České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vícekriteriální optimalizace akumulátoru tepla s PCM ve válcových pouzdrech

Multi-Objective Optimization of Thermal Energy Storage System with Cylindrical Encapsulated PCM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Leoš Jindřich
Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D
Rok: 2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jindřich** Jméno: **Leoš** Osobní číslo: **482401**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vícekriteriální optimalizace akumulátoru tepla s PCM ve válcových pouzdrech

Název bakalářské práce anglicky:

Multi-Objective Optimization of Thermal Energy Storage System with Cylindrical Encapsulated PCM

Pokyny pro vypracování:

Za použití dostupné literatury popište základní principy vícekriteriální optimalizace a pokuste se nalézt příklady použití vícekriteriální optimalizace v oblastech souvisejících s termodynamikou. Za použití poskytnutého numerického modelu modelujte akumulátor tepla s PCM. Definujte skupinu cílových funkcí, které charakterizují akumulátor tepla a jeho chování. Zvolte sadu geometrických parametrů akumulátoru a okrajové podmínky, které použijete v optimalizaci. Proveďte vícekriteriální optimalizaci akumulátoru tepla. Analyzujte získané výsledky a případně doplňte řešené varianty o další, které dovolí lépe zhodnotit vliv jednotlivých parametrů na hodnoty cílových funkcí. Diskutujte a analyzujte výsledky vícekriteriální optimalizace.
Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D., ústav mechaniky tekutin a termodynamiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.	Ing. Michal Schmirler, Ph.D.	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

. _____ _____

Datum převzetí zadání Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Název práce:

Vícekriteriální optimalizace akumulátoru tepla s PCM ve válcových pouzdrech

Title:

Multi-Objective Optimization of Thermal Energy Storage System with Cylindrical Encapsulated PCM

Autor:	Leoš Jindřich
Rozsah práce:	51 stran 3 tabulky 29 obrázků

Akademický rok:	2020/2021
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor:	bez oboru
Ústav:	Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Druh práce:	Bakalářská práce
Vedoucí práce:	doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky, Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze
Klíčová slova:	vícekriteriální optimalizace, pareto množina, tepelný akumulátor, PCM
Key words:	Multi-Objective Optimization, Pareto set, Heat Accumulator, PCM

Abstrakt: Cílem této bakalářské práce je nalezení oblasti optimálních parametrů akumulátoru s PCM a posoudit vztahy mezi jednotlivými cílovými funkcemi na základě metod vícekriteriální optimalizace. Postupně se práce zabývá seznámením s metodami vícekriteriální optimalizace, vysvětlením jejích základních principů a také stručným popisem zmiňovaného tepelného akumulátoru. Následně se věnuje potřebným úpravám numerického modelu akumulátoru, který je vytvořen v prostředí softwaru MATLAB a na jehož základě jsou získávány průběhy cílových funkcí. V závěru je uveden komentář k zobrazení výsledků optimalizace a způsobu doplnění dalších bodů do křivek získaných pareto povrchů.

Abstract: The aim of this bachelor thesis is to find the area of optimal parameters of the accumulator with PCM and to assess the relationships between individual objective functions based on multiobjective optimization methods. Gradually, the thesis deals with acquaintance with methods of multiobjective optimization, explanation of its basic principles and also a brief description of the mentioned heat accumulator. Subsequently, it deals with the necessary modifications of the numerical model of the accumulator, which is created in the MATLAB software environment and on the basis of which the waveforms of the objective functions are obtained. Finaly the thesis comments on the representation of optimization results and the way of adding other points to the curves of the obtained pareto fronts.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením doc. Ing. Tomáše Hyhlíka, Ph.D. a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.
Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne ....

Leoš Jindřich

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Tomáši Hyhlíkovi, Ph.D za vedení, pomoc a cenné rady při tvorbě mé bakalářské práce.

Leoš Jindřich

Obsah

Úvod **9**

1 Teoretický rozbor **10**

1.1 Materiály s fázovou přeměnou 10

1.2 Popis akumulátoru 11

1.2.1 Konstrukce 11

1.2.2 Princip 11

1.3 Metody vícekriteriální optimalizace 13

1.4 Pareto množina 15

1.4.1 Distanční kritérium 16

1.5 Zvolený postup optimalizace 17

1.6 Definice optimalizační úlohy 18

1.6.1 Definice požadavků 18

1.6.2 Rozsahy volených parametrů 19

1.6.3 Cílové funkce 21

2 Optimalizace **23**

2.1 Příprava numerického modelu 23

2.1.1 Úprava třídy modelu 23

2.2 Funkce pro nalezení pareto povrchů 24

2.3 Vyhodnocení mezivýsledků 25

2.4 Doplnění bodů pareto povrchu 31

2.4.1 Využití prostoru 31

2.4.2 Délka pouzder PCM 36

Závěr **38**

Seznam použitých symbolů **41**

Seznam obrázků **43**

Seznam tabulek **44**

Literatura **46**

Přílohy **47**

A Další výstupy simulací **47**

B Materiálový list SP31 [3] **50**

Úvod

Hlavním tématem této práce je vícekriteriální optimalizace tepelného akumulátoru využívajícího latentní teplo. S pojmem optimalizace je možné se běžně setkat napříč velkou skupinou nejen technických oborů. Obecně ji lze definovat jako nástroj, který na základě analytických anebo dnes spíše numerických metod vyhledává ideální návrhy požadovaných parametrů bez nutnosti explicitního vyčíslení všech možných variant. Různé metody optimalizace jsou široce využívány jak při vývoji nových produktů, tak při zdokonalování již existujících zařízení nebo systémů [1].

Procesy numerické optimalizace jsou založeny na iterativních algoritmech implementovaných do výpočetních softwarů. Přesnost získaných výsledků jednoznačně závisí na přesnosti matematického popisu problému, a proto obvykle není možné se zcela vyhnout reálným laboratorním experimentům. Přesto však numerické metody optimalizace umožňují výrazně zkrátit čas a snížit náklady vývojové procedury [1].

Nejinak je tomu i v případě vývoje výše zmíněného tepelného akumulátoru. V rámci snahy o snižování spotřeby energie jsou neustále vyvíjena nová zařízení, jež by k tomu dopomohla. Perspektivní jsou v této oblasti tepelné akumulátory s PCM, které umožňují uchovat energii například z teplé odpadní vody a později ji zužitkovat. Jejich hlavní výhodou je především malá prostorová náročnost vzhledem k akumulačnímu potenciálu.

Práce si klade za cíl seznámit čtenáře s problematikou vícekriteriální optimalizace a jejími základními mechanismy, které budou dále aplikovány na konkrétní úlohu v prostředí softwaru MATLAB. Cílem samotné optimalizace je určení vztahů mezi cílovými funkcemi a mezi parametry a také návrh dalšího postupu řešení této úlohy.

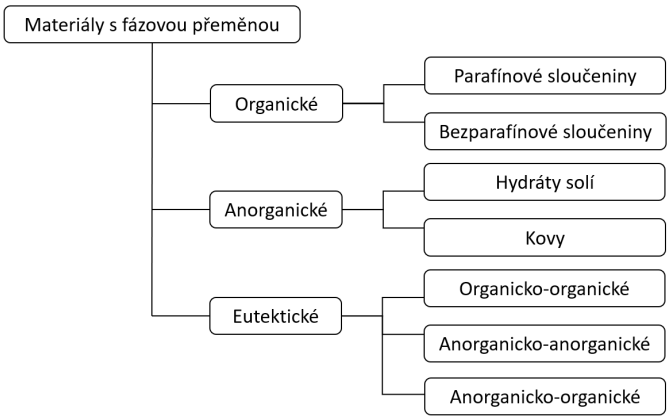
Kapitola 1

Teoretický rozbor

Tato kapitola slouží k seznámení s významnými prvky akumulátoru a zároveň s fyzikální podstatou jeho fungování. Následně se zabývá metodami vícekriteriální optimalizace a jejími základními principy. Na konci je uveden počáteční stav včetně rozsahu vstupních parametrů a cílových funkcí použitých v optimalizační úloze.

1.1 Materiály s fázovou přeměnou

Materiály s fázovou přeměnou neboli PCM používané do latentních akumulátorů tepla je možné rozdělit do několika skupin viz. obrázek 1. Volba PCM je z pohledu akumulace zcela zásadní a probíhá zejména na základě vlastností, jako jsou pracovní teplota látky, tepelná kapacita, měrné skupenské teplo fázové změny, a samozřejmě hraje svou roli i cena materiálu [2]. Každá varianta se tedy hodí pro jiné aplikace a pro účely této práce byla vybrána látka SP31, jejíž materiálový list je uveden v přílohové části B. Jedná se o PCM anorganického kompozitního složení a jeho teplota přeměny kapalného skupenství na pevné se pohybuje mezi 28-30 °C [3].

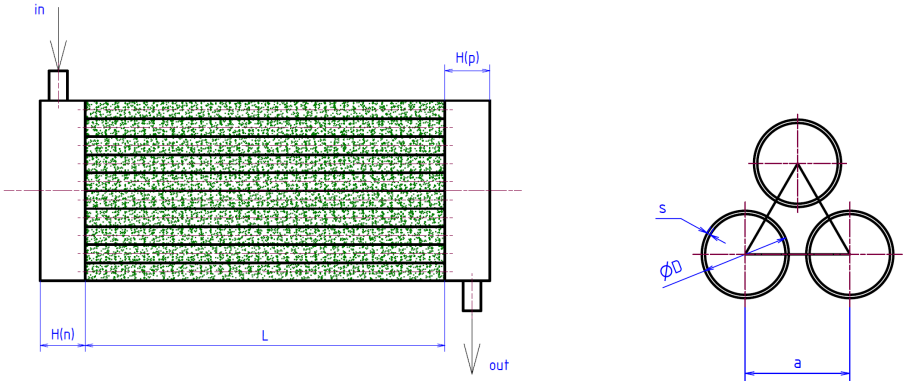


Obrázek 1: Rozělení PCM, podle [2]

1.2 Popis akumulátoru

Typů tepelných akumulátorů je více, například vodní akumulátory, stone-bed nebo právě s PCM, a i ty lze dále rozdělit podle konstrukce. Na následujících řádcích jsou uvedeny základní charakteristiky akumulátoru s PCM ve válcových pouzdrech, nutné pro porozumění postupu v optimalizační úloze, kterou se tato práce zbývá [4].

1.2.1 Konstrukce



(a) Nádrž akumulátoru (b) Uspořádání trubek

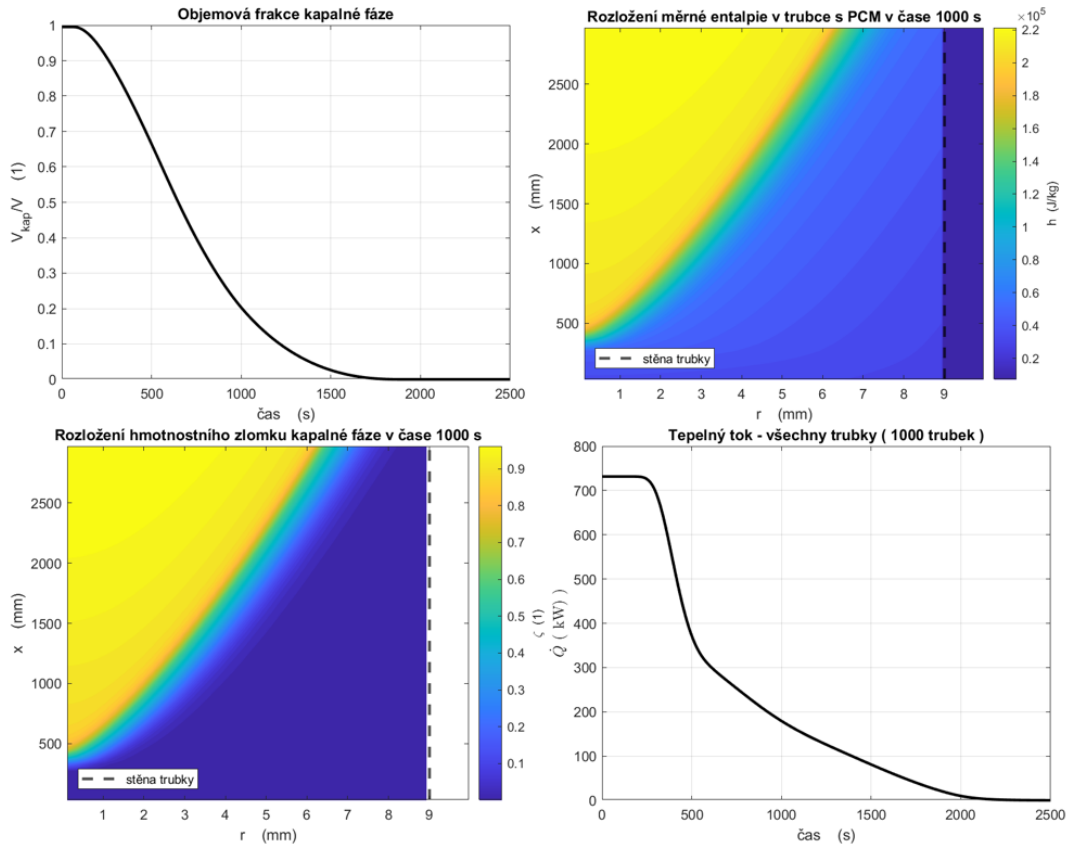
Obrázek 2: Konstrukce akumulátoru

Konstrukce akumulátoru je v podélném řezu schematicky znázorněna na obrázku 2a. Hlavní částí akumulátoru je válcová nádrž, ve které jsou umístěny ventily pro přívod a odvod teplonosného média. Uvnitř nádrže se nachází trubky naplněné PCM, jejichž délka je označena písmenem L. Napravo i nalevo od části s trubkami jsou tzv. vyrovnávací objemy, které slouží k zajištění rovnoměrného proudění média.

Na obrázku 2b je detail uspořádání trubek v nádrži. Všechny mají stejné rozměry a libovolné sousední trojice vytvářejí spojnicí svých středů rovnostranný trojúhelník s délkou strany a.

1.2.2 Princip

Princip akumulátoru spočívá v tom, že teplonosné médium proudí skrze nádrž a v případě vybíjení odebírá teplo z PCM. Základními mechanismy procesu jsou nucená konvekce mezi stěnou trubky a médiem a vedení tepla stěnou trubky i samotným PCM. Samozřejmě se ale jedná o mnohem komplexnější problematiku, kterou nelze řešit analyticky. Z tohoto důvodu byl vytvořen numerický model [5], jenž byl autorovi pro účely této práce poskytnut. Průběh vybíjení je znázorněn na vybraných výstupech z modelu uvedených na obrázku 3.



Obrázek 3: Numerický model-výstupy, upraveno z [5]

Z grafů je možné mj. vyčíst, že se jednalo o simulaci s 1000 trubkami o vnějším poloměru 10 mm a tloušťkou stěny 1 mm. Médium, v tomto případě voda, mělo hmotnostní tok 5 kg/s a během procesu došlo k úplnému vybití akumulátoru ve stanoveném čase 2500 s. Důležitý je zejména tvar vybíjecí křivky (obr. 3 vpravo dole). V ideálním případě by byl její průběh konstantní a nad minimální využitelnou hodnotou výkonu (např. nad 200 kW). To samozřejmě není možné, a proto je snaha alespoň udržet výkon nad danou hranicí po co nejdelší čas vybíjecího cyklu. Také je vhodné si všimnout rozložení hmotnostního zlomku kapalné fáze (obr. 3 vlevo dole), kde se ukazuje, že PCM tuhne od okrajů trubky k jejímu středu. Tento jev je nežádoucí, neboť výrazně komplikuje vybíjení tím, že ztěžuje přestup tepla do ochlazovacího média.

1.3 Metody vícekriteriální optimalizace

Problematika volby optimalizační metody je velice rozsáhlá, protože existuje velké množství rozličných přístupů. Například nelze určit jeden obecně nejlepší postup, který povede nejrychleji k cíli, protože ten vždy záleží na konkrétní optimalizační úloze. Kromě toho není ani neobvyklé, že i jedna a ta samá úloha je řešena různými autory odlišně, a ne vždy lze jednoznačně rozhodnout, která z použitých metod dosáhla lepších výsledků.

V článku [6] pojednávají autoři o nejběžněji používaných metodách vícekriteriální optimalizace a poskytují výklad k základním principům jejich fungování. Mimo jiné popisují evoluční algoritmy jako SPEA2 (The Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2) či NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II). Obě tyto metody spadají do kategorie evolučních algoritmů (MOEAs) založených na principu vyhledávání pareto množin. Je vhodné poznamenat, že genetické algoritmy jsou pouze podmnožinou těch evolučních, nejedná se o tedy o jinou skupinu metod. Evoluční algoritmy, jak naznačuje název, jsou inspirovány Darwinovou teorií o vývoji druhů. Během vyhledávání probíhají selekce, rekombinace a mutace tak, aby vývoj populace neboli parametrů směřoval k nejvýhodnějším řešením. Význam pareto množin a pareto povrchů bude podrobněji popsán níže. Zjednodušeně lze říci, že pareto množina má význam množiny optimálních řešení. Dále se článek zabývá skalarizačními technikami optimalizace a okrajově se zmiňuje o metodách neevolučního charakteru, jakou je například PSO (Particle Swarm Optimization).

Konečnou fází optimalizace je také po nalezení množiny vyhovujících řešení vybrat jedno, které bude skutečně použito. Ve studii [7] se autoři zabývají vývojem nové rozhodovací metody konkrétně pro optimalizaci návrhových parametrů elektráren fungujících na principu organického Rankinova cyklu. Jako metoda pro nalezení pareto množin je použit již zmiňovaný algoritmus NSGA-II, jenž je v textu uveden jako jeden z nejčastěji používaných způsobů vícekriteriální optimalizace. Vyvinutá aplikace, která nese název TRADeS (Tracking and Recognizing Alternative Design Solutions), vznikala na základech poměrně často využívaného principu rozhodování TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution).

TOPSIS je technika založená na párovém srovnání bodů pareto množiny. Vyhledává návrhy, které mají nejkratší vzdálenost od hypotetického ideálu a zároveň nejdelší vzdálenost od nejhorší alternativy. Konečnou podobu řešení může ovlivnit i rozhodovatel, neboť technika umožňuje nastavit váhu každému kritériu podle preferencí [7].

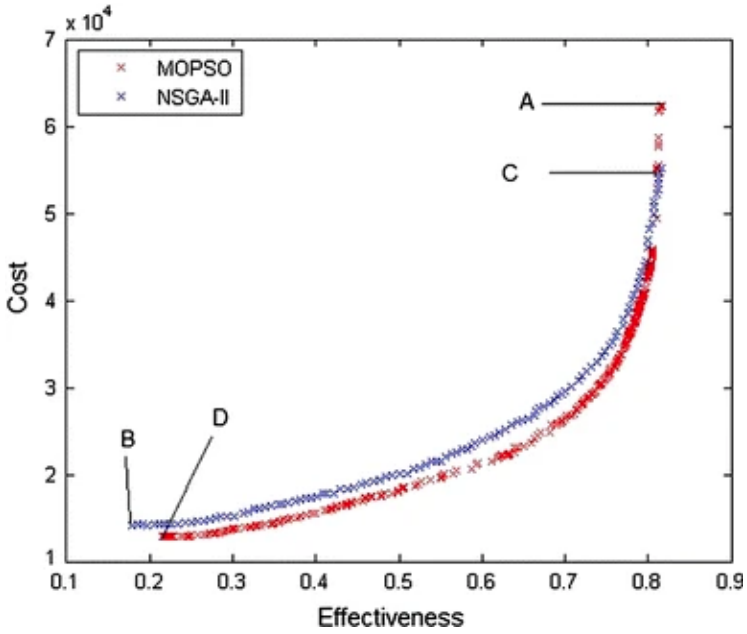
Dalším příkladem optimalizace z oblasti blízké této práci je studie [8], ve které se autoři zabývají vícekriteriální optimalizací plášťového trubkového výměníku s rekuperací tepla. Studie si klade za cíl určit optimální hodnoty parametrů výměníku, jako jsou uspořádání, průměr, osová vzdálenost, délka a počet trubek, poměr rozteče přepážek a poměr řezu přepážky. Vícekriteriální optimalizace je vztažena k cílovým funkcím maximální efektivity, tedy k rekuperaci tepla a k minimu celkových nákladů, které jsou dány součtem pořizovací ceny a provozu výměníku po dobu deseti let. Jako optimalizační metoda byl opět použit již několikrát zmiňovaný genetický

algoritmus s názvem NSGA-II. Iniciační populace čítala 100 jedinců a výpočty probíhaly pro 200 generací.

Autoři studie [9] se ve své práci zabývají stejnou optimalizační úlohou, jaká byla popsána v předchozím odstavci, ale pro její řešení zvolili algoritmus neevolučního charakteru, a to Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO).

MOPSO je metoda strukturálně podobná evolučním algoritmům, ale inspirací se pro ni stalo chování hejn ptáků či ryb. Principiálně jde o to, že z populace jsou vybráni nejlepší kandidáti tzv. „guides“ na základě Paretova systému hodnocení, jedná se tedy o nedominované body v určité oblasti prostoru funkcí. Tyto body následně ovlivňují směr vývoje ostatních jedinců populace. Jednotlivá individua si také „pamatují“ svou historicky nejlepší polohu [10].

Výsledky obou metod jsou následně v uvedené studii [9] porovnány z hlediska nejvyšší nalezené efektivity, minimální celkové ceny a maximálního přenosu tepla. Ve všech těchto srovnáních dosáhla metoda MOPSO lepších hodnot. Také bylo pro zhodnocení obou algoritmů použito distanční kritérium, zjednodušeně se jedná výběrový rozptyl pareto povrchu (podrobněji v sekci 1.4.1), kde metoda MOPSO taktéž dosáhla lepšího, tedy nižšího, skóre. Ovšem podle autorů článku [11] není distanční kritérium nejlepší volbou pro pareto povrch, kde jsou body rozmístěny do více skupin, neboť získané závěry nemusí být zcela vypovídající. Porovnání pareto povrchů, dosažených uvedenými metodami pro plášťový trubkový tepelný výměník podle studie [9], je uvedeno na obrázku 4 níže. Vyplývá z něj, že se metodě MOPSO většinou dařilo nacházet levnější řešení při zachování efektivity.



Obrázek 4: Pareto povrchy MOPSO a NSGA-II, z [9]

V některých případech je problematika optimalizace natolik složitá, že není možné získat či kvantifikovat cílové funkce, tedy určit kritérium nebo kritéria, podle kterých

lze posuzovat výhodnost jednotlivých řešení. Ve studii [12] je představen postup založený na modelování cílové funkce pomocí NN (neuronové sítě) a následné globální optimalizaci opět s využitím genetického algoritmu.

1.4 Pareto množina

Matematicky lze problematiku vícekriteriální optimalizace vyjádřit rovnicí 1, kde $\mathbf{x}$ je vektor proměnných parametrů, j počet těchto parametrů a f_{k_1} až f_{k_N} jsou kritéria neboli cílové funkce, podle kterých je posuzována kvalita řešení [13].

$$\min_x(F_{(\mathbf{x})}) = (f_{k_1(\mathbf{x})}, f_{k_2(\mathbf{x})}, ...f_{k_N(\mathbf{x})}) \tag{1}$$

$$\mathbf{x} \in S \subseteq \mathbb{R}^j \tag{2}$$

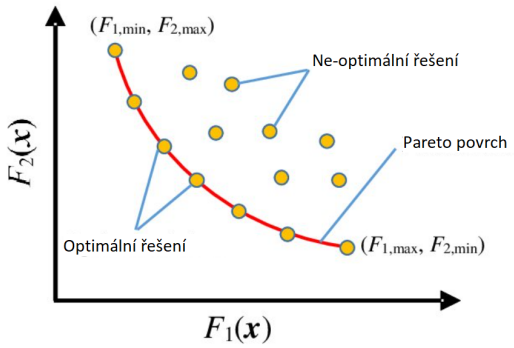
Pareto množina je soubor sad optimálních parametrů, pro které nabývají svých minim kriteriální funkce. Vektor parametrů $\tilde{\mathbf{x}}$ je nazýván pareto optimálním, jestliže splňuje pro všechna $i = 1, ..., n$ podmínku [13]:

$$f_{k_i(\tilde{\mathbf{x}})} \leq f_{k_i(\mathbf{x})} \tag{3}$$

a alespoň pro jedno i platí:

$$f_{k_i(\tilde{\mathbf{x}})} < f_{k_i(\mathbf{x})} \tag{4}$$

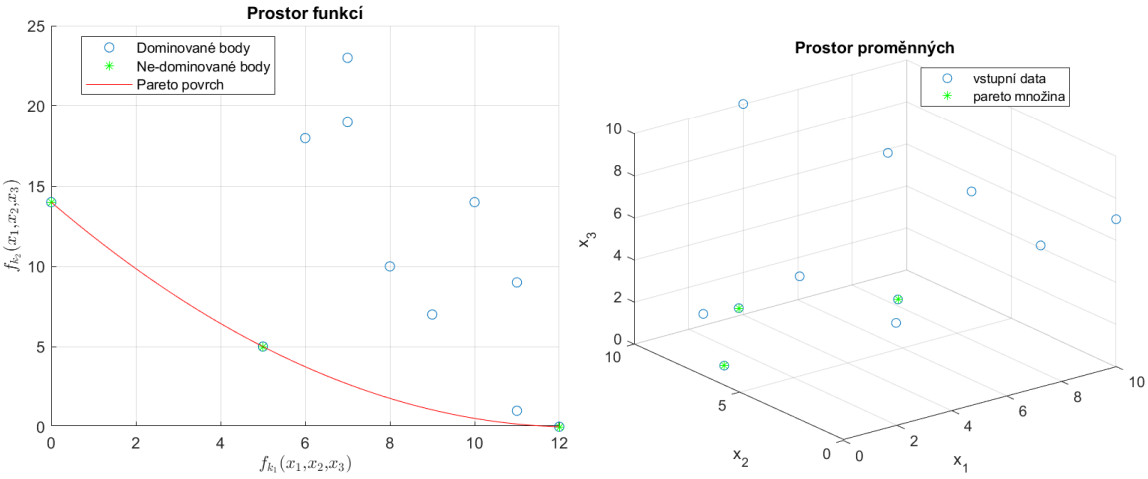
Pareto povrch je funkce proložená funkčními hodnotami kritérií v bodech definovaných pareto množinou, viz obr. 5 [14].



Obrázek 5: Pareto povrch, přeloženo z [15]

Pro lepší představu o zavedených pojmech a rozdílu mezi pareto množinou a pareto povrchem je uveden příklad optimalizační úlohy se třemi parametry a dvěma cílovými funkcemi. Pokud jsou známy výpočtové vztahy pro hodnoty funkcí v daném rozsahu parametrů a implementujeme počáteční populaci, je možné graficky zobrazit prostor funkcí i prostor proměnných (obr. 6).

Červená křivka má význam pareto povrchu, zeleně vyznačené body jsou takzvaně nedominované a jejich tvořící parametry x_1, x_2, x_3 tedy představují pareto množinu.



(a) Prostor funkcí (b) Prostor proměnných

Obrázek 6: Příklad zobrazení výsledků optimalizace

Evoluční algoritmus by v tuto chvíli analyzoval parametry především zeleně označených bodů a na základě výše popsaných principů by vytvořil další populaci a provedl další kolo výpočtů [6].

1.4.1 Distanční kritérium

Toto kritérium umožňuje posoudit kvalitu pareto povrchu tím, že zaznamenává vzdálenost mezi nejbližšími sousedními body, které jej aproximují. Čím nižší je hodnota (D) tohoto kritéria, tím kvalitněji je pareto povrch aproximován [11].

Jak již bylo uvedeno, pro případ nalezení bodů rozdělených do více skupin nepřináší distanční kritérium, z pochopitelných důvodů, dostatečně vypovídající informace o kvalitě aproximace. Svou oblíbenost si získalo především díky jednoduchému výpočtu, který popisují rovnice 5, 6 a 7 [11].

$$D = \sqrt{\frac{1}{M-1}\sum_{i=1}^{M}\left(\bar{d} - d_i\right)^2} \tag{5}$$

$$d_i = \min_{x_i, x_j} \sum_{n=1}^{N} |f_{k_n}(x_i) - f_{k_n}(x_j)| \qquad i \neq j; \quad i,j = 1,2,...,M \tag{6}$$

$$\bar{d} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^{M} d_i \tag{7}$$

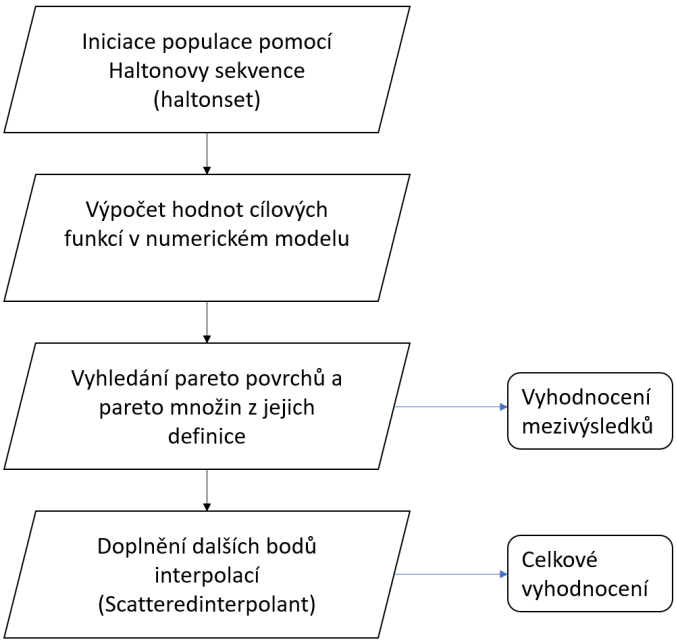
M je počet prvků populace, resp. počet nalezených bodů pareto povrchu a N počet kriteriálních funkcí dané úlohy.

1.5 Zvolený postup optimalizace

V rámci této práce byl k optimalizaci využit numerický model akumulátoru [5]. Z výše uvedených odborných článků vyplývá, že typicky se při vícekriteriální optimalizaci vyhledávají pareto množiny, ze kterých lze následně vybrat konečné řešení. Ovšem k nalezení pareto množiny není nutné použít sofistikovaný algoritmus, ale je možné ji vyhledat i pouze na základě jejích principů.

Optimalizace v této práci byla realizována pomocí kvazi-náhodného utvoření sad parametrů, pro které byly provedeny simulace v numerickém modelu. Dále byly pro dvojice zaznamenaných hodnot cílových funkcí nalezeny, případně již cíleně doplněny dalšími simulacemi, pareto povrchy a pareto množiny. Vzhledem k parametrům této optimalizace je dostačující provést 30 simulací v první fázi s předpokladem dalších cca 20 doplňujících.

Tento způsob umožnil sledovat celý vývoj parametrů nikoli pouze konečné výsledky. Také dovolil dobře vyhodnotit vztahy mezi cílovými funkcemi a oproti zmíněným algoritmům výrazně snížil náročnost implementace.



Obrázek 7: Schéma optimalizace

Ve schématu optimalizace (obr. 7) jsou v závorkách uvedeny funkce MATLABu vhodné pro použití v daném kroku. Podrobněji budou popsány později.

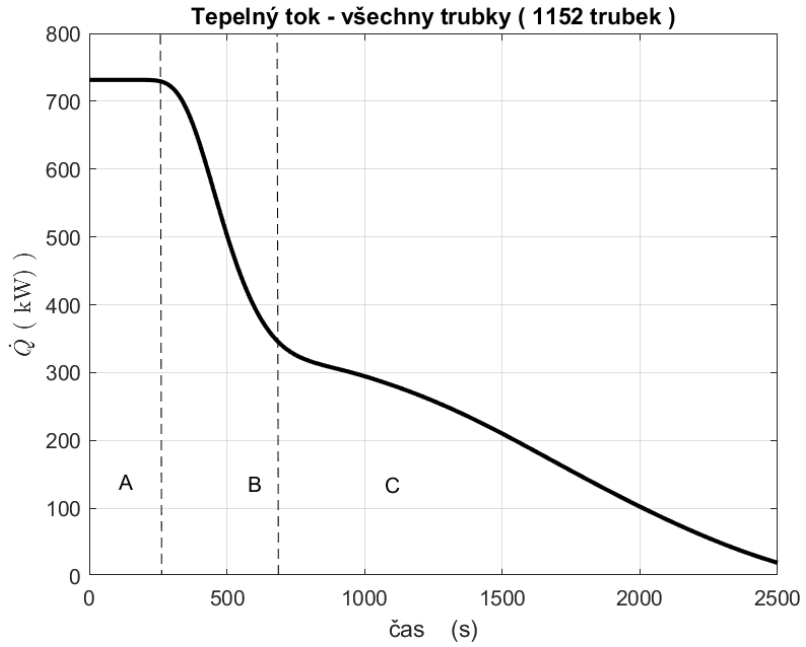
1.6 Definice optimalizační úlohy

Optimalizační proces je zaměřen na vybíjení akumulátoru. Jako výchozí stav je uvažována ideální situace, která nastane pouze bezprostředně po úplném nabití. Trubky naplněné PCM i voda v nádrži, použitá jako ochlazovací médium, mají maximální teplotu, což je v tomto případě horní hranice rozsahu pracovních teplot látky SP31, tedy 50 °C. Vybíjení je realizováno přivedením vody o teplotě 15 °C na vstup.

1.6.1 Definice požadavků

Cílem optimalizace je najít taková řešení, která splňují následující podmínky:

1. Minimální celkový objem akumulátoru.
2. Úplné vybití akumulátoru, resp. pokles frakce kapalné fáze PCM na hodnotu nižší než 0,01 za čas maximálně 2500 s.
3. Co nejmenší spád křivky výkonu - křivku výkonu akumulátoru během vybíjení lze rozdělit na několik oblastí(viz obr. 8).



Obrázek 8: Příklad průběhu výkonu, upraveno z [5]

Oblast A má konstantní průběh, protože dochází pouze k odtoku původní, ohřáté vody z nádrže. Hodnotu výkonu lze snadno zjistit podle rovnice 8.

Na hranici oblastí B a C dochází k výrazné změně spádu, lze také ukázat, že k této změně dochází v momentě, kdy výstupní teplota vody odpovídá teplotě fázového přechodu PCM. Ačkoliv pokles v B bude vždy strmější než v C,

vhodnou volbou parametrů lze v obou oblastech gradient přiblížit minimální hodnotě a tím udržet co nejvyšší výkon na výstupu akumulátoru.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_v \cdot (t_p - t_{in}) \tag{8}$$

Aby bylo možné tyto podmínky splnit, je nutné správně určit jak parametry, tak i cílové funkce úlohy. V této fázi optimalizace je lepší vybrat raději více kritérií a případně je později vyloučit při vyhodnocení mezivýsledků. Takto je možné postupovat hlavně díky zvolené metodě optimalizace, protože to nijak neovlivní ani výpočetní čas, ani nezkreslí výsledky, které naopak bude možné podpořit větším množstvím dat.

1.6.2 Rozsahy volených parametrů

Pro dosažení maximální objektivnosti je nutné zvolit intervaly hodnot parametrů co nejširší, aby nedošlo k nechtěnému vyloučení výhodných řešení z procesu optimalizace. Zároveň je však potřeba brát ohled na předpokládané místo aplikace a výrobu jednotlivých prvků zařízení.

Vlastnosti akumulátoru určené k optimalizaci jsou tyto:

1. Poloměr trubek (R)
2. Vzdálenost mezi středy každých tří sousedících trubek (a)
3. Hmotnostní tok vody protékající akumulátorem ($\dot{m}$)
4. Délka trubek (L)
5. Počet trubek (N)

Poloměr

Poloměr je volen v rozsahu 1 až 2 cm na základě předchozích simulací a experimentálních zjištění z reálného modelu. Jedná se o vnější poloměr trubek uložených v akumulátoru. Tloušťka stěny trubky je ve všech případech 1 mm. Je vhodné poznamenat, že pro takto malé průměry se vyrábí i trubky s tenčí stěnou, ale není příliš pravděpodobné, že by tato úprava měla významný vliv na účinnost akumulátoru. Navíc během vybíjení vzniká v trubkách podtlak kvůli významné objemové změně PCM při fázovém přechodu, takže neopodstatněné ztenčování stěny bez dalších výpočtů může vést k deformaci či roztržení trubek během vybíjení akumulátoru.

Vzdálenost

V návaznosti na předchozí zkušenosti s modelem je parametr a určen jako dvojnásobek[1] až trojnásobek poloměru pouzder. Tento rozsah je zvolen na základě zjištění z dříve autorem provedených výpočtů, které zkoumaly význam vzdálenosti vůči výkonu akumulátoru vzhledem ke kritériu jeho celkového objemu.

Hmotnostní tok

Rozsah hmotnostního toku je na základě požadavku o zachování dostatečně širokého intervalu volen od $0,5$ do $5\ kgs^{-1}$. Hmotnostní tok sice není tak docela parametrem akumulátoru, jimž se tato práce věnuje, ale je jedinou regulovatelnou veličinou vstupu. Navíc se od něj odvíjí výkon akumulátoru, což je jedna z cílových funkcí optimalizace, jak bude uvedeno později. Proto je správné jej zařadit mezi proměnné parametry.

Délka

Celková délka nádrže je dána součtem délky trubek a výškou regulačních obsahů nad a pod částí s trubkami. Je nutné, aby se délka nádrže pohybovala v rozumných hodnotách, tedy s ohledem na velikost prostoru, kde se předpokládá aplikace akumulátoru. Z tohoto důvodu je délka trubek zvolena v intervalu 1 až 5 m.

Počet

Počet kusů trubek v akumulátoru není definován přímo, ale dopočítává se z ostatních parametrů. Aby bylo možné jednotlivé kombinace porovnat, je nutné zajistit vždy stejnou výchozí hodnotu akumulované energie. V níže uvedených simulacích je tato energie (E) rovna 200 kWh. Je dána součtem uloženého tepla v PCM a ve vodě, která se nachází ve zbytku objemu nádrže. Z toho lze odvodit řídící rovnici pro množství trubek v akumulátoru (N):

$$N = \frac{E}{L \cdot \rho_L \cdot \pi \cdot \left(\frac{c_v \cdot \delta t_1 \cdot \rho_{v50} \cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cdot (H_n + H_p) \cdot a^2}{2} + \left(0.5 \cdot a^2 \cdot \sqrt{3} - \pi \cdot R^2\right) \cdot L \right)}{L \cdot \rho_L \cdot \pi \cdot (R-s)^2 \cdot (h_{PCM} + c_{PCM} \cdot \delta t_2)} + 1 \right)} \cdot \frac{1}{(R-s)^2 \cdot (h_{PCM} + c_{PCM} \cdot \delta t_2)} \tag{9}$$

Kromě výše zmíněných parametrů se v rovnici vyskytují pouze konstanty, jejichž význam je uveden v seznamu použitých symbolů.

Veškeré vstupní hodnoty a parametry jsou pro přehlednost shrnuty v tabulce 1.1 na konci této kapitoly.

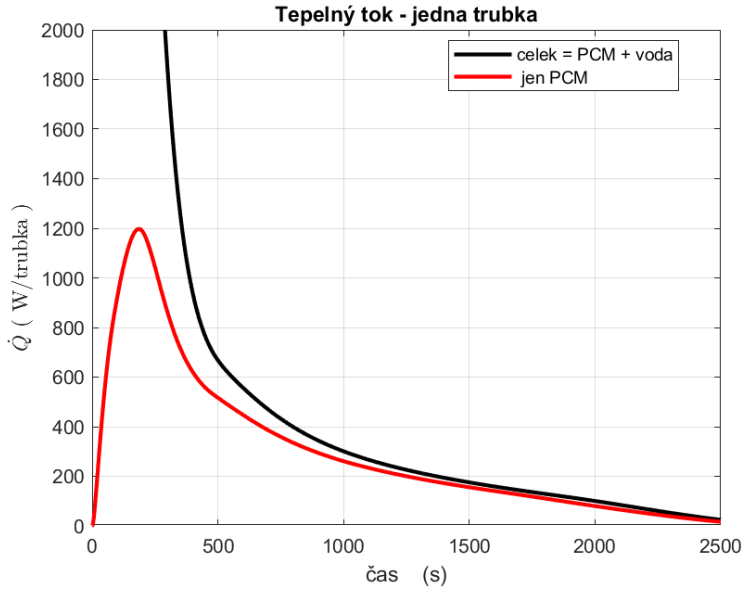
[1] dvojnásobek je vzhledem ke konstrukci minimální hodnota

1.6.3 Cílové funkce

Během simulací byly zaznamenávány kromě vstupních i následující výstupní a doplňkové hodnoty, pomocí kterých byla posuzována kvalita daného řešení v návaznosti na požadované vlastnosti akumulátoru:

1. celkový objem akumulátoru
2. objem PCM
3. čas vybití akumulátoru
4. čas, kdy voda na výstupu dosáhne 25 °C
5. čas, kdy voda na výstupu dosáhne 20 °C
6. frakce kapalné fáze PCM pro výstup 25 °C
7. frakce kapalné fáze PCM pro výstup 20 °C
8. minimální teplota vody na výstupu
9. maximální tepelný tok z jedné trubky ($\dot{Q}_{zPCM}$)

Specifickým kritériem je bod 9 v seznamu výše. Pro porovnání jednotlivých návrhů akumulátoru je potřeba určit, jak efektivně je vybíjeno PCM, protože právě v něm se má ukládat největší část energie. Pokud by byl zaznamenáván pouze výstupní výkon, bylo by problematické určit, kolik tohoto výkonu dodala voda a kolik PCM. Proto je nutné získat informace o průběhu vybíjení z pohledu využití tepla uloženého v PCM. Příklad tohoto průběhu je znázorněn červenou křivkou v následujícím grafu (obr. 9).



Obrázek 9: Příklad průběhu tepelného toku, z [5]

Aby bylo možné porovnat jednotlivé návrhy parametrů mezi sebou, není nutné zaznamenávat všechny hodnoty tepelného toku a vzhledem k parametrizaci hmotnostního toku vody ztrácí také smysl zaznamenávat i jakékoli časové údaje pro výkon. Postačujícím faktorem je vrchol červené křivky, neboť díky typickému průběhu lze z jeho hodnoty posoudit, jak účinně je odebíráno teplo z PCM.

K porovnání dat souvisejících s výkonem z PCM je také nezbytné normalizovat maximální tepelný tok z jedné trubky pomocí hmotnostního toku, jak je naznačeno v rovnici 10, která převádí celkový výkon z PCM na energii vztaženou k jednomu kgs^{-1} hmotnostního toku vody.

$$\dot{Q}_{zPCM} \rightarrow Q_{norm} = \frac{\dot{Q}_{zPCM} \cdot N}{\dot{m}} \qquad [J/kg] \tag{10}$$

Tabulka 1.1: Vstupní hodnoty a parametry

Symbol	**Hodnota**	**Popis**
R	$10 - 20\ mm$	Poloměr trubek
L	$1 - 5\ m$	Délka trubek
a	$(2 - 3) \cdot R$	Osová vzdálenost sousedících trubek
$\dot{m}$	$0,5 - 5\ kgs^{-1}$	Hmotnostní tok vody
t_p	$50\ °C$	Počáteční teplota v nádrži
t_{in}	$15\ °C$	Vstupní teplota vody
E	$200\ kWh$	Celkové akumulované teplo
τ	$2500\ s$	Doba trvání simulace

Kapitola 2

Optimalizace

Následující část práce se zaměřuje na potřebné úpravy numerického modelu, především se však věnuje zjištěním plynoucím z optimalizace a jejich další analýze.

2.1 Příprava numerického modelu

Numerický model akumulátoru [5] se dělí na několik tříd a jeden simulační program. Ve třídách jsou mimo jiné shrnuty veškeré vlastnosti akumulátoru, které jsou předmětem optimalizace. Aby bylo možné získat dostatečné množství dat, je nutné vhodně zvolit kombinace parametrů a upravit skripty tak, aby nebylo zapotřebí ručně zadávat jednotlivé proměnné pro každou simulaci zvlášť.

2.1.1 Úprava třídy modelu

Původní třída, která shrnovala vlastnosti akumulátoru, měla všechny vstupní veličiny definované jako konstantní. Z toho důvodu bylo nutné přepsat či doplnit skript modelu. Významné změny jsou uvedeny níže.

Iniciace vstupní populace

Definovat kombinace parametrů tak, aby byla pokryta celá čtyřdimenzionální oblast rovnoměrně, je možné pomocí funkce „haltonset“, která vygeneruje libovolné množství kvazináhodně rozdělených bodů v libovolném počtu dimenzí. Čísla nabývají hodnot od 0 do 1 a dobře se tedy poté nastavují požadované rozsahy.

Automatizace zadávání a urychlení výpočtů

Jeden výpočet může v závislosti na vstupních parametrech trvat až 30 minut. Pro zvolený postup optimalizace je výhodné spustit více simulací současně a tím snížit potřebný výpočetní čas na minimum. MATLAB nabízí tuto možnost v doplňku

Parallel Computing Toolbox [16]. Aby mohly simulace běžet paralelně, je nutné automatizovat zadávání sad parametrů. Třídy jsou ovšem v rámci modelu řešeny staticky, takže není možné definovat žádný z parametrů jako proměnnou.

Tento problém byl v rámci práce řešen zavedením lokálně statického, avšak globálně proměnného indexu s odkazem na další třídu, tzv. „handle class“. V této speciální třídě může být definována jakákoli proměnná jako nekonstantní vlastnost. Poté lze jednotlivé parametry v původní třídě určit jako jedno konkrétní číslo pomocí této proměnné. Proměnná neboli index je zadávána přímo v simulačním programu, nikoliv však do původní třídy, ale do její kopie, která bude mít index nastaven konstantně. Ta je součástí „workspace“ a nedochází ke změnám v původní, staticky definované třídě [17].

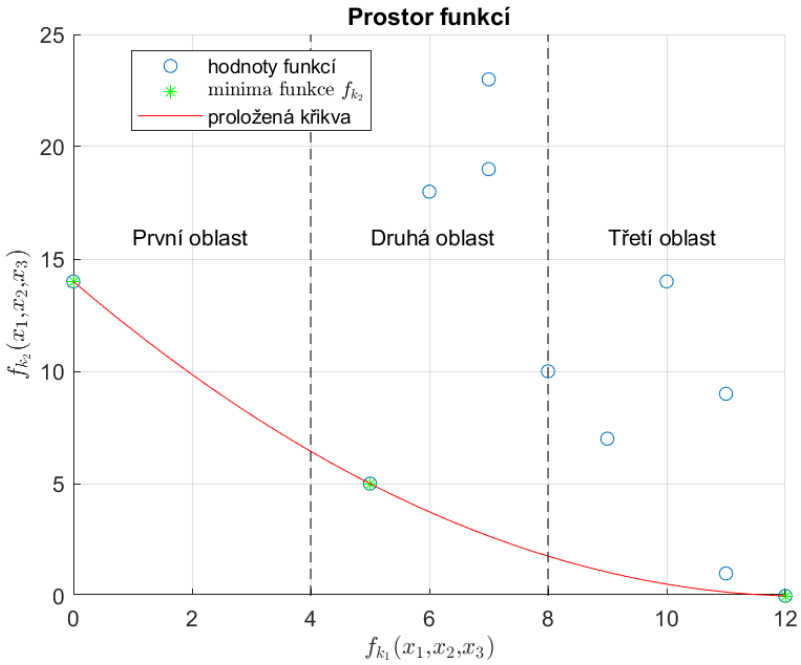
Výsledkem je tedy postupný vznik a zánik právě takového počtu statických tříd, kolik je kombinací vstupních parametrů. Výhoda spočívá v tom, že každá z nich pracuje se svými vlastními (lokálními) proměnnými, tudíž nemůže docházet k přepisu nebo nesprávnému fungování ani během paralelní simulace.

2.2 Funkce pro nalezení pareto povrchů

Dále bylo potřeba vytvořit skripty pro zpracování dat a k tomu se úzce váže způsob vyhledávání pareto množin. MATLAB nabízí pro tyto účely různé nadstavby, jako například Global Optimization Toolbox, který mj. takový algoritmus obsahuje - funkce „paretosearch“ [18].

Ovšem vzhledem ke zvolenému postupu optimalizace by implementace byla poměrně problematická a neumožnila by zobrazení dílčích kroků. Z tohoto důvodu se tato práce zaměřuje na nalezení pareto množin a pareto povrchů jiným způsobem, a to rozdělením intervalu hodnot jedné funkce na menší oblasti pomocí funkce „histcounts“, která automaticky vybere vhodnou šířku pole. Následně vyhledáním minimální hodnoty druhé funkce na tomto menším úseku. Tím je získáno několik výhodných kombinací parametrů. Nakonec je vytvořen odhad pareto povrchu proložením, resp. „fitem“ nalezených bodů vhodnou křivkou. Tento způsob je znázorněn na obrázku 10.

Díky odhadu závislosti mezi cílovými funkcemi je možné další body cíleně doplňovat interpolací, například již zmíněnou funkcí „scatteredinterpolant“, a zpřesnit tak tvar pareto povrchu.



Obrázek 10: Způsob nalezení pareto povrchu

2.3 Vyhodnocení mezivýsledků

Tato analýza má za úkol posoudit jednotlivé výstupy simulací a určit, které je výhodné dále zkoumat a ze kterých naopak nelze vyvozovat závěry.

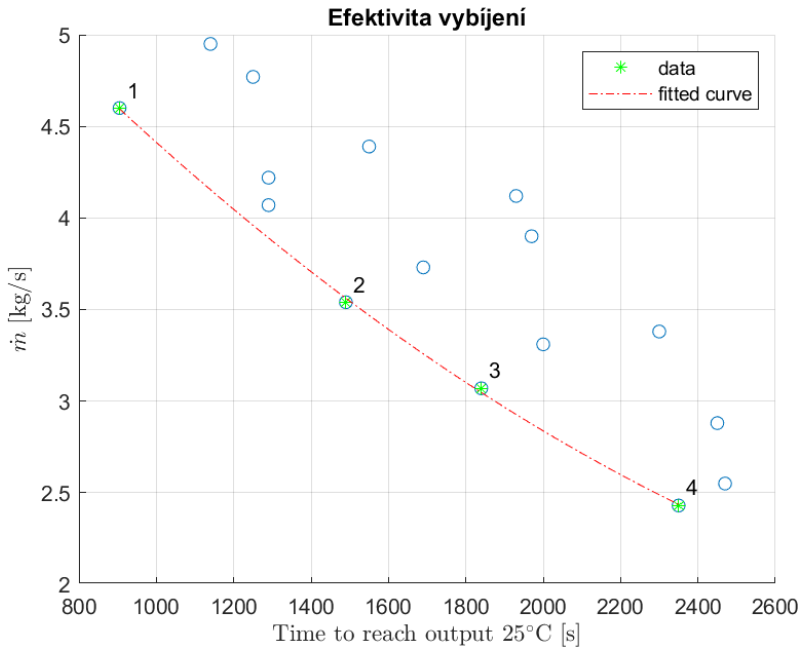
Již při zběžné kontrole dat bylo zřejmé, že některé výstupy nebude možné ani zobrazit. Jak již bylo zmíněno, čas vybíjení je omezen na cca 42 minut. Z tohoto důvodu došlo k vybití akumulátoru pouze v jednom případě. Dále pak jen velmi málo simulovaných sad dosáhlo výstupní teploty vody 20 °C, a proto tato data není možné dále vyhodnocovat. Ostatní hodnoty cílových funkcí jsou však vypovídající a lze je podrobit detailnější analýze.

V grafických zobrazeních výsledků simulace je vždy červená křivka, která má význam pareto povrchu. V některých případech byl použit poměrně nekonvenční postup, kdy na jednu z os jsou vyneseny hodnoty parametru a nikoli kritéria. Nejedná se tedy o pareto povrch v pravém slova smyslu, ale jak bude později předvedeno, je i z takové závislosti možné získat relevantní informace.

Tvořící body pareto povrchu jsou vyznačeny zelenou barvou a číslem. Těmto očíslovaným bodům pak přiřazuje odpovídající hodnoty v základních jednotkách sloupec „point“ v tabulce uvedené pod grafem. Tato tabulka supluje zobrazení pareto množiny, neboť není možné vykreslit takto velké množství parametrů graficky. Dále se v ní také nachází hodnoty vybraných ostatních cílových funkcí pro ucelenější pohled na daný pareto povrch.

Z důvodu korektního vykreslení křivky pareto povrchu se v grafech používá převrácená hodnota normalizovaného tepelného toku, neboť je zvykem vyhledávat minima cílové funkce, ale pro toto kritérium je požadována maximální hodnota.

Ze zaznamenaných výsledků simulací je možné vygenerovat velké množství závislostí, tato práce však poskytuje výklad pouze k těm nejvýznamnějším. Některé ostatní jsou pak k dispozici v přílohové části A.



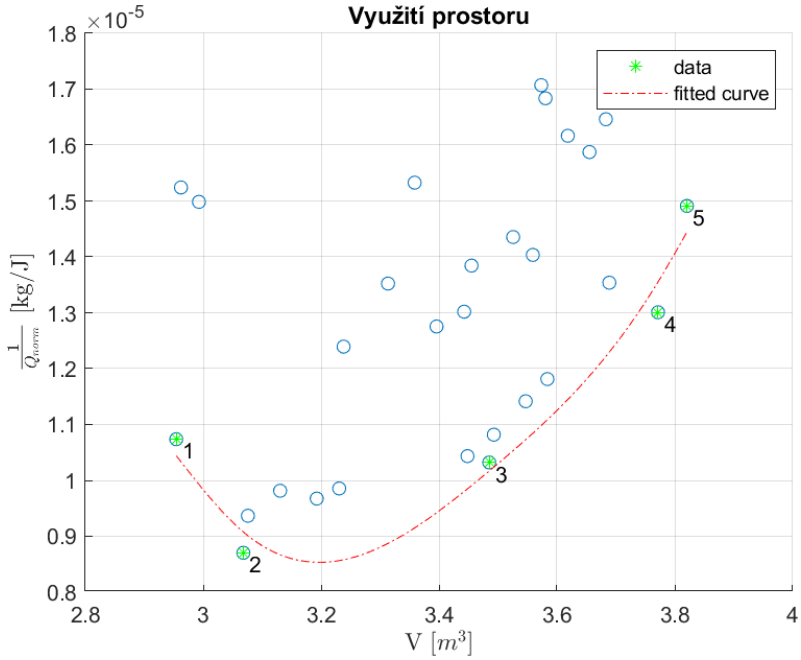
point	Radius	Length	Mass_flow	Side	Max_QzPCM	Number_of_tubes	Time_of_discharge	fraction25
1	0.02	3.246	4.6	0.043	627.45	481	NaN	0.77348
2	0.019	1.894	3.54	0.039	259.33	911	NaN	0.62983
3	0.018	1.457	3.07	0.046	189.7	948	NaN	0.46278
4	0.019	3.703	2.43	0.055	468.26	321	NaN	0.39865

Obrázek 11: Efektivita vybíjení

Původním záměrem bylo nalezení nejlepšího designu geometrie pomocí rychlosti vybíjení. Předpoklad byl, že pokud se akumulátor rychle vybije pod teplotu fázového přechodu, jedná se o efektivní kombinaci parametrů. Ale detailnějším prozkoumáním výstupních hodnot, především pak frakce kapalné fáze odpovídající teploty, se jeví tyto kombinace spíše neefektivní.

Důvodem může být vytvoření nánosu již ztuhlého PCM na stěnách pouzder. Nalezená řešení totiž spojuje vysoká až maximální hodnota poloměru a body 1 a 2, které vykazují vůbec nejvyšší zbytek kapalné fáze, mají trubky umístěny velice blízko u sebe. To jsou významné precedenty ke zhoršení přestupu tepla mezi vodou a kapalnou fází, což vede k rychlému poklesu teploty takovým způsobem, jaký je zaznamenán v grafu.

Ačkoliv z této závislosti nelze získat informace, jak by měla vypadat optimální geometrie, je možné získat představu o tom, jak vypadat nemá. Tedy, že velké průměry trubek pravděpodobně nejsou z hlediska efektivity vybíjení akumulátoru vhodné.



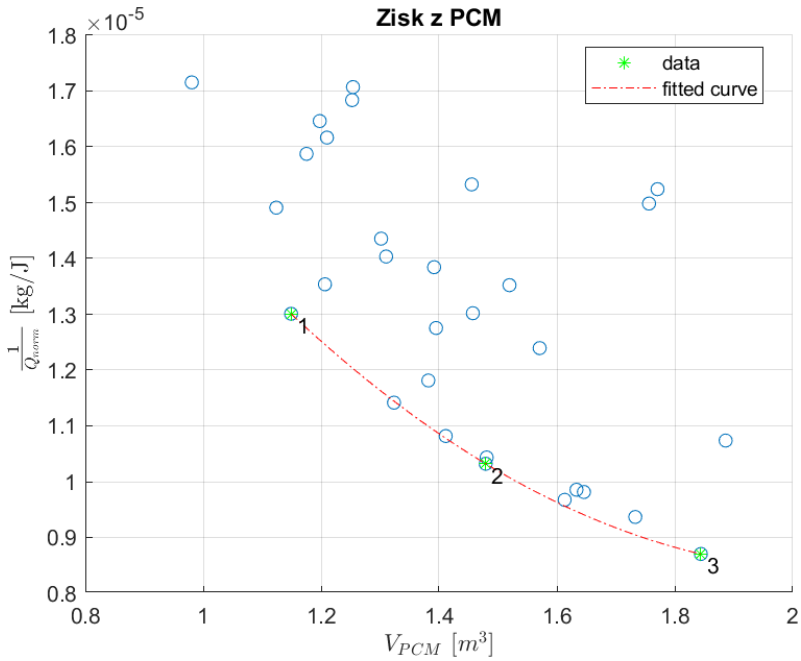
point	Radius	Length	Mass_flow	Side	Max_QzPCM	Number_of_tubes	Time_of_discharge	fraction25
1	0.013	2.854	4.12	0.026	262.64	1461	NaN	0.28704
2	0.011	4.26	2.71	0.023	225.94	1378	NaN	NaN
3	0.01	2.972	2.22	0.024	109.97	1956	NaN	NaN
4	0.012	3.408	1.07	0.035	92.736	887	NaN	NaN
5	0.011	1.621	4.39	0.03	133.4	2207	2350	0.17948

Obrázek 12: Využití prostoru

Rozbor tohoto grafu je složitější než u předchozího případu. Zde je potřeba rozdělit červenou křivku na dvě části. Pro první, klesající část, je vhodné porovnat hodnoty z tabulky. Z nich je možné vyvodit, že lepšího výkonu lze dosáhnout, pokud necháme mezi trubkami malou mezeru, aby docházelo k lepšímu přestupu tepla. Není však potřeba ji navrhovat příliš velkou z důvodu malého průměru trubky. Naopak pro co nejmenší objem je nejvýhodnější položit trubky přímo na sebe. Druhá, rostoucí část, má obě kritéria ve shodě a vyznačuje se zejména vyššími osovými vzdálenostmi pouzder.

Vypovídající je také samotný bod 5, což je jediná kombinace parametrů, která se stihla vybít ve stanoveném čase. S největší pravděpodobností se tak stalo vzhledem k poměrně vysoké hodnotě hmotnostního toku vody a také díky velké vzdálenosti trubek mezi sebou, což zvýšilo hodnotu součinitele přestupu tepla. Všechny případy ovšem odpovídají tvrzení, že z hlediska objemu akumulátoru je výhodné použít malé hodnoty parametru R. Dále je možné se domnívat, že ideální osová vzdálenost sousedících trubek bude jen o málo větší než její minimální hodnota.

Zobrazená kritéria umožňují dobře zhodnotit kvalitu řešení vzhledem k požadavkům na akumulátor, a proto má jistě smysl se jimi dále zabývat. Například kvůli informaci o skutečné poloze minima křivky pareto povrchu nebo zda bod 1 není jen důsledkem nedostatku simulací.

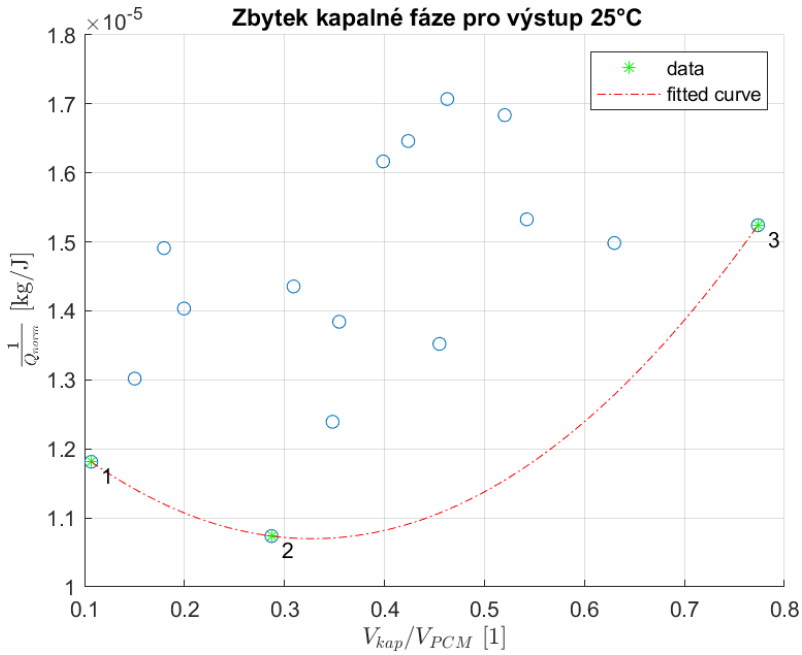


point	Radius	Length	Mass_flow	Side	Max_QzPCM	Number_of_tubes	Time_of_discharge	fraction25
1	0.012	3.408	1.07	0.035	92.736	887	NaN	NaN
2	0.01	2.972	2.22	0.024	109.97	1956	NaN	NaN
3	0.011	4.26	2.71	0.023	225.94	1378	NaN	NaN

Obrázek 13: Zisk z PCM

Toto zobrazení souvisí s ekonomickou stránkou výsledného designu. Materiály s fázovou přeměnou (PMC) jsou v dnešní době poměrně drahou záležitostí, a proto budou na optimální řešení jistě kladeny nároky na co nejmenší objem tohoto materiálu. Bohužel ale platí, že tepelný tok z PCM je přímo úměrný jeho objemu. Ze zjištěných dat není možné určit optimální objem PCM, respektive tento objem není rozhodující pro posouzení kvality vybíjení akumulátoru.

Z jiného úhlu pohledu se však nabízí úvaha, že čím více energie bude kompenzováno vodou, tím větší bude celkový objem nádrže, protože voda není schopna pojmout tolik tepla jako PCM. Jestliže jedním z hlavních důvodů pro vývoj těchto akumulátorů jsou právě nižší nároky na prostor a i v této práci je tento aspekt uveden jako jeden z hlavních požadavků, zdá se nevyhnutelné přiřadit budoucímu kritériu finanční náročnosti nižší váhu.



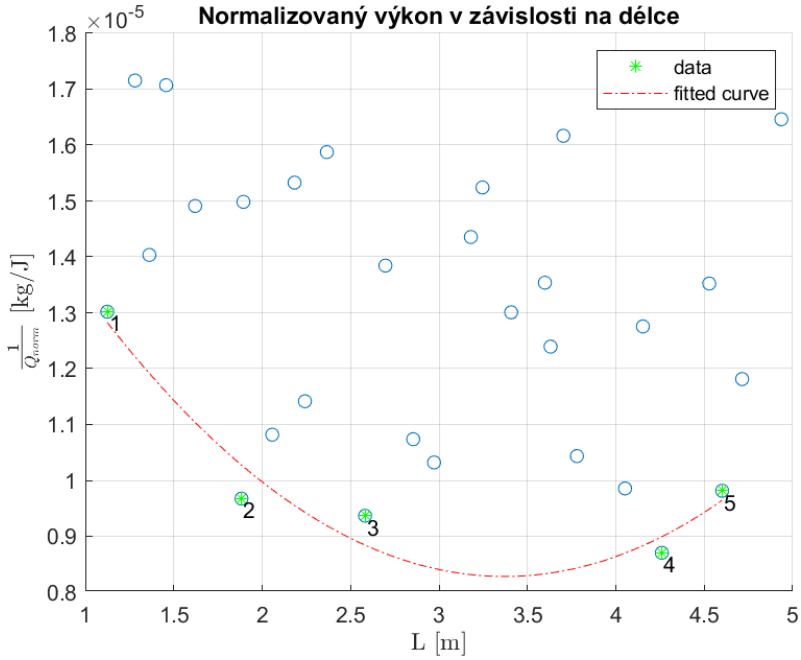
point	Radius	Length	Mass_flow	Side	Max_QzPCM	Number_of_tubes	Time_of_discharge	fraction25
1	0.01	4.714	3.9	0.026	286.57	1152	NaN	0.10674
2	0.013	2.854	4.12	0.026	262.64	1461	NaN	0.28704
3	0.02	3.246	4.6	0.043	627.45	481	NaN	0.77348

Obrázek 14: Zbytek kapalné fáze

Na tomto grafu je demonstrováno, kolik kapalného PCM se nepřemění do doby, než výstupní teplota dosáhne 25 °C. Hodnoty na vodorovné ose lze při vynásobení stem chápat i jako procentuální stav nabití akumulátoru na výstupní teplotní hladině 25 °C. Jak už bylo naznačeno výše, v ideálním případě se bude frakce blížit nule pro co nejvyšší teplotu výstupu. To je opodstatněno požadavkem na užitečnou hodnotu výkonu.

Ačkoliv je energie v akumulátoru na počátku vždy stejná, ke konci vybíjení už může být výkon velice malý a tím se stát nevyužitelným. Například bod 3, který se objevil již na obrázku 11, je zástupcem takového nežádoucího chování. Během cca 800 vteřin dojde k poklesu výstupní teploty vody pod 25 °C, ale po zbývající čas teplota neklesne ani na 20 °C.

Ovšem obdobně je možné hodnotit i body 1 a 2, které se nestihly vybít ve stanoveném čase. Tedy ačkoliv předchozí zjištění naznačovala, že malé průměry trubek v kombinaci s malými osovými vzdálenostmi generují výhodná řešení, z pohledu maximálního využití tepelného potenciálu akumulátoru tomu tak být nemusí, protože v závěrečné fázi vybíjení se tyto kombinace, především kvůli malým osovým vzdálenostem, jeví problematicky.



point	Radius	Length	Mass_flow	Side	Max_QzPCM	Number_of_tubes	Time_of_discharge	fraction25
1	0.012	1.124	3.38	0.026	76.112	3411	NaN	0.15018
2	0.016	1.883	0.65	0.035	55.435	1212	NaN	NaN
3	0.015	2.582	1.24	0.032	121.44	1090	NaN	NaN
4	0.011	4.26	2.71	0.023	225.94	1378	NaN	NaN
5	0.018	4.601	0.68	0.042	175.84	394	NaN	NaN

Obrázek 15: Normalizovaný výkon v závislosti na délce

V tomto případě se opět jedná o zobrazení cílová funkce - parametr a klade si za cíl zjistit, zdali existuje jedna optimální délka akumulátoru z pohledu jeho výkonu.

Čerchovaná křivka má minimum pro délku asi 3,5 metru, ale v tomto případě je vidět, že body 2, 3 a 4 leží téměř na jedné přímce. Bod 1 by se dal považovat pouze za důsledek nedostatečného počtu simulací. Bod 5 je diskutabilní. Mohl by také zkreslovat výsledky z výše uvedených důvodů, nebo by se mezi bodem 3 a 4 skutečně mohla nacházet optimální délka.

Lze předpokládat, že bude existovat ideální hodnota parametru L, protože pokud se voda při průchodu akumulátorem ohřeje na nejvyšší možnou teplotu, už nemá smysl ji déle nechávat proudit nádrží. Je však nutné vzít do úvahy i fakt, že parametry jsou mezi sebou provázané a sady byly utvořeny náhodně. Proto je vyvození závěru z této závislosti velice obtížné, jistě lze formulovat více navzájem protichůdných hypotéz.

Například je možné říci, že kvůli náhodnému rozdělení je i minimum rovněž umístěno náhodně a bylo by jinde pro jinou vstupní populaci. Na druhé straně stojí tvrzení, že právě délka trubek by mohla být určujícím parametrem a skutečně existuje jedna ideální hodnota pro kritérium normalizovaného výkonu z PCM, pak by byla na místě další analýza a zpřesnění tvaru křivky pareto povrchu.

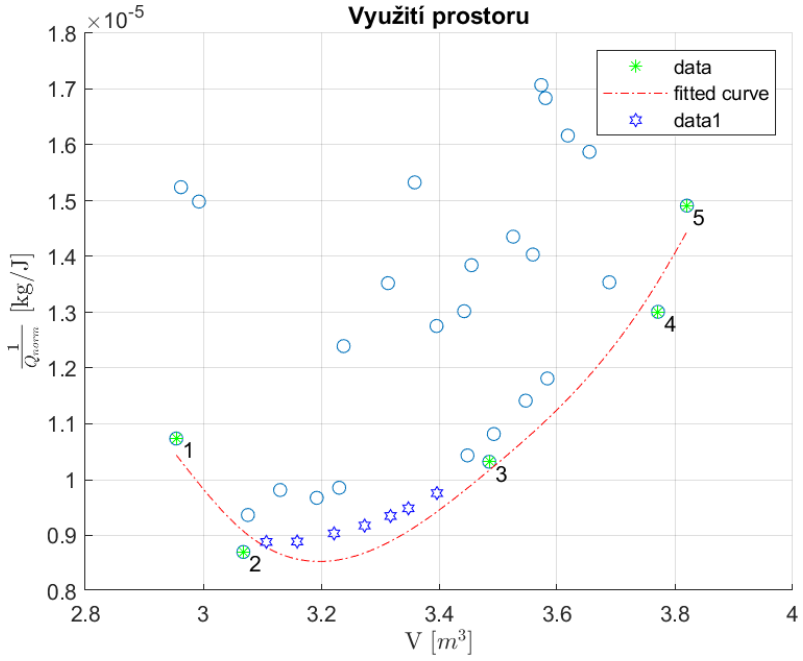
2.4 Doplnění bodů pareto povrchu

Jak již bylo zmíněno v úvodu, optimalizace umožňuje najít ideální řešení, aniž by bylo nutné všechny možnosti explicitně vyčíslit. Proto je dalším krokem nalezení dalších bodů pareto množiny z odhadnutých proložených křivek. Pro tyto účely byla zvolena funkce „scatteredinterpolant“, která další sady parametrů nachází lineární interpolací, případně extrapolací z dat zjištěných v předešlém kroku.

Pokud by bylo možné plně důvěřovat nalezeným pareto povrchům, nebylo by zapotřebí provádět další simulace. Jenže tvar křivek byl odhadnut, a tak je nezbytným krokem nově zjištěné kombinace zadat do simulačního programu a získané hodnoty dále porovnat.

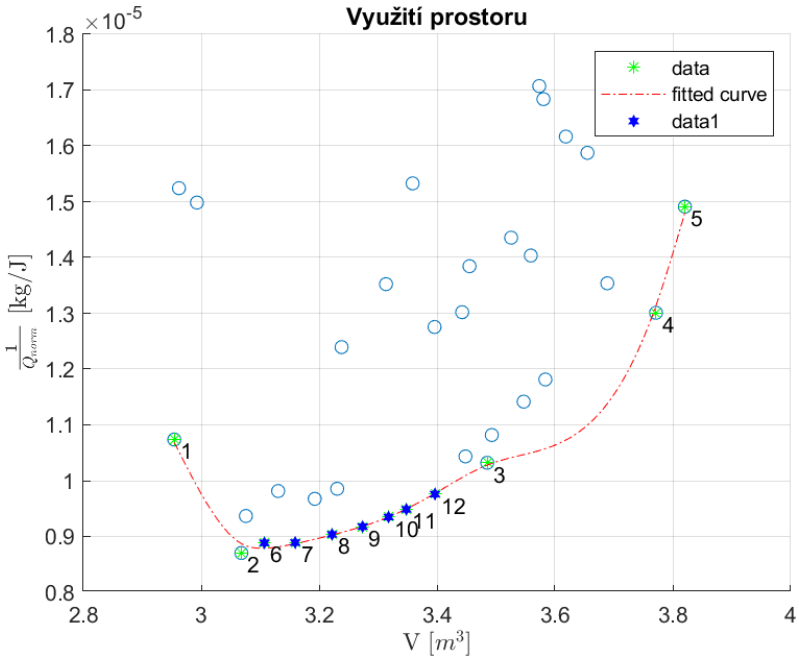
2.4.1 Využití prostoru

Následující obrázek znázorňuje rozdíl mezi předpokládanými výsledky a výsledky reálnými, resp. získanými z numerického modelu akumulátoru (modré hvězdy).



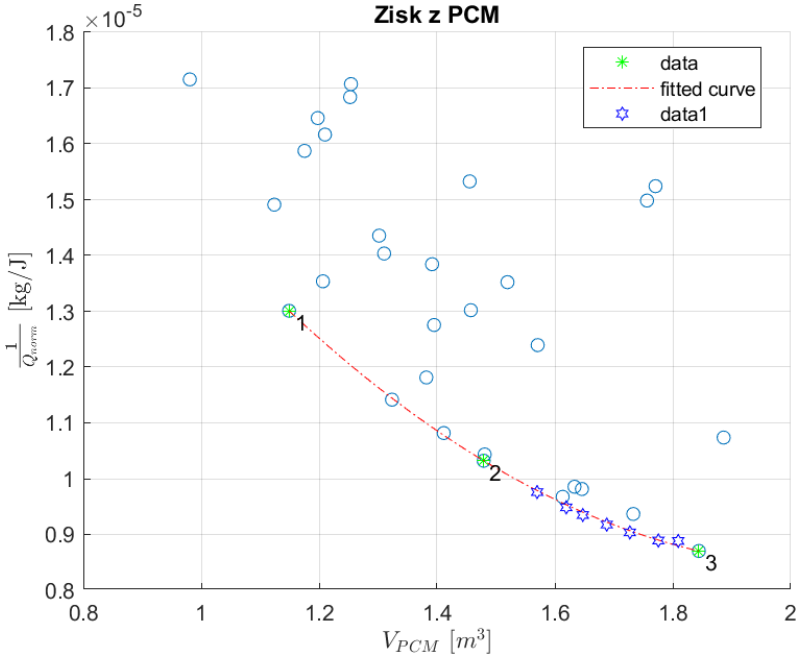
Obrázek 16: Využití prostoru - doplnění

Ukazuje se, že odhadnutá křivka nebyla v souladu se skutečností, protože zjištěné body se nacházejí mimo předpokládanou oblast. Na druhou stranu lze v tuto chvíli zpřesnit odhad pareto povrchu a tím se posunout blíže k jeho skutečnému tvaru jednoduše zahrnutím nových bodů do algoritmu „fittovací“ funkce. Výsledky tohoto kroku jsou zobrazeny na následujícím grafu.



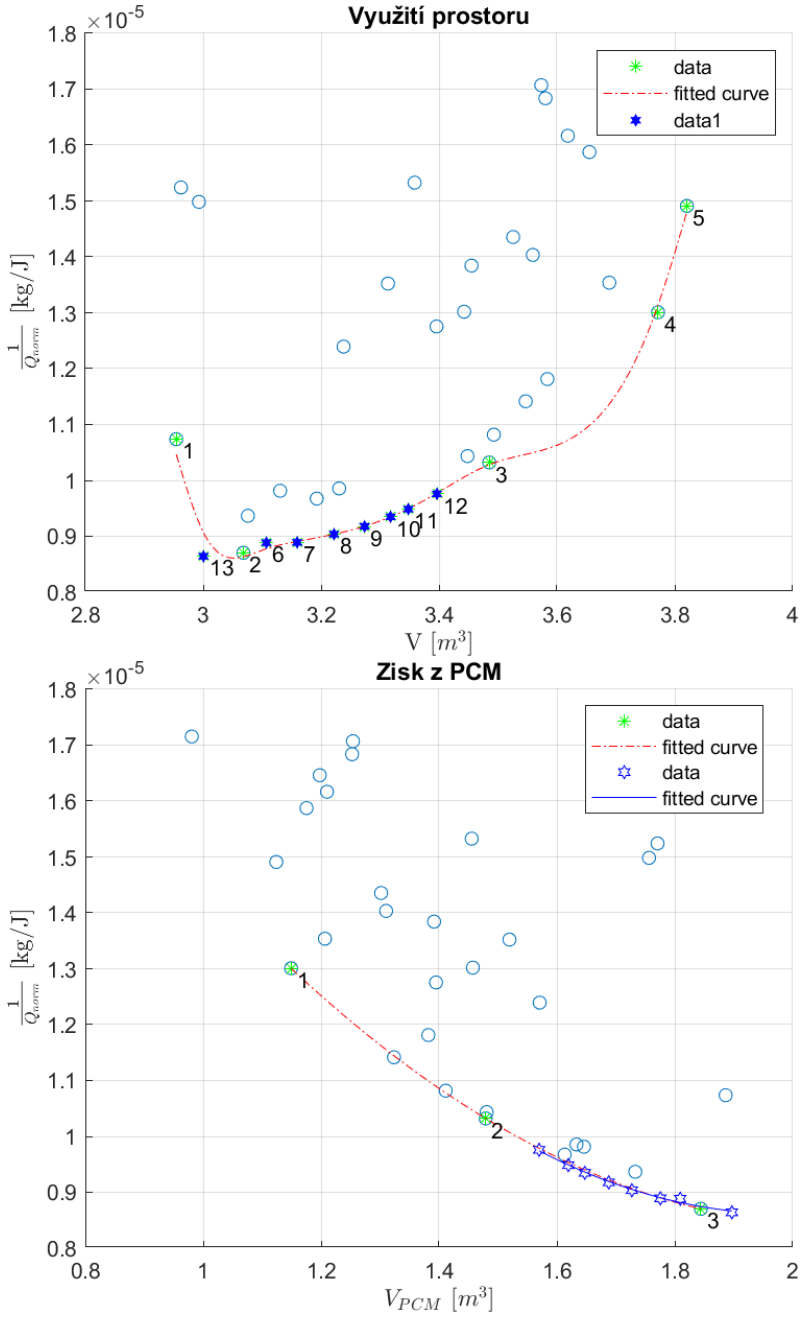
Obrázek 17: Využití prostoru - zpřesnění

Pozoruhodným zjištěním také je, že v případě závislosti z obr. 13 , jak ukazuje obrázek 18 níže, došlo k položení bodů získaných pro závislost „Využití prostoru“ na původní křivku. Tuto skutečnost je možné vysvětlit tak, že oba objemy jsou mezi sebou propojené v rámci výpočtu a dále také v obou závislostech vystupuje normalizovaný výkon. Tento poznatek lze s výhodou využít při dalším doplňování bodů, protože se zdá, že odhad pareto povrchu je v tomto případě přesnější, a tak by i interpolace mohla nacházet lepší doplňující body.



Obrázek 18: Zisk z PCM - doplnění

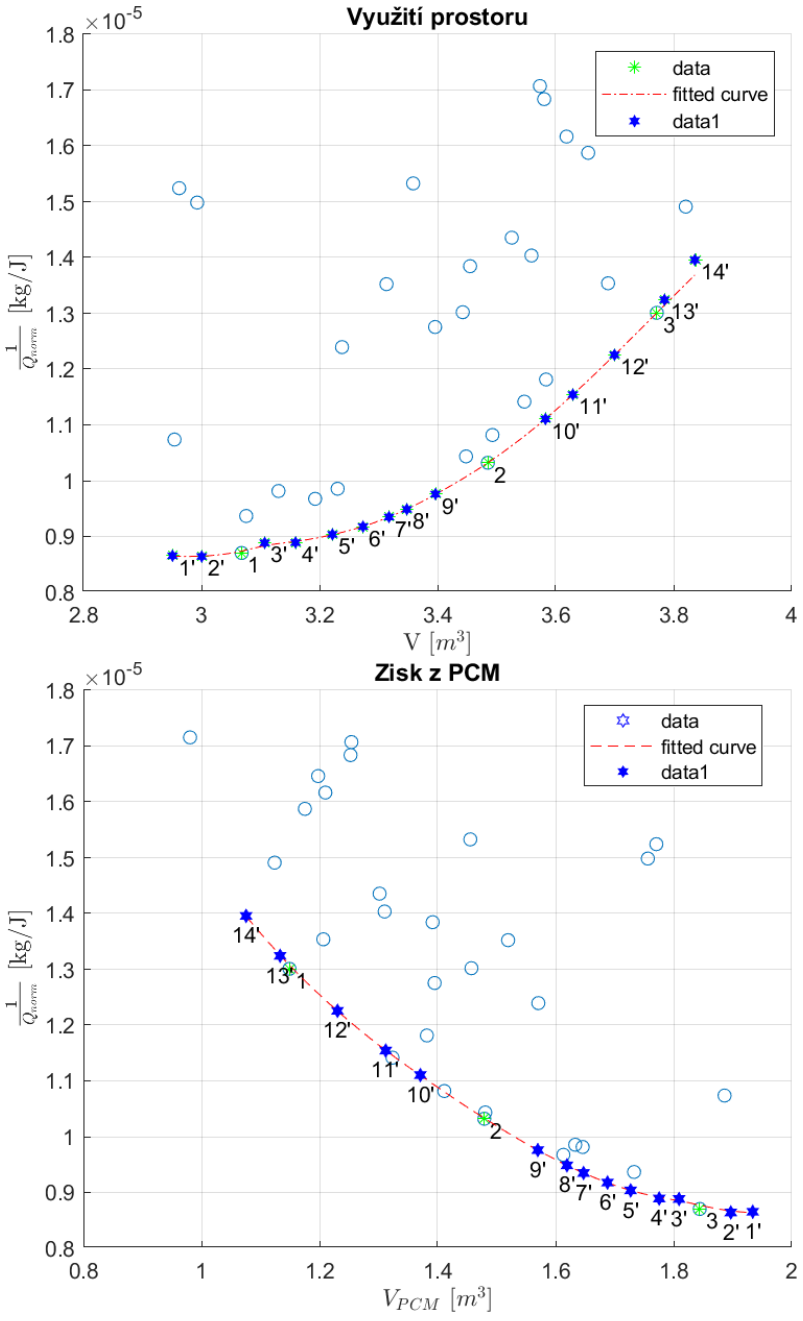
Je také vhodné poznamenat, že způsob vyhledání pareto povrchů byl založen na předpokladu, že kvazi-náhodné rozložení vyplní prostor proměnných takovým způsobem, aby nedošlo k vymizení významných tvořících bodů. Tento předpoklad sice není možné jednoznačně ověřit, ale právě při doplňování bodů pareto množin lze kontrolovat, zda se u takto vzniklé nové části pareto povrchu neobjevuje jiný trend než u původní odhadnuté křivky. V případě grafu „Využití prostoru“ s přihlédnutím k hodnotám „Zisk z PCM“ se zdá (obr. 18), že by se tvar křivky mohl měnit. Při ověřování správnosti původní proložené křivky s využitím provázanosti výše uvedených grafů, bylo možné vyhledat toto zpřesnění.



Obrázek 19: Vyhledání nového trendu

Bod 13 ukazuje, jakým způsobem pravděpodobně vypadá skutečná závislost mezi výkonem a objemem. Lze se domnívat, že bude rostoucí, což by znamenalo, že tato dvě kritéria jsou ve shodě v celém rozsahu. Tuto hypotézu podporuje i přidání bodu 13 do grafu „Zisk z PCM“.

Pro kompletní vykreslení pareto povrchu je zapotřebí doplnit body i do pravé části, opět s ohledem na okolní body, případně nové trendy. Také je vhodné vyjmout některá původní data, například bod 1, který z výše uvedených důvodů nadále pravděpodobně není součástí pareto povrchu. Díky těmto úpravám je možné získat následující závislost.



Obrázek 20: Vykreslení celého pareto povrchu

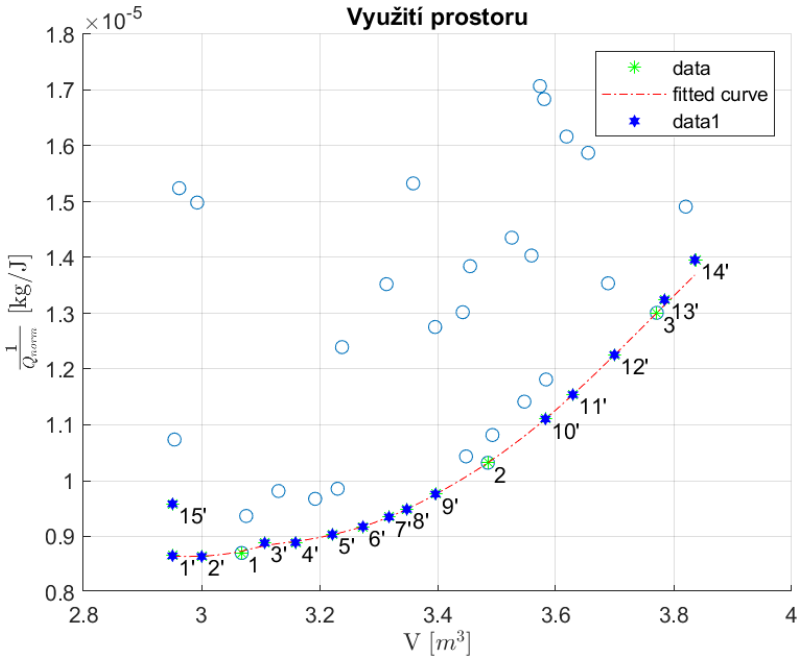
Pro lepší orientaci jsou v grafu doplněné body označeny číslem s čarou a původním bodům zůstalo již známé značení. Parametry doplňkové populace shrnuje následující tabulka.

Tabulka 2.1: Parametry doplněných bodů

Point	R	L	$\dot{m}$	a	$\dot{Q}_{zPCM}$	N	$min(t_{out})$
1'	0.0116	4.4185	3.027	0.0234	282.1	1240	27.2
2'	0.0113	4.3214	2.8866	0.0231	253.6	1317	27.9
3'	0.0109	4.1584	2.6748	0.0231	231.1	1413	28.9
4'	0.0105	4.2689	2.3828	0.0226	182.7	1467	29.9
5'	0.0102	4.2689	2.1672	0.0224	156.5	1532	30.3
6'	0.01	4.2398	2.0246	0.0223	136.7	1614	30.5
7'	0.01	3.9125	1.9495	0.0224	123.2	1692	30.6
8'	0.01	3.6763	1.9344	0.0226	115.2	1770	30.6
9'	0.01	3.4249	1.9703	0.023	109.6	1842	30.6
10'	0.0104	3.1098	1.8348	0.0265	104.1	1588	30.7
11'	0.0108	3.219	1.5766	0.0285	101.1	1351	31.4
12'	0.0114	3.3071	1.3255	0.0316	98.7	1095	34.7
13'	0.0123	3.4493	0.967	0.0363	89.2	819	47.9
14'	0.0127	3.5227	0.7688	0.0389	77.6	710	49.9

Porovnáním těchto dat vyvstávají otázky, zdali výše zmíněný problém s vybíjením ke konci cyklu pro malé osové vzdálenosti nebyl pouze důsledek nízkých hodnot hmotnostních toků, který se ale nemohl projevit kvůli normalizaci výkonu. Z předchozích zjištění ovšem vyplývá, že velký hmotnostní tok ovlivňuje negativně normalizovaný výkon. To lze ověřit i experimentálně, resp. simulací se stejnými parametry jako má bod 1', ale s maximální hodnotou hmotnostního toku.

Z výsledků tabulky 2.1 vyplývá další a mnohem závažnější otázka týkající se normalizace výkonu. Body 13' a 14' se jeví jako body pareto povrchu, ale prakticky při simulaci nedošlo k procesu vybíjení, protože výstupní teplota klesla pouze o pár stupňů Celsia. Cílem normalizace bylo eliminovat vliv hmotnostního toku za účelem nalezení optimálních geometrických parametrů z hlediska tepelného toku z PCM, ale v důsledku toho nelze v tomto zobrazení považovat některé ostatní výstupy, jako například rychlost vybíjení, za dostatečně vypovídající pro tyto geometrické parametry.



point	Radius	Length	Mass_flow	Side	Max_QzPCM	Number_of_tubes	Time_of_discharge	fraction25	Min_Tvoda
"15'"	0.0116	4.4185	5	0.0234	420.71	1240	NaN	0.23463	19.958

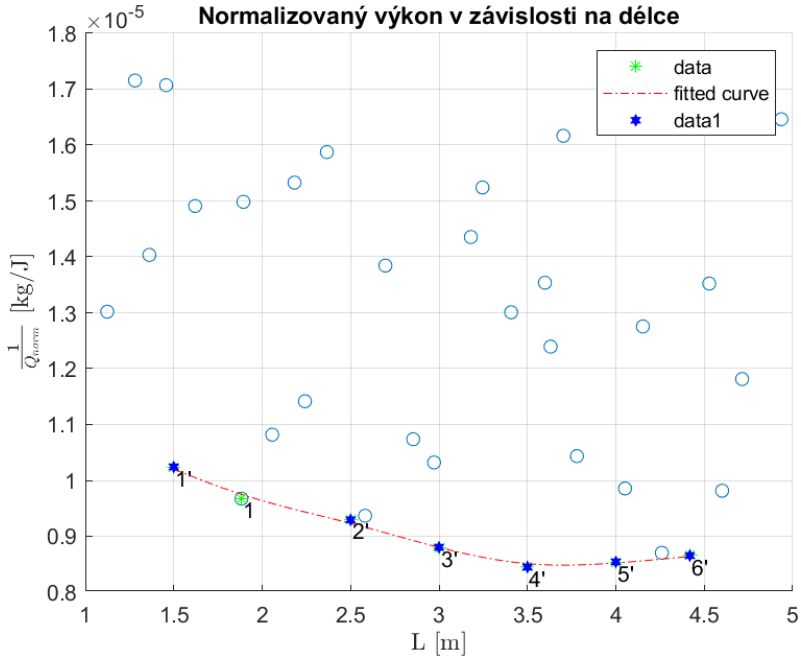
Obrázek 21: Zvýšení hmotnostního toku

Bod 15' (obr. 21) dokazuje, že zvýšením hmotnostního toku vody nebylo dosaženo dostatečného zvýšení tepelného výkonu odebíraného z PCM, aby normalizovaný tepelný tok zůstal na stejné hladině. Projevilo se ale výrazné snížení výstupní teploty na konci vybíjení. Je nutné brát v potaz, že skutečný výkon bude vždy přímo úměrný hmotnostnímu toku. Bod 1' je tedy nejvýhodnější nalezenou kombinací z pohledu objemu a výkonu. Je však nutné přidat ještě další kritérium, aby bylo zaručeno i úplné vybití ve stanoveném čase a splnit tak všechny požadavky kladené na akumulátor.

2.4.2 Délka pouzder PCM

Na konci předchozí sekce byly uvedeny dvě velmi rozdílné hypotézy týkající se optimální délky akumulátoru. Aby bylo možné učinit konkrétnější závěr, je opět vhodné doplnit a upravit pareto povrch dané závislosti. Postup je analogický tomu, jež byl předveden výše, proto už je dále uveden pouze úplný výsledek bez mezikroků.

Předpoklad existence jedné optimální délky akumulátoru zdánlivě odpovídá zpřesněnému tvaru pareto povrchu (obr. 22). Interpolace totiž pro udržení klesajícího trendu generovala hodnoty poloměru pod spodní hranicí jeho rozsahu. Ovšem rozdíly bodů 4', 5' a 6' nejsou natolik významné, aby bylo možné hovořit o nalezení ideální hodnoty parametru L pro kritérium normalizovaného výkonu PCM. I přesto však přinesla tato detailnější analýza užitečné informace.



point	Radius	Length	Mass_flow	Side	Max_QzPCM	Number_of_tubes	fraction25	Min_Tvoda
"1'"	0.0172	1.5	0.5	0.038	39.316	1242	NaN	49.326
"2'"	0.0142	2.5	1.12	0.0305	96.481	1249	NaN	33.057
"3'"	0.0129	3	1.68	0.0265	138.7	1376	NaN	30.431
"4'"	0.0105	3.5	2.61	0.021	160.22	1928	NaN	29.108
"5'"	0.01073	4	2.73	0.022	202.41	1579	NaN	28.826
"6'"	0.0116	4.4185	3.027	0.0234	282.07	1240	NaN	27.183

Obrázek 22: Normalizovaný výkon v závislosti na délce - doplněno

Je možné si všimnout, že pro krátké délky trubek je nutné volit naopak velké poloměry, které, jak už bylo ukázáno výše, jsou z hlediska výkonu i vybíjení nevýhodné. Také je zajímavý vývoj hmotnostního toku s rostoucím parametrem L. Z důvodu včasného vybití akumulátoru bude pravděpodobně nutné volit vyšší hodnotu hmotnostního toku a tím pádem i delší pouzdra PCM, protože pokles normalizovaného výkonu je od délky $3,5\ m$ zanedbatelný.

Závěr

Během analýzy výsledných dat se jako zásadní kritéria ukázala: výkon z PCM, průběh frakce kapalné fáze a objem akumulátoru. Ex post je možné zpochybnit význam zjišťování časů dosažení určitých výstupních teplot a koncové výstupní teploty, ačkoliv se na začátku optimalizace zdály jako dobré identifikátory optimálního průběhu vybíjení. Sporným krokem bylo zahrnout hmotnostní tok jako proměnný parametr, protože pro konstantní hodnoty hmotnostního toku by se jednotlivá řešení mezi sebou lépe porovnávala. Na druhou stranu bylo díky jeho proměnlivosti možné jednoznačně vyvrátit myšlenku, že rychlost vybíjení se odvíjí pouze od něj (viz obr. 11).

Zjištěné vztahy mezi parametry a cílovými funkcemi

- Mezi tepelným tokem z PCM a objemem je rostoucí nebo minimálně neklesající závislost. Zásadní se ukázal vliv hmotnostního toku, a proto bylo náročné porovnat mezi sebou pouze geometrické parametry akumulátoru. I přesto je však na základě získaných dat možné zmenšit rozsahy parametrů pro další výpočty. Společné vlastnosti parametrů vyskytujících se v minimu pareto povrchu jsou průměry maximálně 24 milimetrů s velmi malými až nulovými mezerami mezi jednotlivými trubkami.

- Významnou cílovou funkcí je také rychlost vybíjení akumulátoru, tedy rychlost tuhnutí PCM, kde se sice malé průměry zdají výhodné, ale především v kombinaci s vyššími až maximálními osovými vzdálenostmi. I zde ovšem hraje významnou roli hmotnostní tok, kterým se dá rychlost vybíjení upravit, takže je pravděpodobné, že nalezením správné hodnoty hmotnostního toku nebudou muset být osové vzdálenosti tak velké, nicméně téměř jistě bude muset být mezi trubkami alespoň malá mezera.

- Dále se ukázalo, že nemá smysl uvažovat nízké hodnoty hmotnostního toku, protože tyto kombinace nejsou výhodné pro žádnou ze zaznamenávaných cílových funkcí a prakticky pro ně nedochází k vybíjení akumulátoru. Také vzhledem k požadavku vybití ve stanoveném čase budou muset být hodnoty toku vysoké, pro některé sady parametrů by možná bylo potřeba uvažovat o hodnotě vyšší, než je horní hranice aktuálního rozsahu.

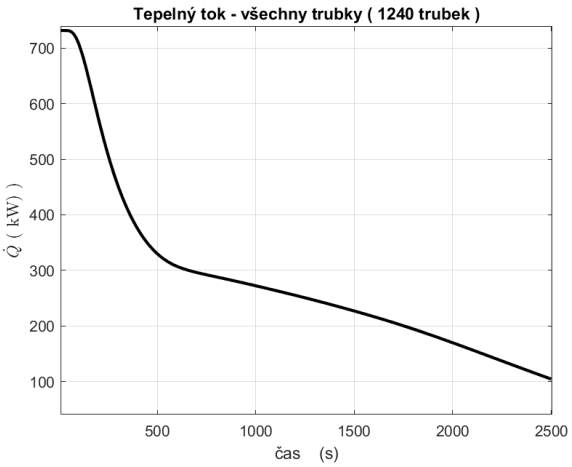
- Nejproblematičtějším parametrem z pohledu určení jeho rozsahu je délka pouzder PCM. Ze zjištěných dat není jednoznačně zřejmý trend, podle kterého by se dala předpokládat optimální hodnota. Nicméně nalezené body pareto množiny se pohybují v rozsahu $3 - 5$ m.

Následující tabulka zaznamenává redukované hodnoty parametrů akumulátoru po provedení optimalizace.

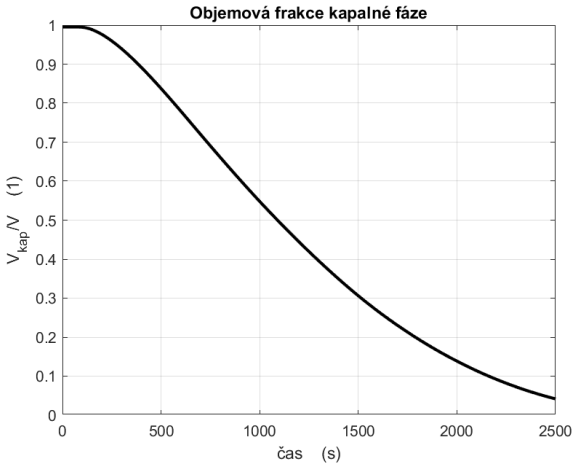
Tabulka 2.2: Oblasti optimálních parametrů

Parametr	**Rozsah**	**Zmenšení**
R	$10 - 13\ mm$	70%
L	$3 - 5\ m$	50%
a	$(2,05 - 2,3) \cdot R$	75%
$\dot{m}$	$4 - 5\ kgs^{-1}$	78%

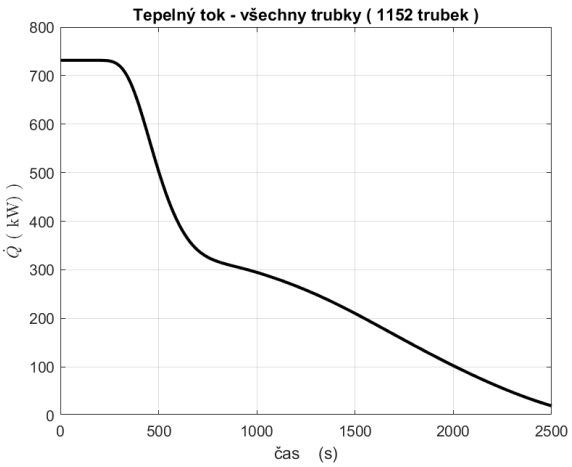
Dále jsou uvedeny výstupy numerického modelu nejlepších zjištěných řešení pro cílové funkce výkonu z PCM a vybíjení. Aby bylo možné dobře zaznamenat rozdíly, obě geometrie jsou simulovány pro hmotnostní tok 5 kgs^{-1}.



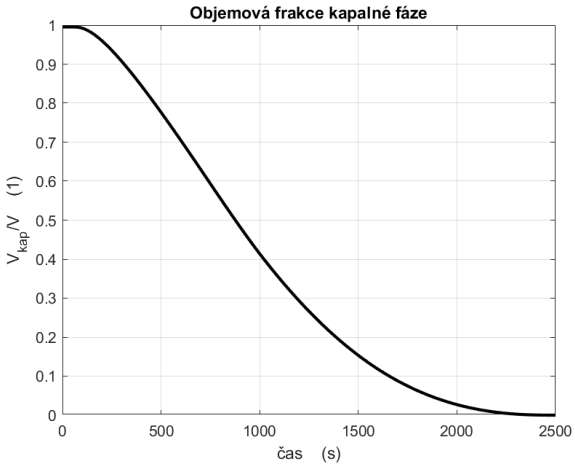
(a) Optimum pro výkon- Tepelný tok



(b) Optimum pro výkon- Frakce



(c) Optimum pro vybíjení- Tepelný tok



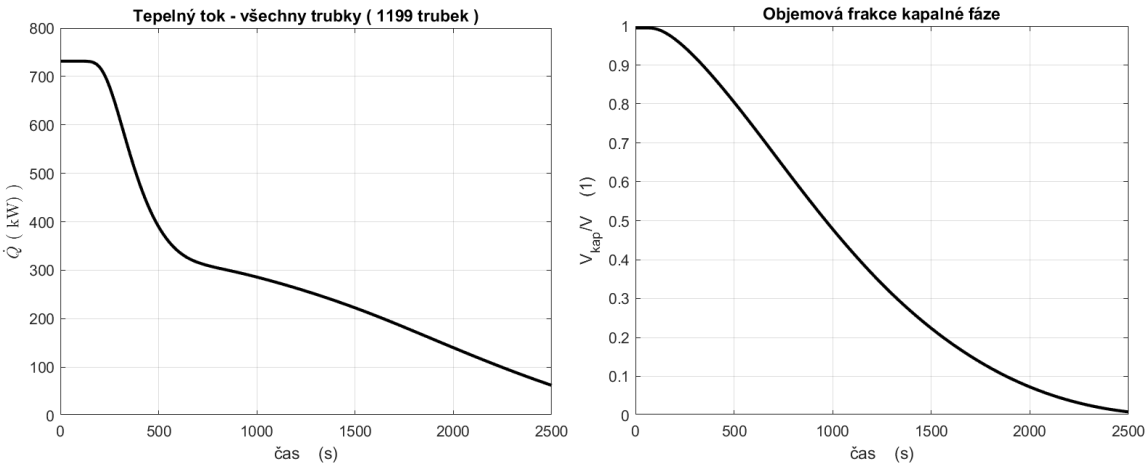
(d) Optimum pro vybíjení- Frakce

Obrázek 23: Porovnání nejdůležitějších kritérií, z [5]

Obě možnosti se samozřejmě zásadně liší v objemu akumulátoru, což je dobře vidět v počáteční fázi vybíjení. Delší konstantní část odpovídá vyššímu množství vody v akumulátoru, tedy vyššímu objemu celkem.

Dalším pokračováním optimalizace by mělo být vyvážení hmotnostního toku vody tak, aby se akumulátor vybíjel dostatečně rychle a zároveň byl efektivně využit tepelný potenciál PCM. Kromě uvažování pouze redukovaných parametrů, je také možné vynechat cílovou funkci objemu a převést tak úlohu na dvoukriteriální. Jak bylo ukázáno výše, objem akumulátoru je výkonu z PCM přímo úměrný, takže při minimalizaci normalizovaného výkonu bude zároveň minimalizován i objem. Proto by pro další postup v optimalizaci mohla být úloha mírně redefinována, například vytvořením jedné skupiny sad pouze rozměrových parametrů, kdy každá sada bude simulována pro shodnou trojici hmotnostních toků.

Takto upravená úloha je výrazně jednodušší na zpracování než původní a povede příměji na globálně optimální parametry akumulátoru. Už v tuto chvíli je však možné jedno z optimálních řešení odhadnout, a to interpolací parametrů mezi řešeními na obrázku 23 uvedenými výše, které vypadá takto.



(a) Optimální křivka tepelného toku

(b) Optimální křivka vybíjení

Obrázek 24: Odhad optimálního průběhu vybíjení, z [5]

Je vidět, že bylo dosaženo výhodného průběhu výkonu a také úplného vybití akumulátoru, při zachovaní relativně nízké hodnoty objemu (cca 3.25 m^3).

Zvolená metoda optimalizace tedy nabídla jak detailní pohled na děje probíhající v průběhu vybíjení akumulátoru a na vztahy mezi jednotlivými kritérii, tak i možnost odhadnout celkové řešení vyhovující všem požadavkům.

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
a	m	Osová vzdálenost sousedících trubek
c_{PCM}	$Jkg^{-1}K^{-1}$	Měrná tepelná kapacita PCM
c_v	$Jkg^{-1}K^{-1}$	Měrná tepelná kapacita vody
E	J	Celkové akumulované teplo v akumulátoru
H_n	m	Délka vyrovnávacího objemu nad trubkami
H_p	m	Délka vyrovnávacího objemu pod trubkami
h_{PCM}	Jkg^{-1}	Celková tepelná kapacita PCM v pásmu teplot fázového přechodu daného materiálovým listem
L	m	Délka trubek
$\dot{m}$	kgs^{-1}	Hmotnostní tok vody
N	1	Počet trubek v akumulátoru
$\dot{Q}$	Js^{-1}	Celkový tepelný tok akumulátoru
Q_{nrom}	Jkg^{-1}	Normalizovaný maximální tepelný tok z PCM
$\dot{Q}_{zPCM}$	Js^{-1}	Maximální tepelný tok z PCM
R	m	Poloměr trubek
s	m	Tloušťka stěny trubek
t_{in}	$°C$	Teplota vody na vstupu
t_{out}	$°C$	Teplota vody na výstupu
t_p	$°C$	Počáteční teplota v akumulátoru
V	m^3	Celkový objem akumulátoru
V_{kap}	m^3	Objem kapalného PCM
V_{PCM}	m^3	Celkový objem PCM
δt_1	$°C$	Rozdíl maximální teploty v akumulátoru a minimální teploty vody
δt_2	$°C$	Rozdíl rozdílu maximální a minimální teploty PCM a teplotního pásma fázového přechodu daného materiálovým listem
ρ_L	kgm^{-3}	Hustota kapalného PCM
ρ_{v50}	kgm^{-3}	Hustota vody při 50 °C
τ	s	Doba trvání simulace

Seznam obrázků

1 Rozělení PCM, podle [2] 10
2 Konstrukce akumulátoru 11
3 Numerický model-výstupy, upraveno z [5] 12
4 Pareto povrchy MOPSO a NSGA-II, z [9] 14
5 Pareto povrch, přeloženo z [15] 15
6 Příklad zobrazení výsledků optimalizace 16
7 Schéma optimalizace 17
8 Příklad průběhu výkonu, upraveno z [5] 18
9 Příklad průběhu tepelného toku, z [5] 21
10 Způsob nalezení pareto povrchu 25
11 Efektivita vybíjení 26
12 Využití prostoru 27
13 Zisk z PCM 28
14 Zbytek kapalné fáze 29
15 Normalizovaný výkon v závislosti na délce 30
16 Využití prostoru - doplnění 31
17 Využití prostoru - zpřesnění 32
18 Zisk z PCM - doplnění 32
19 Vyhledání nového trendu 33
20 Vykreslení celého pareto povrchu 34
21 Zvýšení hmotnostního toku 36
22 Normalizovaný výkon v závislosti na délce - doplněno 37
23 Porovnání nejdůležitějších kritérií, z [5] 39
24 Odhad optimálního průběhu vybíjení, z [5] 40

25 Hmotnostní tok ku výstupní teplotě 47
26 Výkon ku poloměru 48
27 Výkon ku poměrné vzdálenosti 48
28 Výkon ku počtu trubek 49
29 Výkon ku času pro výstup 25 °C 49

Seznam tabulek

1.1 Vstupní hodnoty a parametry 22

2.1 Parametry doplněných bodů 35

2.2 Oblasti optimálních parametrů 39

Literatura

[1] A. Ravindran, K.M. Ragsdell a G.V. Reklaitis. *Engineering Optimization: Methods and Applications*. 2. vyd. John Wiley & Sons, Inc., 2006. ISBN: 978-0-471-55814-9.

[2] Saulius Pakalka et al. "Analysis of Possibilities to Use Phase Change Materials in Heat Exchangers-Accumulators". V: *Conference: Environmental Engineering* (srp. 2017). [online]. DOI: 10.3846/enviro.2017.270. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/320053742_Analysis_of_Possibilities_to_Use_Phase_Change_Materials_in_Heat_Exchangers-Accumulators (cit. 08. 04. 2021).

[3] Rubitherm GmbH. *Data sheet SP31*. [online]. Rubitherm Technologies GmbH. Dostupné z: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-SP31_EN_09112020.PDF (cit. 08. 04. 2021).

[4] S. Kurpaska et al. "The Comparison of Different Types of Heat Accumulators and Benefits of Their Use in Horticulture". V: *Sensors(Basel)* (květ. 2020). [online]. DOI: 10.3390/s20051417. Dostupné z: https://www.mdpi.com/1424-8220/20/5/1417 (cit. 24. 04. 2021).

[5] Tomáš Hyhlík. *Numerický model akumulátoru*. V softwaru MATLAB. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, říj. 2020.

[6] Michael Emmerich a André Deutz. "A tutorial on multiobjective optimization: fundamentals and evolutionary methods". V: *Natural Computing* 17 (zář. 2018). [online]. DOI: 10.1007/s11047-018-9685-y. Dostupné z: https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11047-018-9685-y (cit. 08. 04. 2021).

[7] Marcin Jankowski, Aleksandra Borsukiewicz a Kamel Hooman. "Development of Decision-Making Tool and Pareto Set Analysis for Bi-Objective Optimization of an ORC Power Plant". V: *Energies* 13.20 (2020). [online]. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en13205280. Dostupné z: https://www.mdpi.com/1996-1073/13/20/5280 (cit. 05. 11. 2020).

[8] Sepehr Sanaye a Hassan Hajabdollahi. "Multi-objective optimization of shell and tube heat exchangers". V: *Applied Thermal Engineering* 30.14 (2010). [online], s. 1937–1945. ISSN: 1359-4311. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.04.018. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111000181X (cit. 06. 05. 2021).

[9] A. Ghanei et al. "Thermal-economic multi-objective optimization of shell and tube heat exchanger using particle swarm optimization (PSO)". V: *Heat and Mass Transfer* 50 (2014). [online], s. 1375–1384. ISSN: 1432-1181. DOI: 10.1007/s00231-014-1340-2. Dostupné z: https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-014-1340-2#Abs1 (cit. 06. 05. 2021).

[10] Julio E. Alvarez-Benitez, Richard M. Everson a Jonathan E. Fieldsend. "A MOPSO Algorithm Based Exclusively on Pareto Dominance Concepts". V: *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. Ed. Carlos A. Coello Coello, Arturo Hernández Aguirre a Eckart Zitzler. [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, s. 459–

473. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-31880-4_32 (cit. 06. 05. 2021).

[11] Charles Audet et al. "Performance indicators in multiobjective optimization". V: *European Journal of Operational Research* 292.2 (2021). [online], s. 397–422. ISSN: 0377-2217. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.11.016. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221720309620 (cit. 07. 05. 2021).

[12] Yingying Su et al. "A Novel Approach to Optimization Problem without Objective Function". V: *Atlantis Press* (květ. 2007). [online], s. 1589–1593. ISSN: 1951-6851. DOI: https://doi.org/10.2991/iske.2007.272. Dostupné z: https://doi.org/10.2991/iske.2007.272 (cit. 24. 04. 2021).

[13] I. Giagkiozis a P.J. Fleming. "Methods for multi-objective optimization: An analysis". V: *Information Sciences* 293 (2015). [online], s. 338–350. ISSN: 0020-0255. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.08.071. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025514009074?via%3Dihub (cit. 08. 04. 2021).

[14] Petr Tichý. *Numerické metody optimalizace - úvod*. [online]. UK v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta. Dostupné z: https://www2.karlin.mff.cuni.cz/~ptichy/blogs/nmo/NMO_01.pdf (cit. 08. 04. 2021).

[15] Panagiotis Mergos a Anastasios Sextos. "Multi-objective optimum selection of ground motion records with genetic algorithms". V: *16TH European Conference on EARTHQUAKE ENGINEERING* (čvn. 2018). [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/329870692_Multi-objective_optimum_selection_of_ground_motion_records_with_genetic_algorithms (cit. 25. 04. 2021).

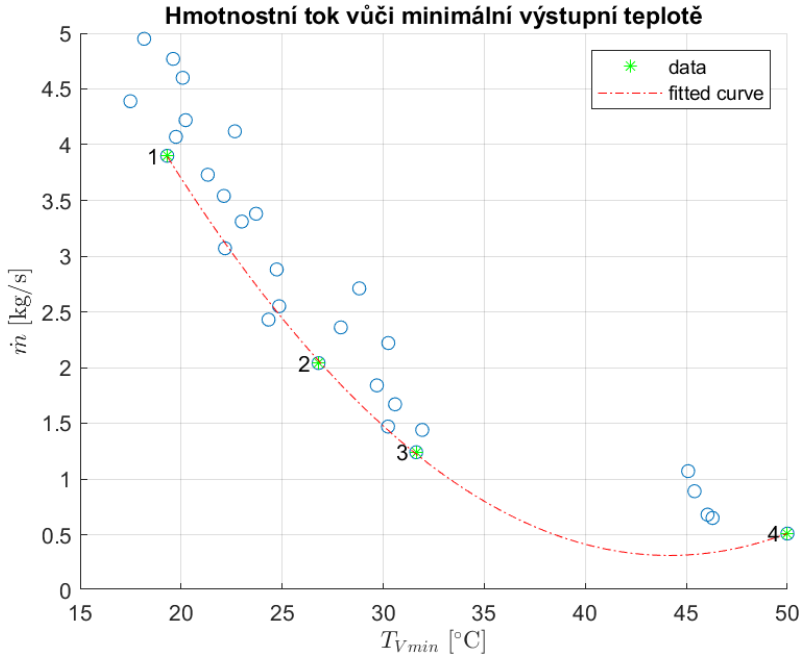
[16] The MathWorks Inc. *Run Batch Parallel Jobs*. [online]. MATLAB & Simulink. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/parallel-computing/run-a-batch-job.html (cit. 24. 04. 2021).

[17] The MathWorks Inc. *Static Data*. [online]. MATLAB & Simulink. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_oop/static-data.html (cit. 24. 04. 2021).

[18] The MathWorks Inc. *Paretosearch*. [online]. MATLAB & Simulink. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/gads/paretosearch.html (cit. 24. 04. 2021).

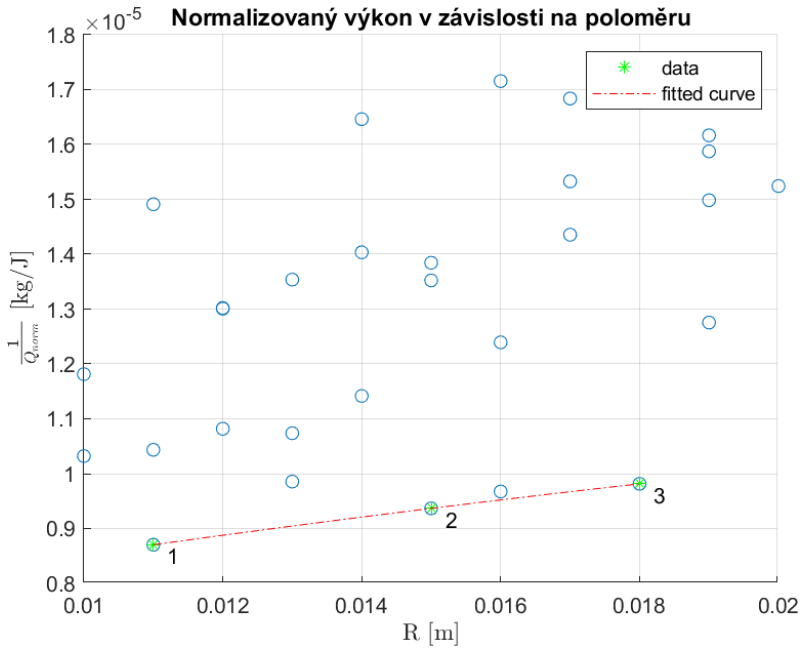
Příloha A

Další výstupy simulací



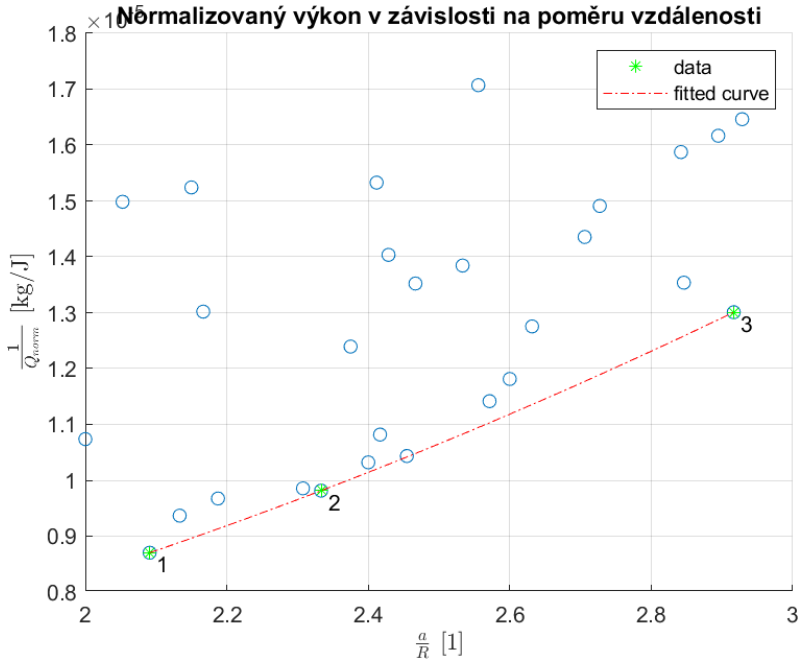
point	Radius	Length	Mass_flow	Side	Max_QzPCM	Number_of_tubes	Time_of_discharge	fraction25
1	0.01	4.714	3.9	0.026	286.57	1152	NaN	0.10674
2	0.019	2.366	2.04	0.054	263.34	488	NaN	NaN
3	0.015	2.582	1.24	0.032	121.44	1090	NaN	NaN
4	0.011	3.78	0.51	0.027	39.195	1247	NaN	NaN

Obrázek 25: Hmotnostní tok ku výstupní teplotě



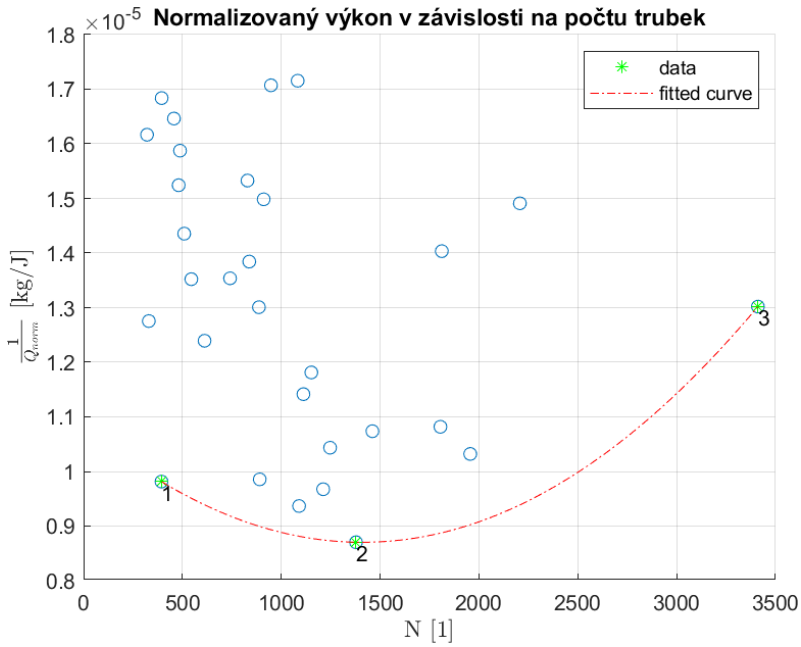
point	Radius	Length	Mass_flow	Side	Max_QzPCM	Number_of_tubes	Time_of_discharge	fraction25
1	0.011	4.26	2.71	0.023	225.94	1378	NaN	NaN
2	0.015	2.582	1.24	0.032	121.44	1090	NaN	NaN
3	0.018	4.601	0.68	0.042	175.84	394	NaN	NaN

Obrázek 26: Výkon ku poloměru



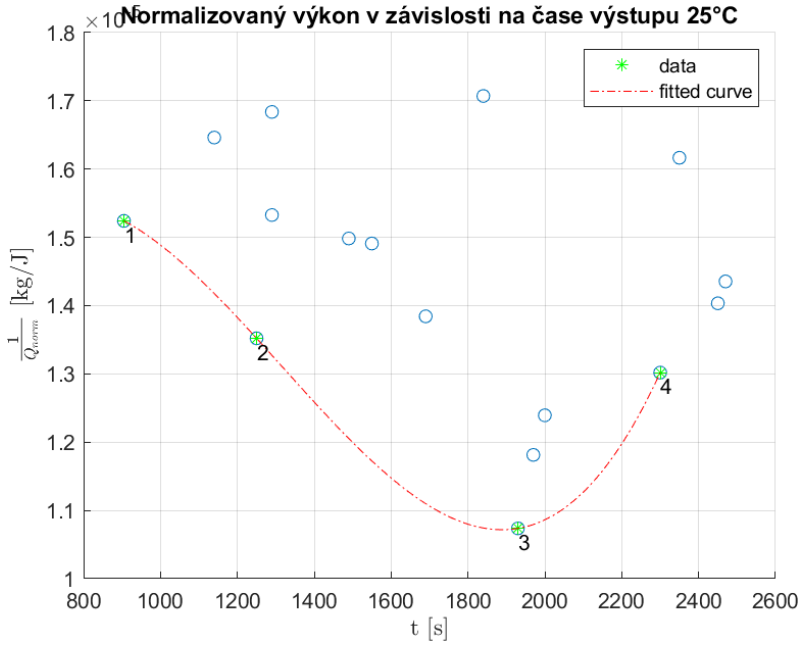
point	Radius	Length	Mass_flow	Side	Max_QzPCM	Number_of_tubes	Time_of_discharge	fraction25
1	0.011	4.26	2.71	0.023	225.94	1378	NaN	NaN
2	0.018	4.601	0.68	0.042	175.84	394	NaN	NaN
3	0.012	3.408	1.07	0.035	92.736	887	NaN	NaN

Obrázek 27: Výkon ku poměrné vzdálenosti



point	Radius	Length	Mass_flow	Side	Max_QzPCM	Number_of_tubes	Time_of_discharge	fraction25
1	0.018	4.601	0.68	0.042	175.84	394	NaN	NaN
2	0.011	4.26	2.71	0.023	225.94	1378	NaN	NaN
3	0.012	1.124	3.38	0.026	76.112	3411	NaN	0.15018

Obrázek 28: Výkon ku počtu trubek



point	Radius	Length	Mass_flow	Side	Max_QzPCM	Number_of_tubes	Time_of_discharge	fraction25
1	0.02	3.246	4.6	0.043	627.45	481	NaN	0.77348
2	0.015	4.528	4.77	0.037	647.28	545	NaN	0.45497
3	0.013	2.854	4.12	0.026	262.64	1461	NaN	0.28704
4	0.012	1.124	3.38	0.026	76.112	3411	NaN	0.15018

Obrázek 29: Výkon ku času pro výstup 25 °C

Příloha B

Materiálový list SP31 [3]

Data Sheet

SP31

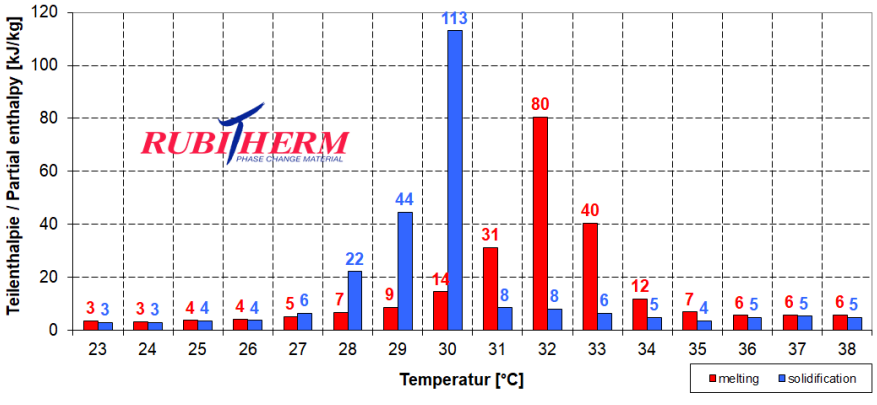
The creation of the latent heat material RUBITHERM® SP has led to a new and innovative class of low flammability PCM.
RUBITHERM® SP consists of a unique composition of inorganic components.
RUBITHERM® SP is preferably used as macroencapsulated material. Densities of more than 1,0 kg/l are achieved.
This and all properties mentioned below make RUBITHERM® SP to the preferred PCM used in construction. Both passive and active cooling can easily be realized.
We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:
- **stable performance throughout the phase change cycles**
- **high thermal storage capacity per volume**
- **limited supercooling (2-3K depenndig on volume and cooling rate),**
- **low flammability, non toxic**
- **different melting temperatures between -50°C und 70°C are available**
- **encapsulation necessary, minimum volume: 50ml**

The most important data:	Typical Values	
Melting area	**31-33** main peak: 32	[°C]
Congealing area	**28-30** main peak: 30	[°C]
Heat storage capacity ± 7,5% Combination of sensible and latent heat in a temperatur range of 23 °C to 38°C.	**210**	[kJ/kg]
	58	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	**2**	[kJ/kg·K]*
Density solid at 15°C	**1,35**	[kg/l]
Density liquid at 35°C	**1,3**	[kg/l]
Volume expansion	**3-4**	[%]
Heat conductivity	**~0,5**	[W/(m·K)]
Max. operation temperature	**50**	[°C]
Corrosion	corrosive effect on metals	

Note: The product must be initialized (melt, homogenize and cool to 0 ° C) once before use to achieve the specified properties. Many SP-product are hygroscopic and may absorb moisture if stored improperly. This can result in a change of the physical properties given.

Beispiel / example: SP31 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution*



*Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Imhoffweg 6
D-12307 Berlin
phone: +49 (30) 7109622-0
E-Mail: info@rubitherm.com
Web: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 09.11.2020