MIKLAS, V.; MIKLASOVÁ, M.; TOUŠ, M.; VONDRA, M.; BUZÍK, J.; MÁŠA, V. *Circular Water Management Opportunities for Wineries Using Novel Thermal Process*. 6th IWA International Conference on eco-Technologies for Wastewater Treatment: Conference Proceedings. Girona, Spain: 2023. p. 269-269.

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. *Energy*, 2023, vol. 267, no. 1, ISSN: 0360-5442.

MIKLAS, V.; TOUŠ, M.; MIKLASOVÁ, M.; MÁŠA, V.; HORŇÁK, D. *Winery Wastewater Treatment Technologies: Current Trends and Future Perspective*. *Chemical Engineering Transactions*, 2022, **94**, 847-852. ISSN: 2283-9216.

MIKLASOVÁ, M.; MIKLAS, V.; KOMENDOVÁ, R. *Influence of Winery Wastewater Storage Period on its Processability in Wastewater Recycling Technology*. Studentská odborná konference Chemie je život 2022: Sborník abstraktů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2022. p. 40-41. ISBN: 978-80-214-6117-8.

MÁŠA, V.; TOUŠ, M.; MIKLAS, V. *Industrial Wastewater Treatment - Trends and Perspectives*. Book of Abstracts of the Energy, Sustainability and Climate Change Conference. Volos, Greece: University of Thessaly, 2022, 26. ISSN: 2653-8911.

MIKLAS, V.; TOUŠ, M.; MÁŠA, V.; TENG, S. Artificial Intelligence Application for Crude Distillation Unit: An Overview. In *Artificial Intelligence for Knowledge Management, Energy, and Sustainability: 9th IFIP WG 12.6 and 1st IFIP WG 12.11 International Workshop, AI4KMES 2021, Held at IJCAI 2021, Montreal, QC, Canada, August 19–20, 2021, Revised Selected Papers*. 1. Cham, Switzerland: Springer, 2022, 156-168. ISBN: 978-3-030-96592-1.

MIKLAS, V.; TOUŠ, M.; MÁŠA, V. *Winery Wastewater Treatment: Synergy Between Model and Experiment for Air Stripping Unit*. Book of Abstracts of the Energy, Sustainability and Climate Change Conference. Volos, Greece: University of Thessaly, 2022. 102. ISSN: 2653-8911.

VONDRA, M.; TOUŠ, M.; MIKLAS, V.; PROCHÁZKOVÁ, M. *Processing of Digestate from Biogas Plants*. 8th International Conference on "Energy, Sustainability and Climate Crisis" ESCC 2021 - Book of Abstracts. Book of Abstracts of the Energy, Sustainability and Climate Change Conference. Volos: 2021, 27-28. ISBN: 978-618-84403-5-7. ISSN: 2653-8911.

MIKLAS, V.; ABDULRAHMAN, I.; MÁŠA, V. Process Intensification of Triethylene Glycol Dehydration Units with Respect to Rated Energy Consumption, Emissions and Product Quality. *Chemical Engineering Transactions*, 2021, **88**, 925-930. ISSN: 2283-9216.

Recenzní činnost

2023–doposud: 8 recenzí pro časopis *Journal of Cleaner Production*

2024–doposud: 1 recenze pro *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*

Účast na konferencích

EUROMEMBRANE 2024, 8. až 12. září 2024, Praha – Česká republika

The Conference on Industrial Technologies INDTech 2024, 3. až 5. června 2024, Namur – Belgie.

6th IWA International Conference on Eco-Technologies for Wastewater Treatment, 26. až 29. června 2023, Girona – Španělsko

25th Conference on Process Integration for Energy Saving and Pollution Reduction, 5. září až 8. září 2022, Bol – Chorvatsko

24th Conference on Process Integration for Energy Saving and Pollution Reduction, 31. října až 3. listopadu 2021, Brno – Česká republika

8th International Conference on Energy, Sustainability and Climate Crisis, 30. srpna až 3. září 2021, Volos – Řecko (online)

30th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 19. až 26. srpna 2021, Montreal – Kanada (online)

1st Sustainable Process Integration Laboratory Scientific Conference, 6. až 7. prosince 2017, Brno – Česká republika.

Vědecko-výzkumné projekty

Hlavní řešitel – Jednotka přímé osmózy pro recyklaci průmyslových odpadních vod (TAČR TQ03000672), 1. 1. 2024 - 31. 12. 2025.

Hlavní řešitel – Inovativní technologie pro zpracování odpadních vod z vinařství (FCH/FSI-J-22-7894), 1. 3. 2022–28. 2. 2023

Hlavní řešitel – Laboratorní membrána a její digitální dvojče jako efektivní výukový prostředek v oblasti zpracování odpadních vod (FV 21-18), 1. 4. 2021 — 31. 12. 2021

Spolurešitel – Jednotka pro oběhové vodní hospodářství ve vinařských provozech (TAČR FW10010437), 1. 1. 2024–30. 6. 2026.

Spolurešitel – Technologie pro využití kalů z recyklace průmyslových odpadních vod (TAČR TQ03000374), 1.1.2024 - 31.12.2025.

Spolurešitel – Vícestupňový absorpční systém pro efektivní akumulaci tepla a chladu (TAČR TS01030161), 1. 6. 2024–31. 12. 2024

Spolurešitel – Optimální návrh a řízení energetických systémů s využitím umělé inteligence (TAČR TS01030053), 1. 6. 2024–31. 12. 2024

Spolurešitel – Pilotní jednotka pro redukci digestátu v bioplynových stanicích (TAČR FW03010481), 1. 2. 2021–31.12.2023.

Spolurešitel – Řídicí systém pro virtuální elektrárny založený na umělé inteligenci (TAČR FW03010505), 1. 2. 2021–31. 12. 2023

Projekty smluvního výzkumu

ESCO PODLAHY, s.r.o.

— Návrh energetických opatření v provozu v Radomyšli, 2024–2025

Asociace prádelen a čistíren ČR, z. s.

— Srovnání profesionální a domácí údržby prádla z hlediska spotřeb energií a vody, nákladů a emisí CO₂, 2023

HUTIRA s.r.o.

— Chlazení termominerálních vod, 2021–2024

○ Etapa 1: Ověření prototypu

○ Etapa 2: Návrh technologie v provozním měřítku

— Experimentální ověření vakuového odpařování jako konceptu pro zpracování zaolejovaných odpadních vod (Škoenergo), 2023

— Vývoj zařízení pro zpracování odpadních vod z potravinářského provozu, 2022

— Experimentální ověření vakuového odpařování jako konceptu pro zpracování průmyslových odpadních vod (Jipocar), 2022

— Experimentální ověření vakuového odpařování jako konceptu pro zpracování průmyslových odpadních vod 2 (Enaspol), 2022

— Posouzení možnosti čištění a recyklace odpadních vod ve vinařském provozu, 2021

Prádelna Homola

— Návrh technologických změn v prádelnictví s cílem optimalizace využití odpadního tepla pro recyklaci vody, 2021–2022

Mezinárodní stáže a aktivity

Stáže:

Březen 2023: Měsíční stáž na prestižní Research Unit of Water Quality Management (TU Wien) se zaměřením na kvantifikaci energetických nároků pokročilého zpracování odpadních prostřednictvím ozonace a přímé osmózy.

Aktivity:

Březen 2024–doposud: Člen Task Force projektu aliance EULiST věnující se platformě pro začínající výzkumníky (Early-Career Researcher Centre).

Červen 2024: Účast na projektové burze při konferenci INDTEch 2024 s navázáním kontaktů z Rumunska, Německa, Irska, Řecka a Rakouska.

Leden–únor 2024: Spolutvorba projektové žádosti WInery Wastes UPcycling through a biorefinery process (WINEUP) v rámci výzvy HORIZON-CL6-2024-CIRCBIO-02.

Užité vzory

VÁCLAV, K.; MÁTL, J.; TOUŠ, M.; MÁŠA, V.; MIKLAS, V.; KARLA spol. s r.o., Bruntál Vysoké učení technické v Brně, Brno, Veveří: *Systém pro řízení virtuální elektrárny*. 37796. (2024)

VONDRA, M.; HORŇÁK, D.; TOUŠ, M.; MIKLAS, V.; Vysoké učení technické v Brně, Brno, Veveří: *Zařízení pro kondenzaci brýdových par z vícestupňové odpadky*. 37499. (2023)

Vedení a oponentury závěrečných prací

- *Vedené závěrečné práce:*

RÖDER, Dominik. *Koncepční studie miniaturizace palivového článku pro podvodní sondu*. Brno, 2024. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce: Ing. Václav Miklas.

MAHAJAN, Rohit. *Implementation of Quality Management System in University Laboratories*. Brno, 2023. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Process Engineering. Supervisor: Ing. Václav Miklas.

PICKA, Marek. *Metody řízení pH odpadních vod*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, 2022. Vedoucí práce: Ing. Václav Miklas

- *Oponované závěrečné práce:*

KOLLMANN, Marek. *Plánování výroby tepla a elektřiny v zařízení na energetické využití odpadu s využitím strojového učení*. Brno, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce: Ing. Michal Touš, Ph.D.

ZÁVADSKÝ, Marek. *Návrh odparky se šnekovým míchadlem*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce: Ing. David Horňák

VALACHOVIČ, Filip. *Potenciál tepelných čerpadel pro využití odpadního tepla v interiérech malých a středních podniků*. Brno, 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

VOŇKA, Radim. *Plánování výroby pomocí pokročilých algoritmů*. Brno, 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Michal Touš, Ph.D.

CYŽ, Antonín. *Technologická řešení pro úspory energie v průmyslu*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, 43 s. Vedoucí práce Ing. Eva Konečná, Ph.D.

FLORIAN, Tibor. *Návrhový výpočet experimentální stripovací jednotky*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Michal Touš, Ph.D.

LAUTERBACH, David. *Moderní přístupy ke snižování spotřeby energie v průmyslových procesech*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Vítězslav Máša, Ph.D.

MATOUŠEK, Jakub. *Výroba biometanu v bioplynových stanicích*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Mgr. Ing. Marek Vondra, Ph.D.

Výuka

2024: Vedení International Study Group (ISG) v rámci pilotního projektu challenged-based learning, celkem 5 studentů ze 4 různých zemí ze dvou oborů spolupracovalo na projektech udržitelného rozvoje s komunikací plně v angličtině, letní semestr.

2022–2024: Cvičení a přednášky předmětu Experimentální metody (KEM), celkem 78 hodin (26 hodin za akademický rok), zimní semestr.

2021: Cvičení předmětu Inženýrská termodynamika (KS1), celkem 6 hodin, zimní semestr 2021.

2021: Cvičení a přednášky předmětu Modelování procesů (IMP), celkem 8 hodin, zimní semestr 2021.

Školení a kurzy

Seminář k ERC grantům na VUT – únor 2024 a březen 2025.

Kurzy Excel: datové nástroje; Využití umělé inteligence ve vysokoškolském prostředí; Využití MS Teams v týmové spolupráci (VUT) – březen–duben 2024.

Kurz Plán managementu dat v Data Stewardship Wizard (VUT) – září 2023.

Workshop „Advanced WRRF simulation: Model-based plant analysis & optimization“ při konferenci ecoSTP2023 – červen 2023.

Projektová příprava FSI: Účast na 8 kurzech v klíčových otázkách VaV projektů – říjen 2022–květen 2023.

Kurz Zkušenosti úspěšných řešitelů VUT s podáváním projektů, VUT v Brně – říjen 2022.

Elektrotechnická kvalifikace podle § 6 vyhlášky č. 50/1978 Sb. – duben 2022.

Školení databáze Scopus, Elsevier, B.V. – duben 2021.

BRE 101 Oil & Gas, BRE 102 Upstream Facilities, BRE 111 Refining, BRE 121 Air Emissions, BRE 201 Gas Processing, BRE 211 Refinery Operations, BRE 231 Sour Gas Processing, BRE 232 Equipment Rating & Sizing; Bryan Research & Engineering – jako instruktor v letech 2018–2020.

Semestrální kurz Projektové řízení, VUT v Brně – září–prosinec 2017.

Certified SOLIDWORKS Associate in Mechanical Design, Dassault Systèmes – leden 2017.

Předchozí profesní zkušenost

2018–2021: Bryan Research & Engineering | Brno, ČR a Bryan, USA

Konzultační inženýr

- Mezinárodní konzultační služby v oblasti procesní simulace v rámci:
 - koncepčních studií, FEE, basic a detail designu,
 - řešení provozních obtíží,
 - procesní optimalizace a eliminace úzkých hrdel,
 - školení a individuálních konzultací.
- Procesy zpracování ropy a zemního plynu (zejména aminové vypírky, Clausovy jednotky, stripery kyselých vod, vysoušení zemního plynu, atmosférická destilace).

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Hierarchie nakládání s odpady, převzato z [15] a upraveno.	16
Obr. 2.2 Vyhledávání v citační databázi SCOPUS: v abstraktech, názvech a klíčových slovech publikací bylo vyhledáváno „wastewater recycling“ (Recyklace), resp. „zero liquid discharge“ (EVOV).....	17
Obr. 2.3 Ilustrace informační hustoty různých návrhových nástrojů a jejich typické uplatnění v průběhu návrhu.....	18
Obr. 2.4 Ilustrace procesních omezení a rozdílu mezi funkčním návrhem (založeným na empirických pravidlech) a optimálním návrhem (vzhledem k určitému kritériu); převzato z [17] a upraveno.....	19
Obr. 3.1 Proces selekce literatury, která je předmětem řešerše.	21
Obr. 4.1 Přehled metod úprav digestátu včetně rozdělení dle daného účelu; převzato z [83].	39
Obr. 5.1 Fáze vývoje návrhové metodiky.	42
Obr. 5.2 Metodika, která byla předmětem ověření, vylepšení a nasazení na konkrétní případové studii.	43
Obr. 5.3 První část metodiky: sběr dat a potvrzení věrohodnosti zvolených návrhových postupů.....	44
Obr. 5.4 Druhá část metodiky: vymezení provozní obálky, její konfrontace s požadovanými parametry a zkoumání chování systému mj. o různé velikosti. ...	45
Obr. 5.5 Třetí část metodiky: optimalizace a posouzení ekonomiky procesu.	46
Obr. 5.6 Vymezení předchozí práce a relevantních částí, kde byla prvotně nasazována metodika v rámci projektu TAČR FW03010481 (REDIGE).	48
Obr. 5.7 Metodika upravená na základě prvotní aplikace.....	51
Obr. 6.1 Srovnání naměřené a predikované koncentrace ethanolu v destilátu při různé míře odpaření (experiment z 20. 5. 2021).	56
Obr. 6.2 Srovnání naměřené a predikované koncentrace kyseliny octové v destilátu při různé míře odpaření (experiment z 20. 5. 2021).....	57
Obr. 6.3 Srovnání naměřené a predikované CHSK vyčištěné vody po opakovaných průchodech stripovací kolonou (experiment z 11. 8. 2021).	58
Obr. 6.4 Zjednodušené schéma navrženého vícestupňové odparky s mechanickou kompresí par (MEE-MVC).....	59
Obr. 6.5 Rektifikační modifikace odpařovacích komor za účelem separace ethanolu a vody.	60
Obr. 6.6 Zjednodušené schéma navržené vícestupňové mžikové odparky (MSF). ...	61
Obr. 6.7 Zjednodušené schéma navržené vzduchové stripovací kolony.....	63
Obr. 6.8 Přehled rozdílů v metodickém postupu pro jednotlivé scénáře; DP je označení pro návrhový bod (z angl. Design Point).	64
Obr. 6.9 Podrobnější popis postupu u Scénáře C.	71
Obr. 6.10 Prostor přípustných řešení Scénáře A dle omezující podmínky teploty na výtlaku z kompresoru (vyřazené body jsou označené X, zatímco modré odstíny o různé sytosti značí splnění omezující podmínky).....	74
Obr. 6.11 Bodový graf ukazující pro Scénář A a ČR vztah mezi celkovými ročními náklady (osa x) a emisemi CO ₂ (osa y), polohu jednotlivých optim a množinu nevyhovujících bodů (červeně).	75
Obr. 6.12 Bodový graf ukazující pro Scénář A a Itálii vztah mezi celkovými ročními náklady (osa x) a emisemi CO ₂ (osa y), polohu jednotlivých optim a množinu nevyhovujících bodů (červeně).	75
Obr. 6.13 Teplotní mapa pořizovacích nákladů Scénáře A (identická pro ČR a Itálii) se zvýrazněním čtyř optim (čtverec – DP COST, trojúhelník – DP CO ₂ , hvězda – kompromisní bod, šestiúhelník – minimální CAPEX).	76

Obr. 6.14 Vstupní a výstupní teplota MSF pro různá optima Scénáře B.....	78
Obr. 6.15 Struktura pořizovacích nákladů klíčového zařízení pro různá optima Scénáře B.....	79
Obr. 6.16 Srovnání pořizovacích nákladů pro ČR a Itálii a jednotlivá optima Scénáře B.....	80
Obr. 6.17 Srovnání celkových ročních nákladů (CRN) pro ČR a Itálii a jednotlivá optima Scénáře B.....	80
Obr. 6.18: Bodový graf ukazující pro Scénář B a jednotlivá optima vztah mezi celkovými ročními náklady (osa x) a emisemi CO ₂ (osa y).....	81
Obr. 6.19 Bodový graf zachycující umístění různých optim Scénáře C v závislosti na výšce kolony (osa y) a poměru V/L (osa x); pro odlišení překrývajících bodů je přidán drobný rozptyl.....	83
Obr. 6.20 Bodový graf ukazující pro Scénář B a jednotlivá optima vztah mezi celkovými ročními náklady (osa x) a emisemi CO ₂ (osa y); pro odlišení překrývajících bodů je přidán drobný rozptyl (pozn. optima min. CAPEX and DP COST pro Itálii identická nejsou).....	84
Obr. 6.21 Detailní bodový graf ukazující pro Scénář C a Itálii jednotlivá optima vztah mezi celkovými ročními náklady (osa x) a emisemi CO ₂ (osa y).....	85
Obr. 6.22 Vliv velikosti měřítka na investiční náklady – vzhledem k zanedbatelným rozdílům u Scénářů A a B jsou ČR a Itálie odlišeny jen pro Scénář C.....	86
Obr. 6.23 Bodový graf ukazující vztah mezi celkovými ročními náklady (osa x) a emisemi CO ₂ (osa y) pro všechny nalezená optima v rámci tří scénářů a obou zemí.....	87
Obr. 6.24 Normalizované hodnocení scénářů A, B a C (vyšší hodnota je výhodnější pro redukci CHSK a výtěžnost vody, nižší hodnota je výhodnější pro CAPEX, OPEX a emise CO ₂) pro ČR.....	89
Obr. 7.1 Další dílčí aplikace metodiky a jejich začlenění.....	96
Obr. 7.2 Snímek zachycující konfiguraci předběžného modelu; jednotlivé úseky PIPE-1 až PIPE-5 představují vertikální inkrementy DC kondenzátoru mezi přípojnými hrdly brýdových par z komor (v tomto případě konfigurace se 6 komorami).....	97
Obr. 7.3 Základní uspořádání poloprovozní jednotky na zpracování OVV, se zpětným využíváním vody ve vinařství a produkci roztoku ethanolu o vyšší koncentraci; ukázána je predikovaná materiálová bilance a kvalita výstupních proudů.....	98
Obr. 7.4 Vrstevnicový graf peněžního toku recyklační technologie v závislosti na ceně vody a ceně ethanolového produktu; zelená oblast vyznačuje výhodnost recyklační technologie.....	99
Obr. 7.5 Peněžní tok recyklační technologie jako funkce na ceny vody a ceny elektřiny.....	100
Obr. 7.6 Základní uspořádání a procesní proudy v jednotce přímé osmózy.....	100
Obr. 7.7 Vliv klíčových proměnných na tlakovou ztrátu podél dutých vláken (strana odpadní vody).....	101

Seznam tabulek

Tab. 1-1 Struktura cílů práce a použitých metod.....	14
Tab. 1-2 Struktura cílů práce a použitých metod (pokračování).	15
Tab. 3-1 Výsledky rešerše: odpařovací technologie.....	22
Tab. 3-2 Výsledky rešerše: membránové technologie.	24
Tab. 3-3 Výsledky rešerše: krystalizační technologie.	26
Tab. 3-4 Výsledky rešerše: hybridní technologie.....	26
Tab. 3-5 Výsledky rešerše: jiné technologie.	28
Tab. 4-1 Pětice odpadních vod relevantních v rámci výzkumu Ústavu procesního inženýrství.	31
Tab. 4-2: Rámcové srovnání technologií pro zpracování odpadních vod z vinařství	35
Tab. 4-3 Výsledky analýzy téměř 2000 vzorků digestátu odebraných z bioplynových stanic napříč členskými státy EU v období 2009–2012; převzato z [84].....	38
Tab. 4-4: Srovnání technologií pro zpracování digestátu.....	40
Tab. 5-1: Navržené úpravy terminologie metodiky.....	49
Tab. 6-1 Experimentální jednotky pro ověření modelu.....	55
Tab. 6-2 Návrhové složení odpadní vody.....	59
Tab. 6-3 Scénář A: Procesní parametry a výchozí předpoklady pro modelování. ..	60
Tab. 6-4 Scénář B: Procesní parametry a výchozí předpoklady pro modelování. ..	62
Tab. 6-5 Scénář C: Procesní parametry a výchozí předpoklady pro modelování. ..	63
Tab. 6-6 Koeficienty pro výpočet ceny klíčového zařízení různých kategorií.	66
Tab. 6-7 Hodnoty vstupních proměnných pro účelové funkce (jednotkové ceny jsou z roku 2022, emisní faktor elektřiny z roku 2021; emisní faktor tepla je považován za invariantní vzhledem k použití zemního plynu).....	67
Tab. 6-8 Přehled omezení pro optimalizaci v rámci zjednodušeného modelu.	69
Tab. 6-9 Matice vysvětlujících proměnných pro náhradní model Scénáře C.	72
Tab. 6-10 Přehled odezev (závislých proměnných) a jejich jednotek pro náhradní model Scénáře C.....	72
Tab. 6-11 Srovnání ukazatelů výkonnosti napříč scénáři a zeměmi (kompromisní body).....	88
Tab. 6-12 SWOT analýza všech tří scénářů.	92

Seznam příloh

- Příloha: Soubor rovnic reprezentujících zjednodušený model MSF

Příloha

Soubor rovnic reprezentujících zjednodušený model MSF

$$\dot{m}_{dis} = \dot{m}_{feed} - \dot{m}_{conc}$$

$$CF = \frac{\dot{m}_{feed}}{\dot{m}_{concentrate}}$$

$$HRS = CH - HJS$$

$$\Delta T_{MSF} = \frac{T_{in} - T_{out}}{CH}$$

$$\dot{Q}_{HW} = \frac{l_v \cdot \dot{m}_{dis} \cdot HJS}{CH}$$

$$\dot{Q}_{HW,corr} = \frac{l_v \cdot \dot{m}_{dis} \cdot HJS \cdot R}{CH \cdot (R - 1)} + c_p \cdot (\dot{m}_{dis} T_{dis} + \dot{m}_{conc} T_{conc} - \dot{m}_{feed} T_{feed})$$

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{l_v \cdot \dot{m}_{dis} \cdot R}{CH \cdot (R - 1)}$$

$$\dot{m}_{rec} = \frac{\dot{m}_{dis} \cdot l_v}{(T_{out} - T_{in}) c_p}$$

$$T_{rec} = T_{HRS,in} + \frac{HRS \cdot \dot{Q}_{cond}}{c_p \cdot \dot{m}_{rec}}$$

$$T_{HRS,in} = \frac{(\dot{m}_{rec} - \dot{m}_{feed}) T_{out} + T_{feed,ph} \cdot \dot{m}_{feed}}{\dot{m}_{rec}}$$

$$\Delta T_{HRSn,hot} = (T_{in} - HRS \cdot \Delta T) - \left(T_{HRS,in} + \frac{\dot{Q}_{cond}}{c_p \cdot \dot{m}_{rec}} \right)$$

$$\Delta T_{HRSn,cold} = (T_{in} - HRS \cdot \Delta T) - T_{HRS,in}$$

$$\Delta T_{LM,HRSn} = \frac{\Delta T_{HRSn,hot} - \Delta T_{HRSn,cold}}{\ln \frac{\Delta T_{HRSn,hot}}{\Delta T_{HRSn,cold}}}$$

$$(UA)_{HRS} = \frac{HRS \cdot \dot{Q}_{cond}}{\Delta T_{LM,HRSn}}$$

$$A_{HRS} = \frac{(UA)_{HRS}}{U_{HRS}}$$

$$\dot{m}_{HW} = \dot{m}_{CW} = \dot{m}_{rec}$$

$$T_{HW,out} = T_{HW,in} - \frac{\dot{Q}_{HW,corr}}{c_p \cdot \dot{m}_{HW}}$$

$$\Delta T_{LM,HW} = \frac{(T_{HW,in} - T_{in}) - (T_{HW,out} - T_{rec})}{\ln \frac{T_{HW,in} - T_{in}}{T_{HW,out} - T_{rec}}}$$

$$(UA)_{HW} = \frac{\dot{Q}_{HW}}{\Delta T_{LM,HW}}$$

$$A_{HW} = \frac{(UA)_{HW}}{U_{HW}}$$

$$T_{CW,out} = T_{CW,in} + \frac{\dot{Q}_{cond}}{c_p \cdot \dot{m}_{CW}}$$

$$\Delta T_{CW,min} = T_{out} - T_{CW,out}$$

$$\Delta T_{LM,CW} = \frac{(T_{out} - T_{CW,out}) - (T_{out} - T_{CW,in})}{\ln \frac{T_{out} - T_{CW,out}}{T_{out} - T_{CW,in}}} = \frac{T_{CW,in} - T_{CW,out}}{\ln \frac{T_{out} - T_{CW,out}}{T_{out} - T_{CW,in}}}$$

$$(UA)_{CW} = \frac{HJS \cdot \dot{Q}_{cond}}{\Delta T_{LM,CW}}$$

$$A_{CW} = \frac{(UA)_{CW}}{U_{CW}}$$

$$T_{feed,ph} = T_{feed} + \frac{\dot{Q}_{ph}}{c_p \cdot \dot{m}_{feed}}$$

$$\dot{Q}_{ph} = \frac{c_p \cdot \dot{m}_{dis}(T_{dis,ph,in} - T_{dis,ph,out})(R - 1)}{R}$$

$$T_{dis,ph,in} = \frac{T_{in} - \Delta T + T_{out}}{2}$$

$$T_{dis,ph,out} = T_{feed} + \Delta T_{ph,min}$$

$$\Delta T_{LM,ph} = \frac{\Delta T_{ph,min} - T_{dis,ph,in} + T_{feed,ph}}{\ln \frac{\Delta T_{ph,min}}{T_{dis,ph,in} - T_{feed,ph}}}$$

$$(UA)_{ph} = \frac{\dot{Q}_{ph}}{\Delta T_{LM,ph}}$$

$$A_{ph} = \frac{(UA)_{ph}}{U_{ph}}$$

$$P_{pump,i} = \frac{\Delta p_{pump,i} \cdot \dot{V}_{pump,i}}{\eta_{pump}}$$

$$\rho_V = \frac{p_V M_V}{RT_{abs,V}} = \frac{0.61078 \cdot e^{\frac{17.27T_V}{T_V+237.3}} M_V}{R(T_V + 273.15)}$$

$$\dot{V}_{V,max} = \frac{m_{dis}}{\rho_V(T_{out}) \cdot CH}$$

$$D_{cham} = \sqrt{\frac{4\dot{V}_{V,max}}{\pi c_{V,max}}}$$

$$H_{cham} = H_{pack} + H_{dem}$$

$$m_{cham} = \rho_{steel} \pi t_{cham} D_{cham} \left(H_{cham} + \frac{D_{cham}}{2} \right)$$

$$V_{pack} = H_{pack} \frac{\pi D_{cham}^2}{4}$$

Proměnná	Význam	Jednotka
\dot{m}	hmotnostní průtok	kg/h
CF	koncentrační faktor	–
CH	počet odpařovacích komor	–
HRS	počet sekcí pro rekuperaci tepla	–
HJS	počet sekcí chlazených vodou	–
$T / \Delta T$	teplota / teplotní rozdíl	°C or K
c_p	měrná tepelná kapacita za konst. tlaku	kJ/(kg · K)
l_v	měrné skupenské teplo varu vody	kJ/kg
R	refluxní poměr (v rektifikační modifikaci)	–
\dot{Q}	tepelný výkon	kW
(UA)	součín UA (viz níže)	kW/K
U	součinitel prostupu tepla	kW/(m ² · K)
A	teplosměnná plocha	m ²
P	příkon	W
$p / \Delta p$	tlak / tlaková změna	Pa
η_{pump}	účinnost čerpadla	–
\dot{V}	objemový průtok	m ³ /s
ρ	hustota	kg/m ³
R	univerzální plynová konstanta	kJ/(kmol · K)
M	molární hmotnost	kg/kmol
c	rychlost proudu	m/s
D	průměr zařízení	m
H	výška zařízení	m
t	tloušťka stěny	m
V	objem	m ³

Index	Popis/přiřazeno k
<i>dis</i>	destilát
<i>feed</i>	vstupní voda
<i>conc</i>	koncentrát
<i>MSF</i>	přes celou odparku
<i>in</i>	vstupní proud
<i>out</i>	výstupní proud
<i>HW</i>	ohřevný výměník
<i>corr</i>	korigováno (na entalpii přes hranici procesu a reflux)
<i>cond</i>	kondenzátor (jedné z komor)
<i>HRS</i>	soubor sekcí pro rekuperaci tepla
<i>HRS_n</i>	<i>n</i> -tá sekce pro rekuperaci tepla
<i>hot</i>	horká strana výměníku
<i>cold</i>	chladná strana výměníku
<i>LM</i>	střední logaritmický (teplotní spád)
<i>ph</i>	předehřev
<i>pump, i</i>	čerpadlo <i>i</i> (recirkulát, chladicí voda, topná voda, destilát, koncentrát)
<i>min</i>	minimální teplotní přiblížení (návrhový parametr)
<i>V</i>	parní fáze
<i>max</i>	nejvyšší rychlost proudu (návrhový parametr) nebo objemový průtok (z výpočtu)
<i>dem</i>	demister (včetně výšky na separaci kapek)
<i>cham</i>	odpařovací komora
<i>steel</i>	ocel (konstrukční materiál komor)
<i>pack</i>	výplň (rektifikační modifikace)