



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

TECHNOLOGIE AKUMULACE TEPLA S NÁSLEDNOU PRODUKČÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE

HEAT STORAGE TECHNOLOGY WITH SUBSEQUENT ELECTRICITY PRODUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Artuš Procházka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Artuš Procházka
Studijní program:	Energetika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Technologie akumulace tepla s následnou produkcí elektrické energie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Akumulace tepelné energie je jedním z možných způsobů krátkodobého až střednědobého uchování energie. Akumulace tepla může být realizována ohřevem různých pevných či kapalných látek, využitím fázové změny či chemických přeměn. Výzvou aktuální energetiky je hledání vhodných způsobů, jak z akumulované tepelné energie získat zpět elektrickou energii. Tyto technologie jsou obecně označovány jako Carnotovy baterie a využívají nejčastěji tepelných oběhů, dobře známých z jiných aplikací. Cílem práce je zpracovat přehled o publikovaných principech Carnotových baterií, dohledat pilotní realizace a provést základní návrh vybraného řešení pro parametry dohodnuté s vedoucím práce.

Cíle bakalářské práce:

1. Zpracovat rešeršní představení technologií pro akumulaci tepla se zpětným získáním elektrické energie.
2. Představení dohledatelných realizací.
3. Provést vzájemné porovnání technologií pro transformaci tepelné energie na elektrickou energii z pohledu účinnosti a technické složitosti.
4. Pro konkrétní parametry základní bilanční návrh instalace Carnotovy baterie.

Seznam doporučené literatury:

CENEK, Miroslav. Akumulátory od principu k praxi. Praha: FCC Public, 2003, 248 s. : il. ; 21 cm. ISBN 80-86534-03-0.

PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s., ISBN 978-80-214-4300-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou akumulace energie zejména jednou z možných budoucích technologií a tím jsou Carnotovy baterie. Zaměření se bude spíše týkat jednotlivých druhů nabíjení této baterie, čímž se myslí přeměna elektrické energie na teplo, a možnosti tepelných zásobníků, do kterých se bude toto teplo akumulovat. V rámci práce budou taktéž shrnuty jednotlivé realizace a plánované výstavby těchto baterií, jako i srovnání cen, životností a jiných parametrů, jak s ostatními technologiemi akumulace, tak i mezi jednotlivými druhy Carnotových baterií.

Na závěr bude proveden jednoduchý bilanční výpočet Carnotovy baterie.

Klíčová slova

Akumulace energie, Carnotovy baterie.

ABSTRACT

This thesis concerns itself with problematics of accumulation of electric energy, especially with one of the future technologies and that is the Carnot batteries. Focus will be directed towards different types of charging the batteries, by charging the batteries is meant transformation of electric energy into a heat energy, and towards technologies of heat accumulators, in which the heat will be stored. Different realizations and future projects of Carnot batteries will also be included in this thesis, same goes for the comparison with other technologies for accumulation and for comparison between diverse Carnot battery technologies.

The simple calculation of Carnot battery will be done on the end of thesis.

Key words

Accumulation of energy, Carnot batteries.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PROCHÁZKA, Artuš. *Technologie akumulace tepla s následnou produkcí elektrické energie* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157865>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *bakalářskou* práci na téma **Technologie akumulace tepla s následnou produkcí elektrické energie** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Prof. Jiřímu Pospíšilovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD	11
1 Přehled technologií pro akumulaci tepla se zpětným získáním elektrické energie	12
1.1 Rozdělení podle druhů nabíjení baterie	12
1.1.1 Nabíjení CB pomocí odporového ohříváče	12
1.1.2 Nabíjení na principu tepelného čerpadla (PTES)	13
1.1.3 Nabíjení pomocí tepla z tepelného generátoru	17
1.1.4 Získávání tepla z integrace do existující tepelné elektrárny/teplárny.....	18
1.2 Přehled druhů tepelných akumulčních nádrží.....	19
1.2.1 Nádrže na citelné teplo	19
1.2.2 Zásobníky skladující energii v podobě latentního tepla	21
1.2.3 Termochemické zásobníky tepla	22
2 Realizované a plánované projekty tepelných CB	23
2.1 Siemens Gamesa.....	23
2.2 MAN energy solutions	23
2.3 Westinghouse	25
2.4 Brenmiller energy	25
2.5 NOOR Midelt CSP projekt.....	27
2.6 SaltX.....	27
2.7 Další solární elektrárny využívající zásobníky na teplo pro akumulaci energie .	28
3 Vzájemné srovnání technologií	30
3.1 Srovnání technologie termálních CB s ostatními akumulátory elektrické energie	30
3.2 Přehled účinností a pořizovacích cen různých technologií CB	31
3.2.1 Srovnání různých typů termálních CB	31
3.2.2 Srovnání tepelných nádrží	32
4 Bilanční návrh tepelné baterie	36
4.1 Určení lokality, dopadající energie a účinnosti kolektorů.....	36
4.1.1 Parametry solárního pole	37
4.2 Základní rozměry tepelného zásobníku a výpočet jeho tepelné ztráty	37
4.2.1 Výpočet rozměrů	37
4.2.2 Tepelná ztráta	38
4.3 Parametry ORC	39

4.4	Výsledné parametry tepelného zásobníku	40
4.5	Vyrobená energie a účinnost cyklu	40
	Závěr.....	41
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	42
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	49

ÚVOD

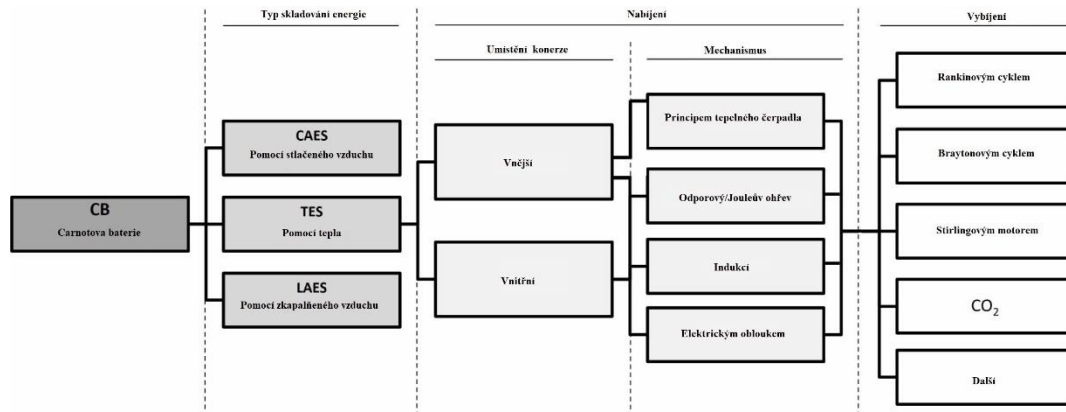
Obnovitelné zdroje energie jsou jednou z klíčových technologií pro dosažení bezemisní energetiky a průmyslu, jenže problém těchto zdrojů je, že jsou závislé na klimatických podmínkách a kvůli tomu nejsou schopné dodávat dostatečné množství energie v době, kdy je potřebná. V případě, kdy jsou podmínky zcela vyhovující naopak vzniká přebytek, který je nutno určitým způsobem zpracovat. S nárůstem OZE, narůstá i nestabilita sítě a z tohoto důvodu je nezbytné pokračovat v rozvoji akumulace elektrické energie, která by byla schopna tuto nestabilitu regulovat. Možnost využití akumulace připadá v úvahu i pro velké zdroje, které nejsou schopny regulovat svůj výkon (např. jaderné elektrárny), které by s její pomocí mohly reagovat na potřeby sítě. Jedním z ukazatelů efektivity akumulace je tzv. roundtrip efficiency, ta je definována jako poměr el. energie získané z baterie ku el. energii dodané na její uskladnění.

Jedním z nejrozšířenějších způsobů akumulace energie jsou přečerpávací vodní elektrárny, které elektrickou energii skladují pomocí potenciální energie vody v horní nádrži s poměrně dobrou účinností, ale výstavba těchto elektráren znamená obrovský zásah do krajiny. Dalším způsobem je akumulace do Li-ion baterií, tento způsob akumulace je taktéž účinný, naneštěstí pro větší výkony vydrží akumulovaná energie jen nízké jednotky hodin. V současnosti probíhá výzkum nových možností akumulace, jedním z favoritů je akumulace elektrické energie pomocí tepla, taktéž známá pod pojmem carnotovy baterie. V této práci se budu zabývat CB s termálním uskladněním energie.

Skladování elektřiny konverzí na teplo a následným uskladněním tohoto tepla se jeví jako ekonomicky přijatelná varianta. Počítá se, že tímto způsobem je možné držet naakumulovanou energii v rámci desítek hodin. Účinnost těchto baterií se velmi liší v závislosti na použité technologii.

1 Přehled technologií pro akumulaci tepla se zpětným získáním elektrické energie

Technologie CB se velice liší v závislosti na druhu nabíjení baterie, uskladněním tepla a následnou konverzí na elektrickou energii (viz. obr. č. 1). Proto v této kapitole stručně shrnu základní typy a principy fungování těchto baterií.



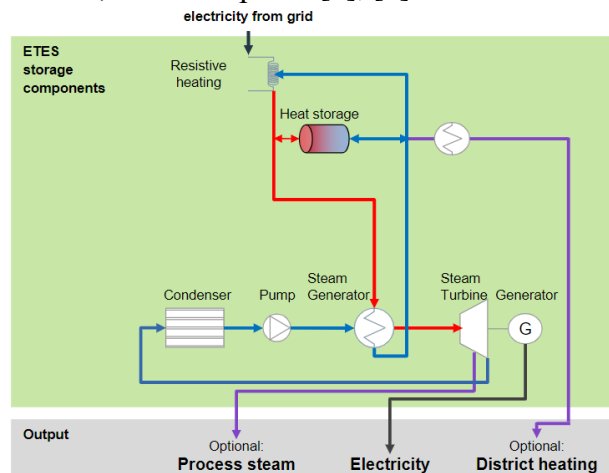
Obrázek 1: Rozdělení CB podle nabíjení a vybíjení [1]

1.1 Rozdělení podle druhů nabíjení baterie

Kapitola se bude zabývat přehledem několika principů nabíjení Carnotovy baterie, tyto principy se velice liší v technické složitosti a možnosti jejich využití i s jinými technologiemi.

1.1.1 Nabíjení CB pomocí odporového ohříváče

Tento způsob ohřívá teplotnosnou látku (v realizaci od Siemens Gamesa je to vzduch) pomocí odporové spirály, která je dopravována na skladovací médium pomocí ventilátoru. Teploty média mohou být až 750 °C, u velmi výkonných ohříváčů až 1000 °C. Skladovací médium se u tohoto typu pracujícím se vzduchem používá buďto vulkanický kámen nebo keramická plástev. Nahřívát lze také písková úložiště, také je tu možnost používat roztavené soli jako teplotnosnou látku a zároveň skladovací médium, u této realizace nastává ovšem problém s korozí nad 500 °C. Vzhledem k vysokým teplotám skladovaného média se tento typ nejčastěji vybíjí pomocí Rankinova cyklu, kdy během vybíjení se díky ventilátoru dopravuje vzduch skrze skladovací médium, díky tomu dosáhne teploty tohoto média, poté je dopravován do výměníku, ve kterém předává dostatek tepla vodě na přeměnu na páru, ta je poté dopravována na turbínu, kde koná práci. [3], [1]



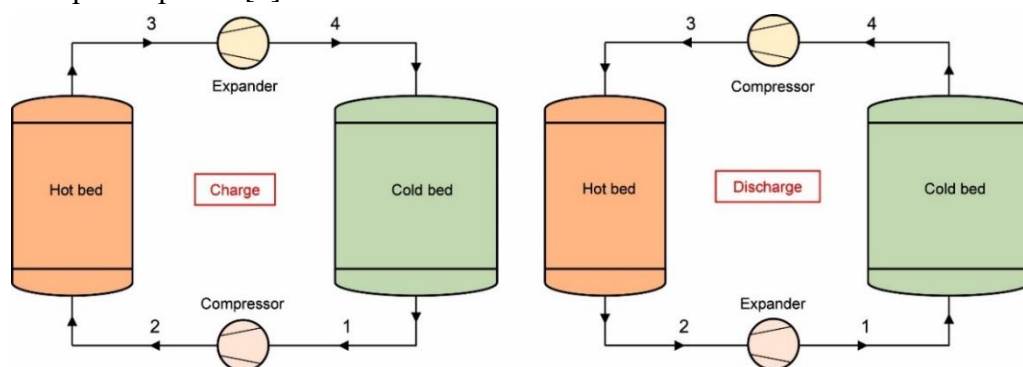
Obrázek 2: Schéma fungování CB s odporovým ohříváčem [2]

Takto přímo ohřívána CB by mohla v budoucnu stavěna na místo uzavřených uhelných elektráren/tepláren, kde je již vystavěný parní oběh, takže by došlo k snížení velkého počtu nákladů na vystavění infrastruktury. Nabízí se také možnost nebrat energii se sítě, ale baterii integrovat přímo do solární elektrárny, ze které by čerpala přebytečnou energii v době přílišné výroby. Celková účinnost je velmi limitována účinností parního oběhu, únikem tepla do okolí a tlakovými ztrátami. Výsledná účinnost u realizovaného projektu se pohybuje okolo 40 %. [4]

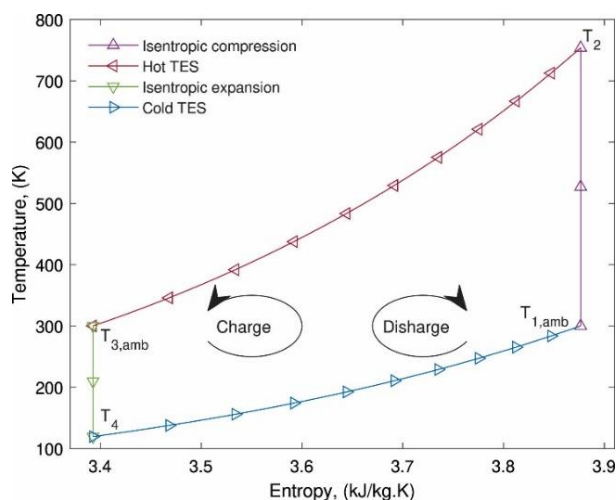
1.1.2 Nabíjení na principu tepelného čerpadla (PTES)

Jak už z názvu vyplývá, tato technologie pracuje na principu přečerpávání tepla z nízkoteplotního zdroje na vyšší teplotu, jakožto pracovní oběh se používá obrácený Braytonův nebo Rankinův cyklus v závislosti na pracovním médiu. Existují také nadkritické cykly. V angličtině se pro tento princip uchytila zkratka PTES (pumped thermal energy storage). [7]

Při nabíjení Braytonova cyklu je dodávána elektrická energie kompresoru, který stlačuje médium a předává energii nutnou pro navýšení teploty (až 1000 °C) a tlaku na požadovanou úroveň. Médium poté předává teplo v horkém zásobníku, v ideálním cyklu by byla teplota horkého zásobníku na stejné hodnotě jako teplota na výstupu z kompresoru. Tlak a teplota se poté snižují na dostatečně nízkou hodnotu, pro odebrání dostatečného tepla studenému zásobníku. Rekuperace tepla v cyklu může probíhat mezi médii, které odevzdalo teplo v horkém zásobníku a médii, které je před vstupem do kompresoru, tím bychom dosáhli snížení kompresní práce. [5]



Obrázek 3: schéma CB s Braytonovým oběhem [5]

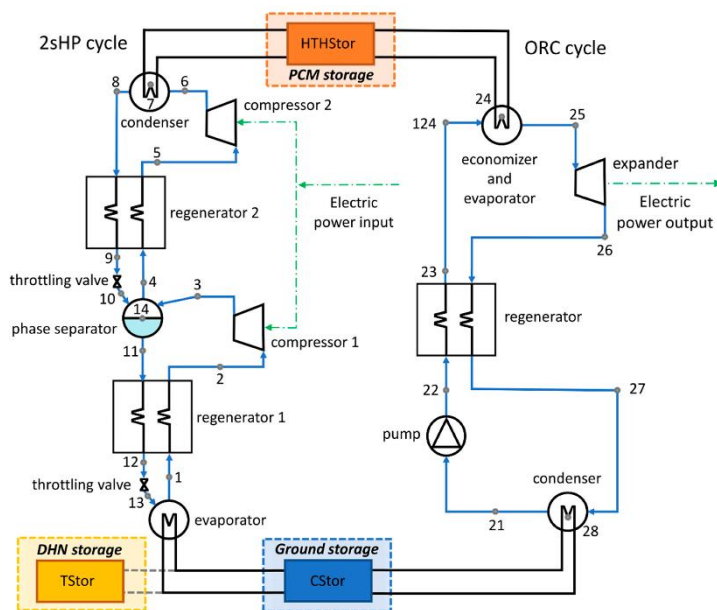


Obrázek 4: Ideální Braytonův cyklus [5]

Vybíjení tohoto cyklu probíhá pouze reverzací tohoto děje, pro vybíjení je ve většině případů vybudována vlastní smyčka kvůli lepším účinnostem, ale objevují se i návrhy s použitím reverzních strojů. Jako pracovní plyn pro tento cyklus se uvažuje argon, vzduch, dusík či helium. Každý plyn má svoje pro a proti, u vzduchu je to samozřejmě cena a dostupnost, ale nedosahuje takových teplot při stejných tlakových úrovních jako helium a argon, což by mělo za následek nižší účinnost cyklu. Použití jiných plynů než vzduchu by mělo také za následek změnu v geometrii turbín a kompresorů, kvůli rozdílným hmotnostním tokům plynu v oběhu. Jakožto kompromis se uvažuje dusík, který má dostačující vlastnosti ve smyslu přenosu tepla a při jeho použití, by na rozdíl od argonu a helia, snížil počet stupňů kompresoru a turbíny. Účinnosti tohoto cyklu by teoreticky mohli dosahovat až 70 %, v praxi se ale počítá spíše s účinností kolem 50 %. [6]

Narozdíl od Braytonova cyklu Rankinův pracuje při nižších teplotách (100-250 °C), jako pracovní látka je používána buďto natlakovaná voda, chladiva nebo termální olej. V cyklu dochází k fázové změně pracovní kapaliny, proto je potřeba do něj vložit separátor fáze. Pro zvýšení účinnosti se používá několika stupňová komprese. [7]

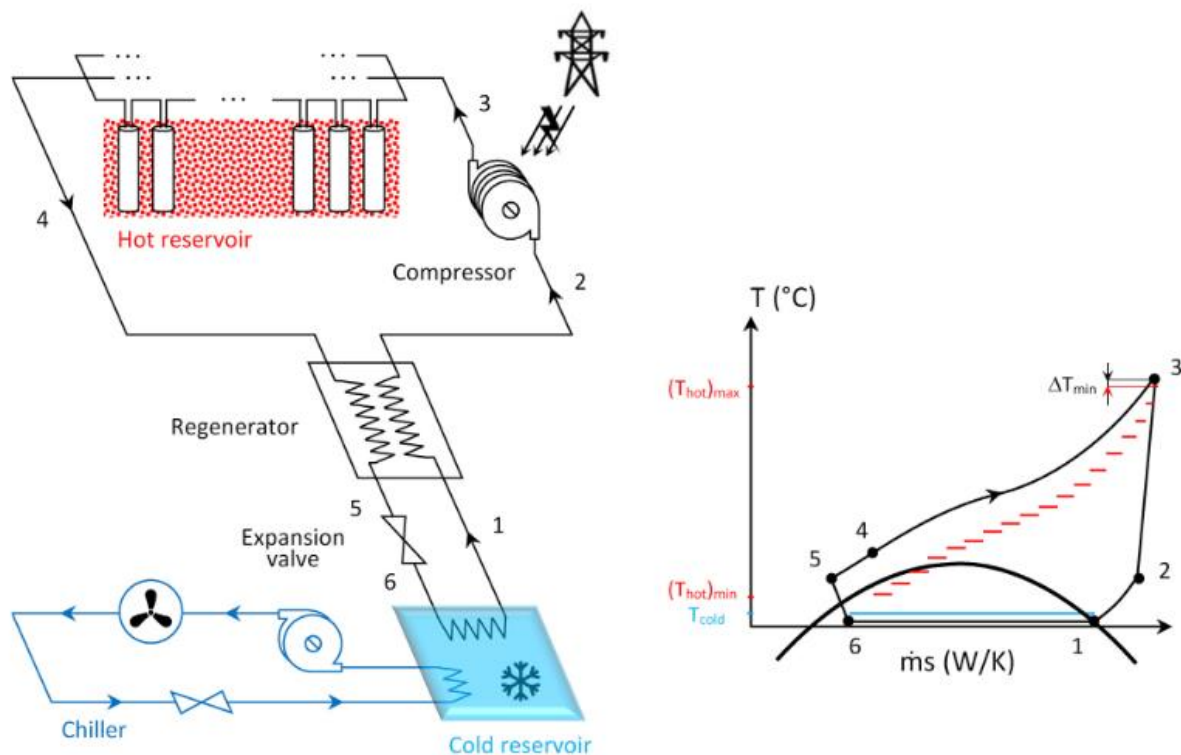
Princip nabíjení je vysvětlen ze schématu (obr. č. 5). Během nabíjení se sytá pára z výparníku (1) přehřeje v regenerátoru před vstupem do prvního kompresoru (2), přehřátá pára pracovní látky je poté stlačena na střední tlak a dopravována do separátoru fáze (3), kde se odloučí případná kapalná fáze. Pára se poté dostává do druhého regenerátoru (4), kde je znovu přehřátá (5). Přehřátá pára vstupuje do druhé části komprese a je stlačena na kondenzační tlak (6). Ve výměníku odevzdá teplo pracovní látce v horkém zásobníku a během tohoto procesu zkondenzuje na sytou kapalinu (8), která se poté podchlídí v regenerátoru (9), poté expanduje ve škrticím ventilu na nižší tlak a teplotu (10). Po expanzi je odloučena kapalná fáze od plynné v separátoru (14). Kapalná fáze (11) odevzdává teplo v dalším regeneračním výměníku. Na výstupu z výměníku (12) znovu expanduje, tentokrát na tlak, ve kterém dochází k odpařování (13). Teplo potřebné k odpaření pracovní látky bereme ze studeného zásobníku. [8]



Obrázek 5: Schéma nabíjení a vybíjení CB s Rankinovým cyklem [8]

Pro zpětné získání elektrické energie se používá ORC cyklus (viz. obr. č. 5) nebo klasický parní Rankinův. Díky nižším operačním teplotám se tento typ používá pro využití nízkoteplotních zdrojů (např. zemní výměník jako studený zásobník), ze kterých benefituje mnohem víc než PTES s Braytonovým cyklem. Pro tuto aplikaci je možno také využít zásobníku s tekutým médiem na citelné teplo nebo zásobníků na latentní teplo, které projevují menší teplotní ztráty a lepší řízení, na druhou stranu jsou dražší na konstrukci. Odhadovaná účinnost pro reálné aplikace se pohybuje okolo 40 %. [7] [8]

Nadkritický Rankinův cyklus většinou pracuje s CO_2 jako pracovní médium, v oběhu není separátor fáze, protože se látka po kompresi nachází nad kritickým bodem a ztrácí se možnost rozlišit kapalnou fázi od plynné, vzniká jen rozdíl v hustotě látky při zahřívání, takto dosáhneme lepšího teplotního gradientu než u klasického Rankinova cyklu, kde probíhá odevzdávání tepla při konstantní teplotě kvůli změně fáze. Hodí se taky více pro využití odpadního tepla. Tento cyklus je využíván, když je vyžadováno mezi tepelnými zásobníky udržovat malý teplotní spád a stále mít velkou účinnost transformace. Taky dosáhneme menších objemových toků a díky tomu menších velikostí kompresoru a turbíny, což dělá zařízení kompaktnějším. Rozdíl oproti klasickému Rankinu spočívá ve stlačení páry odcházející z regenerátoru na nadkritický tlak. Tento oběh dosahuje vyšších účinností, většinou nad 50 %. [9]

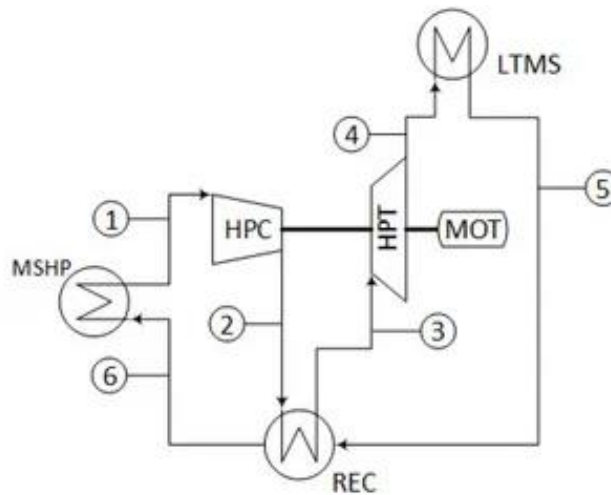


Obrázek 6: Schéma a T-s diagram nadkritického CO_2 [9]

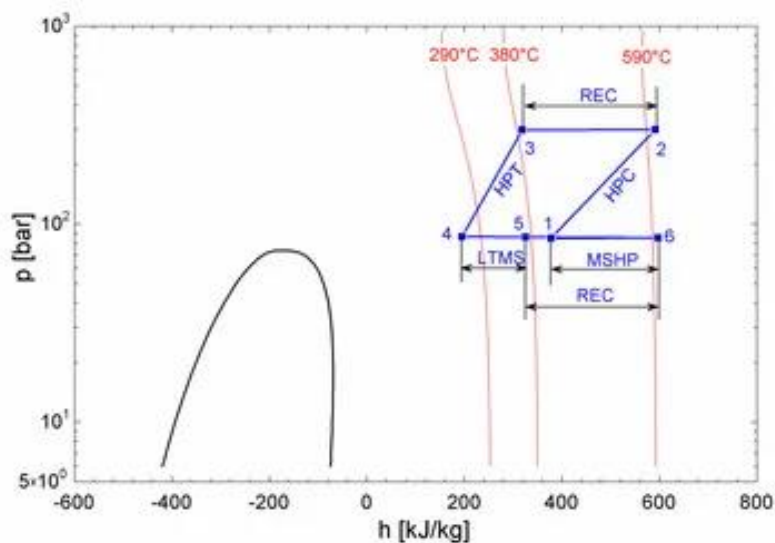
Existuje druh PTES, který může využívat odpadní teplo z průmyslu nebo ze solárních elektráren využívajících odraz slunečních paprsků pomocí zrcadel. Takto integrovaná CB se nazývá TI-PTES. Odpadní teplo, předává energii pracovnímu médiumu a tím snižuje energetický nárok na dodávanou elektrinu pro chod baterie. Tento typ může používat kterýkoli pracovní cyklus. Jako ukázkou jsem vybral model, používající nadkritický Braytonův cyklus používající CO_2 jako pracovní médium, pro nabíjení i vybíjení baterie. V tomto cyklu nedochází k fázové

změně pracovního média, jen se pohybuje v blízkosti kritického bodu pro CO₂ (30 °C a 8MPa). [10]

Jako zdroj odpadního tepla, slouží teplo ze sluneční elektrárny využívající parabolické kolektory, které přeměňují sluneční paprsky do sběrného média. Toto teplo se také skladuje ve vlastních zásobnících na nízkopotenciální teplo (300-400 °C, tedy nízkopotenciální oproti horkému zásobníku). CO₂ se tedy nahřeje ideálně na teplotní úroveň zásobníku na odpadní teplo (5) a jde do regeneračního výměníku, kde převezme teplo od stlačeného CO₂ a nahřeje se na požadovanou teplotu (400-600 °C v závislosti na odpadním teplu). Poté jde na vstup do výměníku (6), tam předává teplo skladovacímu médiu, pro tento případ se jedná o tekutý zásobník využívající roztavené soli. Jakmile proběhne odevzdání tepla (1), tak je plyn stlačen na tlak 30MPa (2) a odevzdává své teplo nízkotlaké větvi ve výměníku (3). Poté expanduje na turbíně na tlak 8,5 MPa (4), tímto dodává práci do systému a o něco snižuje spotřebu el. energie pro pohon kompresoru, který je na stejné hřídeli. [10]

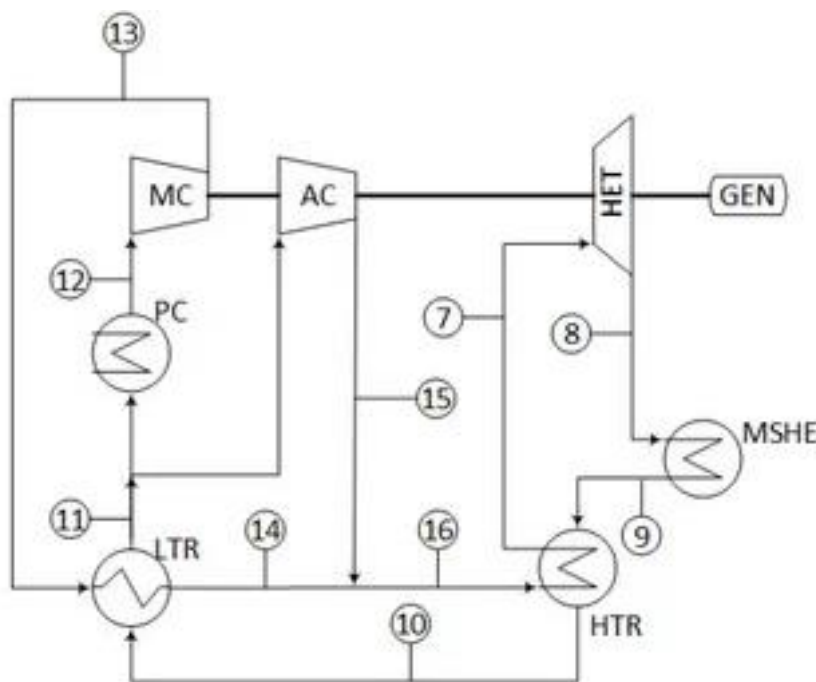


Obrázek 7: Schéma nabíjení TI-PTES [10]



Obrázek 8: p-h diagram nabíjení [10]

Při vybíjení tohoto modelu se používá stejný cyklus, jen obrácený. Komprese CO₂ se musí rozdělit na dvě části z důvodu malé měrné tepelné kapacity plynu v LTR větvi, kvůli tomuto jevu bývá špatná účinnost regenerace, proto se část stlačovaného plynu odvede do vedlejšího kompresoru a poté se opět přimíchá do hlavního proudu. Tímto se zlepší regenerace tepla vyexpandovaného plynu do vysokotlaké větve. Z důvodu vysokých tlaků po kompresi (30 MPa), se odběr tepla z horkého zásobníku dává až za turbínu, pro tento model je použit trubkový výměník, kvůli snadnému čištění od roztavené soli a stále poměrně vysokým tlakům (nad 8 MPa). [10]

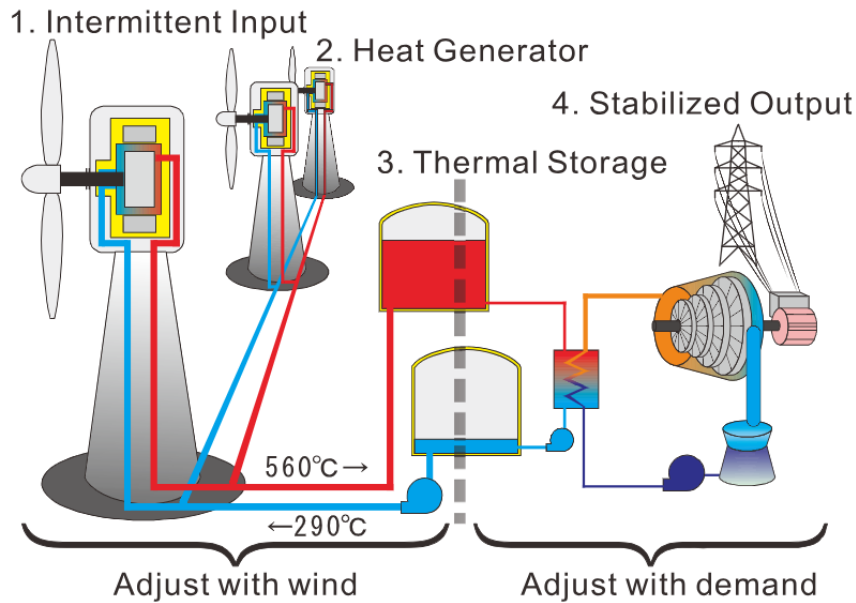


Obrázek 9: Vybíjení TI-PTES

Tento typ CB může dosahovat účinnosti přes 100 % (pokud se bavíme o roundtrip efficiency, která je definována jako podíl el. energii vyprodukované ku el. energii spotřebované pro nabití). Jinak tyto baterie mohou prakticky dosahovat účinnosti až 70 %, ale spíše níže. Takto integrovaná baterie bude v sobě akumulovat špičky v elektrizační soustavě, a ještě tepelnou energii ze solárních kolektorů v době, kdy by se muselo toto teplo mařit, abychom nepřetížili rozvodnou síť. Uložená energie má vydržet naakumulované po dobu několika hodin do doby, kdy bude potřeba zase energii dodávat. [10]

1.1.3 Nabíjení pomocí tepla z tepelného generátoru

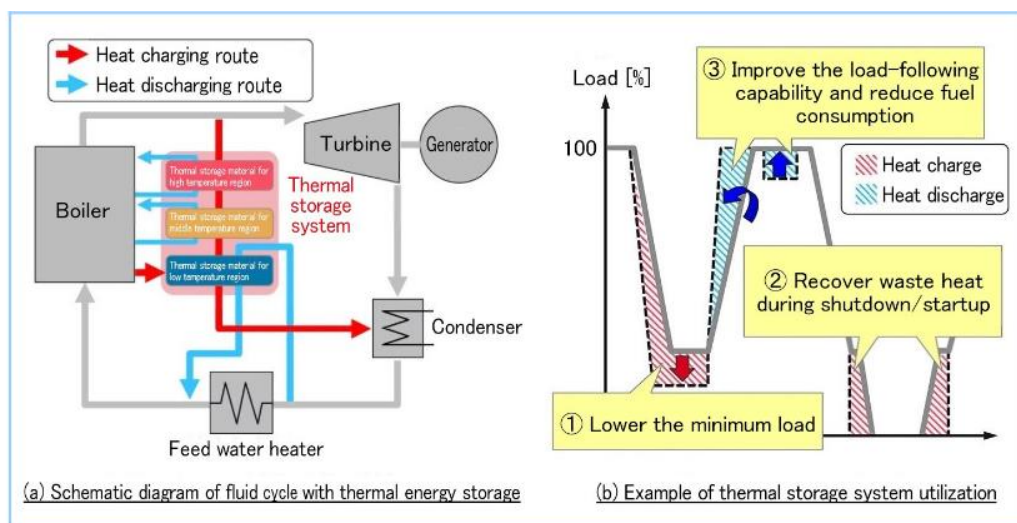
WTES je druh CB, která se používá v kombinaci s větrnými elektrárnami. Do gondoly větrné elektrárny je nainstalován generátor tepla, který převádí rotační energii větrné turbíny na tepelnou, jako funkční principy pro tento generátor se používá buďto tření mezi pevnými materiály (tento princip by vyžadoval častou údržbu, kvůli výměně desek), tření vyvolané nuceným tokem kapaliny a její následné ohřátí nebo ohřátí pomocí elektromagnetické indukce a ztrátových proudů, jakožto nejefektivnější varianta se uvažuje tepelný motor na principu indukce. Vzniklé teplo je odváděno teplotnosným médiem do zásobníků tepla. Naakumulované teplo poté můžeme vybit kterýmkoli cyklem. Při použití Rankinova cyklu pro vybití teplého zásobníku a převodu na el. energii, by měla tato baterie dosahovat účinnosti kolem 33 %. [11]



Obrázek 10: Schéma WTES [11]

1.1.4 Získávání tepla z integrace do existující tepelné elektrárny/teplárny

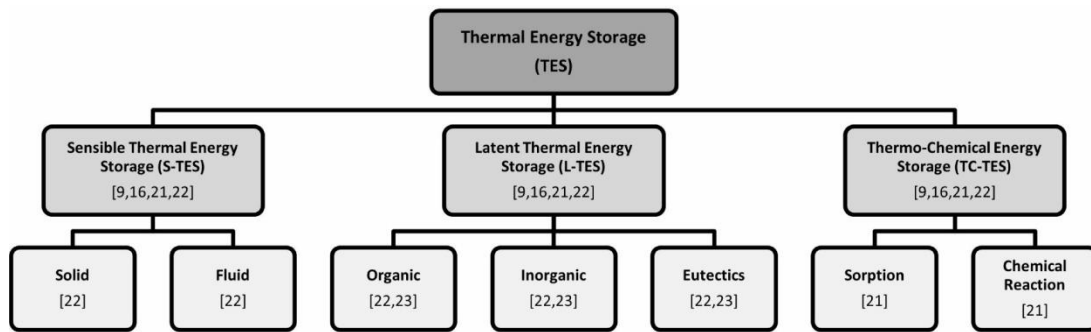
Pro nabití bude baterie získávat teplo, které by se jinak zmařilo obtokem turbíny v elektrárně do vývěvy. Toto teplo se získává v době, kdy zařízení musí část toku páry odklonit z důvodu velké dodávky energie z OZE přes den nebo v době, kdy se zařízení spouští, či naopak vypíná. V tento moment vzniká v kotli více energie, než je možno na turbíně zpracovat, toto teplo uskladníme do akumulačních nádrží do doby, než ho bude potřeba využít. V nádrži by mělo být uloženo tolik tepla, aby zvládlo v době vbíjení přehřát páru do stavu, ve kterém se nachází při plném zatížení v provozu. To znamená uskladnění jak latentního tepla páry, tak nízkoteplotní potenciál v přehřáté vodě v kotli. Při takovéto aplikaci by došlo ke snížení spotřeby paliva v zařízení během průběhu denního cyklu, kdy na odpolední hodiny je nutno snížit výkon z kvůli velké dodávce energie z OZE (teplo se akumuluje) a naopak navečer kdy energie z OZE opadá by se zásobník tepla vybíjel a snižoval nároky na teplo dodané v palivu. [12]



Obrázek 11: Schéma CB integrované do zařízení [12]

1.2 Přehled druhů tepelných akumuláčnických nádrží

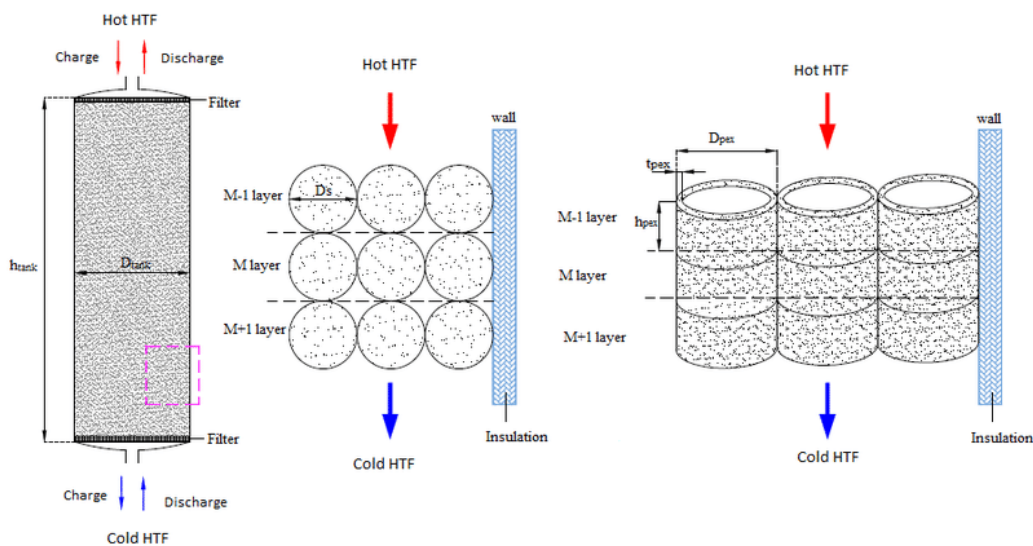
Akumulační nádrže na teplo jsou klíčovou součástí CB. Slouží k akumulaci tepla nebo chladu po co nejdelší možnou dobu, ideálně beze významnějších ztrát. Na rozdíl od klasických baterií na el. energii bývají ekologicky šetrné a mají několikanásobně delší životnost. Anglická zkratka pro tuto technologii je TES a je rozdělena do několika druhů.



Obrázek 12: Rozdělení TES [1]

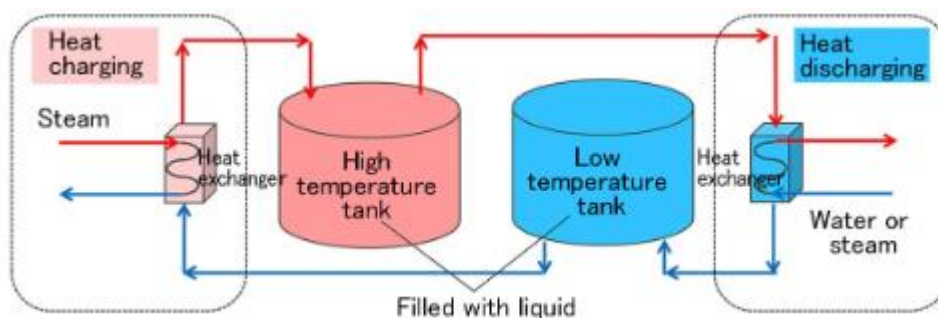
1.2.1 Nádrže na citelné teplo

Tyto nádrže se rozdělují na dva druhy na pevné a tekuté. Během celého procesu skladování tepla skladovací materiál neprochází fázovou změnou. V pevném provedení je pracovní médium hnáno skrze nádrž a tím odevzdává teplo skladovacímu materiálu. Nádrže s pevným skladovacím materiálem se dále rozdělují na dva druhy podle výplně, buďto mohou být jednotlivá lože nádrže vyplněna materiálem nebo může výplň tvořit fixní konstrukce například z keramické mřížky, kvůli složitým tvarům fixní výplně roste cena nádrže, ale díky tvarování lze zlepšit tok horkého média a tím zvýšit efektivitu přestupu tepla. Na rozdíl od ostatních typů mají tyto pevné nádrže malou hustotu uskladnění energie, vysoké nároky na navržení tepelného toku skrze nádrž a velkou potřebu vysoce porézního materiálu pro dosažení přijatelné účinnosti. [1] [14]



Obrázek 13: Schéma tepelné nádrže [13]

Tekuté zásobníky na citelné teplo mohou používat vodu, ta se ale musí pro větší teploty držet pod přetlakem, takže se vodní zásobníky v kombinaci s příměsí používají pro nižší teploty. Střední teploty porývají oleje, rozsah teplot, pro které se používají, je 100–250 °C, problémem těchto olejů je degradace vlastností v čase. Pro teploty kolem 500 °C jsou jako pracovní média zvoleny soli, většinou dusíkaté (NaNO_3 , KNO_3). Tyto zásobníky vykazují větší energetickou hustotu, což se projeví na menším zastavěném prostoru, vyžadují ale tepelný výměník pro přenos tepla z teplotné kapaliny do zásobníku, čímž roste tepelná ztráta a nastává problém s ucpáváním při použití solí jako média. Mají také složitější konstrukci oproti zásobníkům s pevnými materiály. Pro vysokoteplotní kapalný zásobník využívající např. sůl jako médium, je potřeba dvou nádrží, mezi kterými se skladovací médium prohání přes výměník a bere si teplo od teplotné kapaliny. Nádrž může také být nahřívána odporovou spirálou, což se využívá v domácnostech a jiných menších aplikacích. [15] [16]



Obrázek 14: TES s tekutým médiem [12]

Materials	Type	(Cp) [kJ/kg·K]	λ [W/(m·K)]	Working Temperature [°C]
Silica fire bricks	Solid	1	1.5	200–700
Reinforced concrete	Solid	0.85	1.5	200–400
Cast iron	Solid	0.56	37	200–400
Basalt	Solid	1.231	1.5	~500
Fe_2O_3	Solid	0.851	4.91	~600
Al_2O_3	Solid	1.167	11.1	~700–800
Carbonate salts	Liquid	1.8	2	450–850
Nitrate salts	Liquid	1.6	0.52	256–565
Liquid sodium	Liquid	1.3	71	270–530
Nitrite salts	Liquid	1.5	0.57	250–450
Silicone oil	Liquid	2.1	0.1	300–400
Mineral oil	Liquid	2.6	0.12	200–300

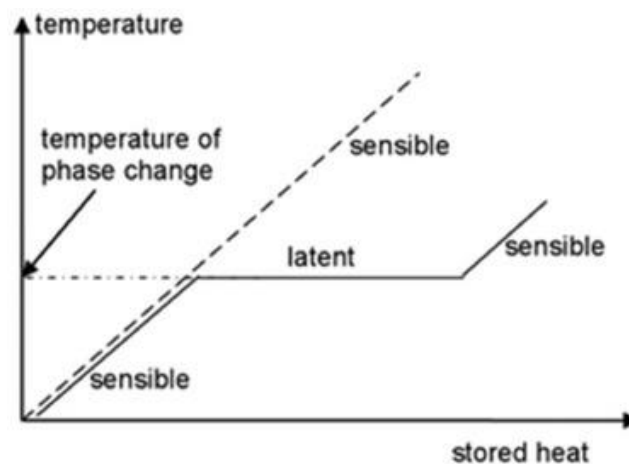
Tabulka 1: Materiály používané pro skladování tepla [7]

Nádrže na citelné teplo pracují na principu ohřívání materiálu pro navýšení jeho vnitřní energie. Toto teplo se poté odebírá teplotnou kapalinou což má za následek ochlazování skladovacího materiálu. Tento princip se řídí rovnicí

$$Q = m \cdot \int_{t_1}^t c_p(t) dt [J] \cdot [16] \quad (2.1)$$

1.2.2 Zásobníky skladující energii v podobě latentního tepla

Zásobníky na latentní teplo skladují většinou energii v teple potřebném pro fázovou změnu skladovacího materiálu. Skladovací materiál může skladovat teplo potřebné buďto ke změně skupenství z pevného na kapalné nebo z kapalného na plynné. Při vhodné volbě materiálu dokážeme takto skladovat velké množství tepla, při konstantní teplotě (mají velkou energetickou hustotu). [17]



Obrázek 15: Graf závislosti teploty na skladovaném teple [17]

Latentní zásobníky využívající přeměnu pevné-kapalné skupenství mají velké uskladnění energie při malé změně objemu materiálu v nádrži, na rozdíl od zásobníků kapalina-plyn, ve které dochází k velkému nárůstu objemu a tím i tlaku při nabíjení, proto se ve většině případů používá fázová přeměna z pevného na kapalné. Kromě latentního tepla v sobě uschovávají i část citelného (viz. Obr. 14). Technické provedení zásobníku se většinou rozlišuje podle proudění teplotnosné látky v nádrži, která buďto proudí skrze materiál v přímém kontaktu, obtéká kolem materiálu uzavřeném v konstrukci nebo proudí v trubkách skrze materiál izolovaný v nádobě. Účinnější varianta je materiál uzavřený v konstrukci, která zvětšuje jeho plochu, což má za následek intenzivnější přestup tepla, také tím ochráníme materiál před okolním prostředím a prodloužíme jeho životnost. Co se týče přímého kontaktu se skladovacím materiálem, tak tato varianta má také vysokou účinnost, ale nastává problém se správným výběrem teplotnosné látky a skladovacího materiálu, kvůli následné separaci v nádrži. Existuje také možnost přímého ohřevu pomocí odporové spirály. Materiály pro tento typ zásobníku vykazují nízkou tepelnou vodivost, to má za následek špatnou efektivitu nabíjení a vybíjení baterie. Pro zlepšení vodivosti se materiál obalí do kapsule z tepelně vodivého materiálu, vytvoření vysoce porézní struktury nebo se do něj dávají příměsi. [17] [18]

Materiálů pro tyto zásobníky je velká škála, hlavním kritériem pro výběr je teplota fázové změny, tím i určíme zdali se bude jednat o teplou či studenou nádrž, a latentní teplo potřebné pro změnu skupenství, které určuje množství uložené energie na kilogram látky. Množství

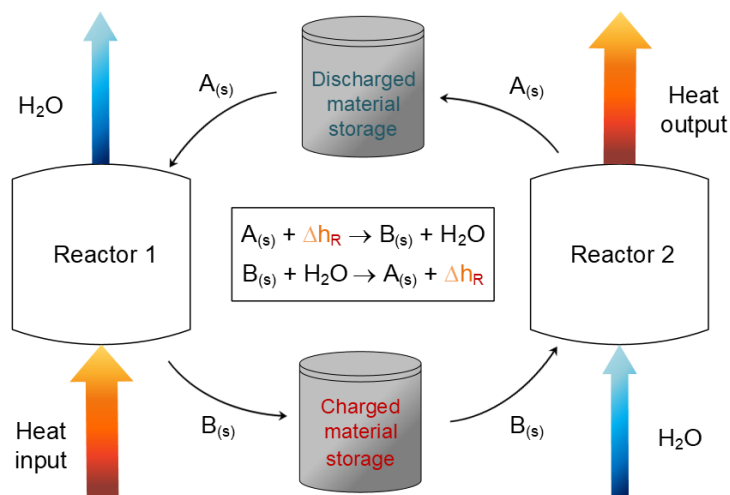
uložené energie v latentním teple se dá určit jako rozdíl entalpií na začátku a konci fázové přeměny podle rovnice

$$Q = \Delta H = m \cdot (h'' - h') [J] . [17] \quad (2.2)$$

1.2.3 Termochemické zásobníky tepla

Termochemické zásobníky využívají vratných chemických reakcí pro akumulaci a následné odevzdání tepla. Mají ze všech zásobníků největší hustotu energie, největší účinnost, ale chemické reakce degradují v čase, takže mají i nejmenší životnost.

V první fázi je teplo dodáváno do chemického reaktoru, kde probíhá endotermická reakce, která odděluje vodu od pracovního materiálu, ta je poté separována. V druhé fázi probíhá exotermní reakce, při které materiál zase přijímá vodu a uvolňuje teplo. Typy pracovních látek se liší podle teplotních rozsahů reakce (od 100-900 °C pro reakce s kyselinou sírovou). Existují dva hlavní typy reaktorů integrované, ve kterém probíhá jak endotermní separace vody ze sloučeniny, tak exotermní slučování a separované, kdy v jednom reaktoru probíhá endotermní reakce, voda se odlučuje a dehydratovaný materiál se skladuje v nádobě do doby, kde je ho potřeba přemístit do druhého reaktoru, kde přimícháváme vodu a díky tomu nastává exotermní reakce, kdy se materiál znovu hydratuje. Hydratovaný materiál je potom skladován ve vlastním zásobníku. Mnoho výhod nabízí 3-fázový reaktor, v tomto reaktoru je kromě pracovní látky olej, který pomáhá v přenosu tepla do reakce, celá suspenze je promíchávána pro zlepšení kinetiky reakce. Voda je z tohoto reaktoru odváděna ve formě páry a pevný materiál zůstává pro další použití. [19] [20]



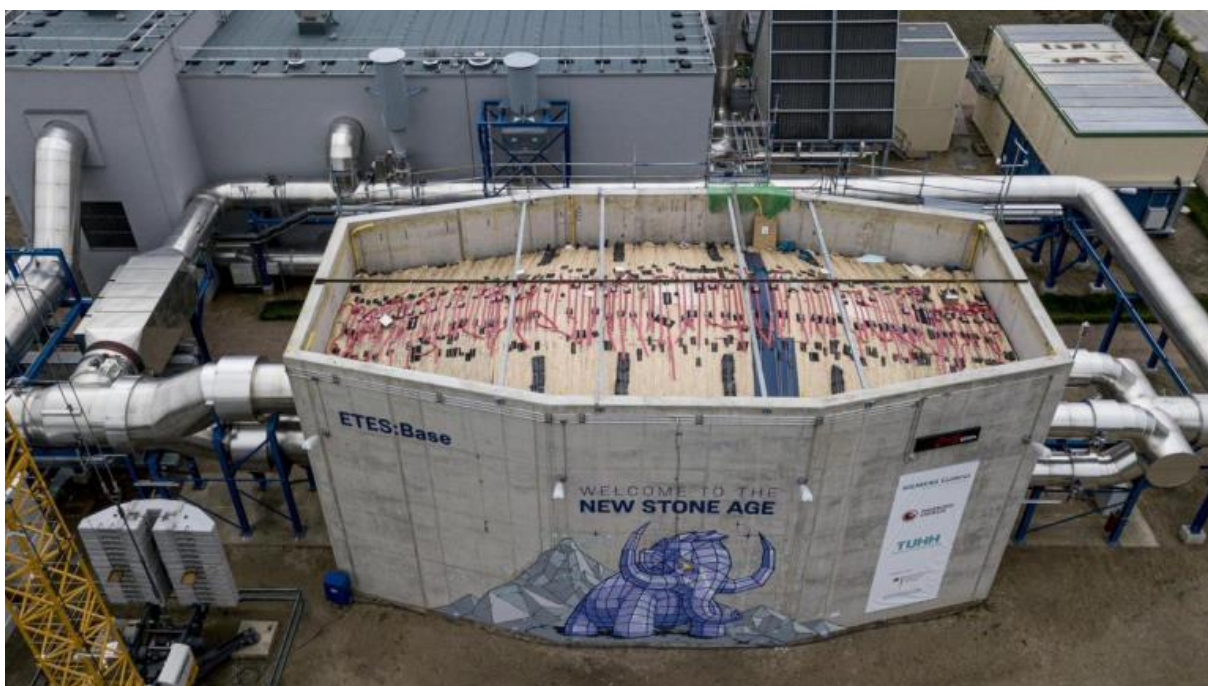
Obrázek 16: Schéma separovaných reaktorů [19]

2 Realizované a plánované projekty tepelných CB

Většina návrhů CB je zatím ve fázi laboratorních, či výpočetních modelů a teprve se hledá jejich ekonomická výhodnost, popřípadě průzkum celkové navýšení účinnosti jednotlivých typů. Tato kapitola se zabývá přehledem realizovaných projektů a pár domluvených projektů od jednotlivých firem.

2.1 Siemens Gamesa

V červnu roku 2019 společnost Siemens Gamesa spustila termální baterii. Baterie využívá odporové spirály pro náhřev vzduchu, který je pomocí ventilátorů dopravován do zásobníku, který se skládá z 1000 tun nadrceného vulkanického kamene. Zařízení dokáže naakumulovat 130 MWh tepelné energie a uchovávat ji po dobu jednoho týdne, teplota nabitého zásobníku může dosahovat až 750 °C. V současnosti je k zařízení připojen RC cyklus s elektrickým generátorem o výkonu 1,4 MW, který dokáže z uskladněného tepla vyrábět energii po dobu 24 h, elektrickou energií je poté zásobováno 1500 domácností. Účinnost celého oběhu zařízení, tedy přeměna elektrické energie na teplo a poté zpět na elektrickou energii je 45 %. Do budoucna má společnost v plánu postavit baterii s kapacitou 1 GWh, začátek výstavby je odhadnutý na rok 2025. Projekt byl sponzorován německou vládou finančním balíčkem ve výši 27 milionů eur. [21] [4]

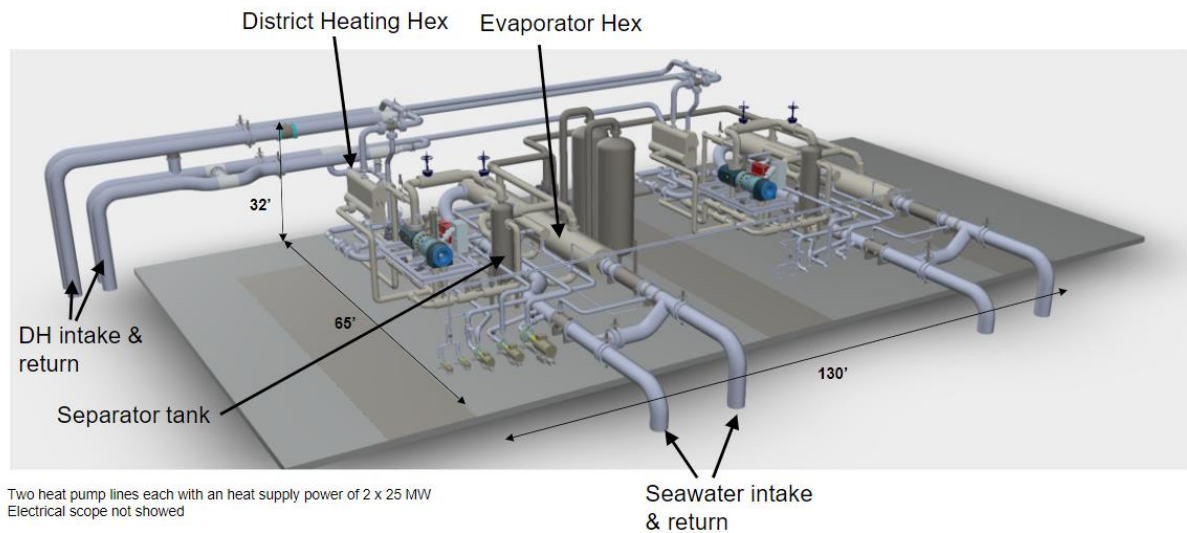


Obrázek 17: ETES od Siemens Gamesa v Hamburgu [22]

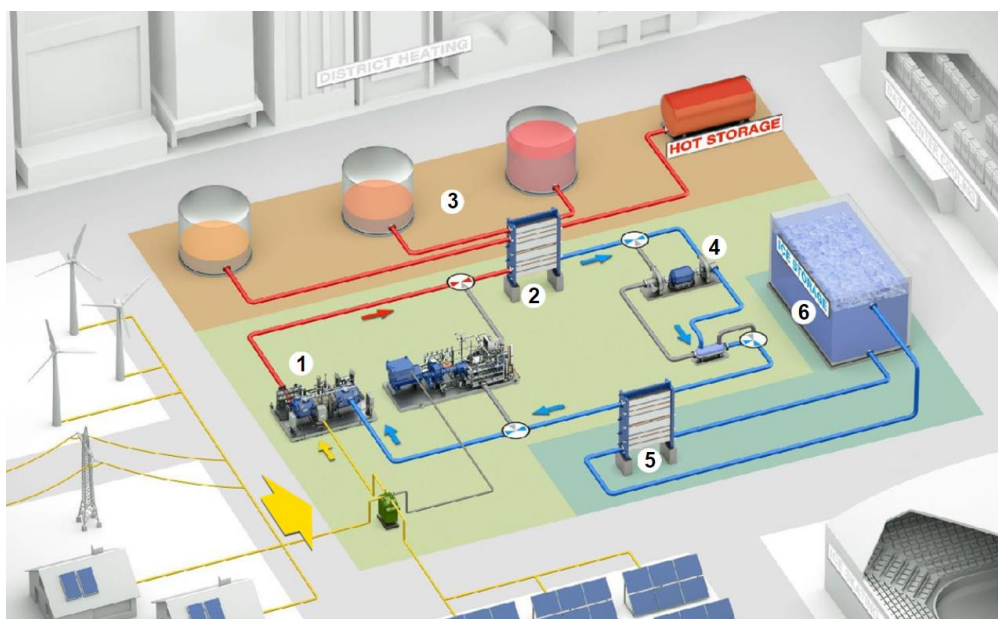
2.2 MAN energy solutions

V Dánském městu Esbjerg tato firma dokončila svůj projekt velkého tepelného čerpadla s výkonem 50 MW (dvě pumpy o výkonu 25 MW). Toto zařízení je schopné dodávat 235000 MWh tepla každoročně. Cyklus čerpadla je transkritický s CO₂ jako chladivem, teplo pro odpaření látky bere z mořské vody a elektrickou energií z větrných elektráren na pobřeží, takže vyrovnává špičky ve výrobě elektrické energie a skladuje je ve formě tepla (až 150 °C). Zařízení

nahrazuje místní uhelnou teplárnu, jelikož toto zařízení nemá žádné uhlíkové emise, tak výrazně sníží uhlíkovou stopu Esbjergu. Teplo získané ze stlačeného chladiva se skladuje v několika vodních nádržích o různých teplotách, aby se nejlépe kopíroval teplotní profil chlazení CO₂ a tím navýšil účinnost přestupu tepla. Co se týče špiček ve výrobě elektrické energie, tak je schopné stáhnout 12 MW přebytek elektrické energie do 30 s. Zařízení také nepotřebuje olejové hospodářství, jak kompresor, tak i expanzní turbína jsou uloženy v magnetických ložiskách a jsou hermeticky uzavřeny pro zabránění jakéhokoli úniku pracovního média. Toto zařízení nemá zpětnou konverzi na elektrickou energii, jen slouží k dodávce tepla pro domácnosti, vzniklo z projektu, který počítá s reverzací děje a tím návaznou zpětnou výrobu elektrické energie, taky místo mořské vody jako zdroje tepla pro odpar CO₂ bude použit chladný zásobník, který bude v průběhu akumulačního cyklu skladovat teplo ve formě latentního z fázové změny voda-led, toto teplo může být odebráno pro potřebný průmysl. [23] [24]



Obrázek 18: Schéma zařízení v Esbjergu [25]



Obrázek 19: Schéma zařízení se zpětnou výrobou elektrické energie [23]

2.3 Westinghouse

Westinghouse má domluvené dva projekty na PTES využívající nadkritický CO₂ cyklus. Studený zásobník bude tvořit velká vodní nádrž, která skladuje teplo ve své fázové změně na led a horký zásobník je tvořen betonovou konstrukcí, která je potopená v teplotně odolném oleji, který přenáší energii z teplotně odolného média do konstrukce pro uskladnění. Tepelná ztráta zásobníku je odhadována na 0,5 % za den, k nádržím mohou být připojeny elektrické ohřívače, které teplo v případě potřeby dodají. [28]

Jeden z projektů bude realizovaný v Aljašce, jeho plánovaná kapacita bude 1,2 GWh, tato baterie podpoří stabilitu výroby plánovaných větrných elektráren a bude tvořit největší akumulární zařízení ve spojených státech. Projekt dostal grant ve výši 325 milionů od US Department of Energy. Druhý projekt je plánovaný, po dohodě se státně vlastněnou firmou Bulgarian Energy Holding, do Bulharska a jeho kapacita by měla činit 2 GWh. Díky tomuto může Bulharská vláda pokračovat v budování solárních a větrných elektráren beze strachu, že by tím způsobily nestabilitu sítě. [26] [27]

Svoji technologii PTES vyvinul Westinghouse ve spojení s firmou Echogen. Zařízení má stabilně dodávat elektrickou energii po dobu 10 hodin, životnost je odhadována na 50 let. [28]



Obrázek 20: Model plánovaného zařízení v Aljašce [27]

2.4 Brenmiller energy

Tato firma poskytuje zařízení pro uskladnění tepla s konverzí, buďto na teplou vodu do otopné soustavy, nízkoteplotní páru pro průmysl nebo vysokoteplotní páru pro elektrárenskou turbínu. Tyto zásobníky mohou využívat odpadní teplo z výfukových plynů ocelářských kotlů, teplo z kotlů na biomasu nebo ze solárních elektráren. Zařízení ukládá teplo do jednotlivých modulárních zásobníků naplněných nadrceným kamenem, takže dokáží svoji kapacitu upravovat dle potřeby zákazníka. Podle druhu použití mají tyto zařízení ztrátu naakumulovaného tepla mezi 3-5 %/den. [30]



Obrázek 21: Ukázka jednotlivých modulů s nadrceným kamenem. [30]

Jedno zařízení je naistalováno v paroplynové elektrárně v Toskánsku, systém má kapacitu 24 MWh, teplota nabitého zásobníku je 550 °C a má vydržet v plné kapacitě po dobu 5 hodin. Systém se nabíjí z vysokotlaké páry (80 bar, 550 °C), která prochází zařízením a kondenzuje, načež se vrací zpět do parního oběhu. Zařízení slouží pro snížení energetické náročnosti při startu parní turbíny, kterou zásobuje párou o teplotě 360 °C, dodávka páry má být konstantní po dobu 6 h o hmotnostním průtoku 6 t/h. Toto zařízení také může pomoci s rozdělením výroby, kdy po určitou dobu může fungovat pouze parní oběh. [29]



Obrázek 22: TES Toskánsko, Itálie [29]

Další realizované zařízení je v Brazílii, dodává teplý vzduch (přes 600 °C) do továrny na plasty pro tavení. Zařízení má kapacitu 1 MWh a používá biomasu jako zdroj tepla, tímto nahrazuje předchozí hořáky na zemní plyn. Zařízení pomáhá ušetřit 75 % z nákladů na palivo, také snižuje emise skleníkových plynů z ohřevu vzduchu o 800t/rok (počítá se jen CO₂). [32]



Obrázek 23: Zařízení v Brazílii [31]

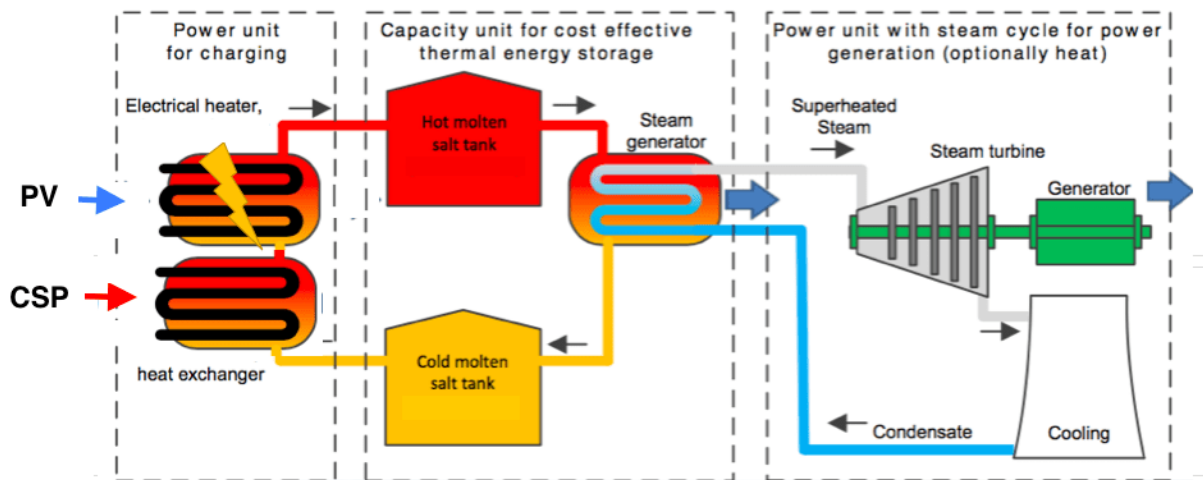
Firma má na svoji technologii několik domluvených zakázek, jednou z nich je 32 MWh baterie, která má dodávat průmyslovou páru do Izraelského pivovaru v Netanji. Tato baterie nahradí olejové hořáky, které páru doteď produkovaly a tím sníží emise údajně o 6200 t/rok. Baterie se bude akumulovat z elektřiny OZE v době přebytku, kdy bude cena nejlevnější, tímto ušetří pivovaru 7,5 milionu za dobu 15 let z cen energií. Účinnost nabíjení má dosahovat 99 % a vybíjení 97 %. [33]

2.5 NOOR Midelt CSP projekt

Tento projekt je 800 MW solární elektrárna v Maroku, v současnosti se skládá z parabolických solárních kolektorů v kombinaci s fotovoltaickými panely. Skladování energie probíhá kombinovaně s bateriovými úložišti, dohromady mají tvořit 800 MWh úložiště (z toho je přibližně 190 MWh v tepelných zásobnících). Tepelné zásobníky má tvořit roztavená sůl, teplo je získáváno jak z teplotné látky parabolických kolektorů, tak přes odporovou spirálu z PV panelů. Baterie se dokáže nahřát až na teplotu 565 °C přes odporové vytápění z PV panelů, ze solárních kolektorů se získává teplo o nižší teplotě (cca 400 °C). Zásobníky mají dodávat dostatek energie pro zásobování elektrinou po dobu 5 h. Uložené teplo v soli bude poté pohánět parogenerátor pro výrobu páry do RC cyklu. [34] [36]



Obrázek 24: CSP v Maroku [35]



Obrázek 25: Schéma kombinovaného úložiště s CSP a PV [34]

2.6 SaltX

SaltX je firma sídlící ve Švédsku, která se zabývá termochemickými zásobníky tepla využívající upravené vápencové soli jako skladující médium. Krystalky vápence jsou pokryté velmi tenkými vrstvami (řádově nanometry), které jednak snižují agresivitu materiálu a zabraňují slepení materiálu v nabíjecích a vybíjecích cyklech. Bez této úpravy materiálu by zásobník ztratil svoje akumulační vlastnosti po zhruba 60 cyklech, zatímco s úpravou jich vydrží údajně tisíce. Akumulované teplo získané v chemické reakci se neztrácí jako v běžných zásobnících na citelné nebo latentní teplo, proto vydrží jak dlouho bude třeba. [37]

Termální baterie o kapacitě 10 MWh, 0,5 MW vybíjecí výkon, byla naistalována v Reuter CHP teplárně v Berlíně. Baterie bude brát energii ze sítě a tím bude stahovat špičky ve výrobě elektrické energie z větrných elektráren, doba nabíjení baterie trvá 10 h. Většina výkonu je vybíjena ve formě tepla do berlínského vytápěcího systému. Část výkonu (cca 30 %) je využita pro výrobu elektrické energie, teplota získaného tepla při vybíjecí chemické reakci je zhruba 450 °C, efektivita konverze elektrické energie na teplo je 72-85 %. [37] [39]



Obrázek 26: Zařízení v Berlíně [39]

Další instalace se nachází ve Stockholmu, jedná se o testovací zařízení, které zkouší reaktor s fluidním ložem, díky kterému probíhají chemické reakce efektivněji, v novém reaktoru probíhá přestup tepla 3-5 násobně oproti berlínské instalaci, tímto zařízením dosahuje větších výkonů. Výkon zařízení je momentálně 100 kW, s tím že s postupem času by se mělo dosáhnout výkonu až 1 MW. [38]

2.7 Další solární elektrárny využívající zásobníky na teplo pro akumulaci energie Cerro Dominador CSP:

Tato solární elektrárna o výkonu 210 MW (110 CSP+100 PV) skladuje přebytečnou energii v zásobnících s roztavenou solí na pozdější využití. Zásobníky o kapacitě 1750 MWh-t jsou nabíjeny teplem z teplotné látky (taktéž roztavená sůl z věže solární elektrárny), takže jsou zásobníky nabíjeny jen z energie panelů využívající odraz slunečních paprsků. Teplota nabitého zásobníku dosahuje hodnot nad 500 °C a skladovanou energii dokáže dodávat po dobu 17,5 h. [40]



Obrázek 27: Cerro Dominador CSP v Chile [41]

Solana:

Jedná se o solární elektrárnu využívající parabolické kolektory pro získání energie. Instalovaný výkon je 250 MW, což odpovídá kapacitě 12 solných zásobníků (6 horkých, 6

studených) ve kterých se akumuluje energie pro pokrytí noční spotřeby. Teplota zásobníků je okolo 400 °C a energie přetrvává 6h, než se zásobník vybije. [42]

Extersol 1, 2 a 3:

Tři solární elektrárny blízko sebe, využívající parabolické kolektory, každá o výkonu 50 MW, s vlastním solným tepelným zásobníkem o stejné kapacitě. Zásobník dokáže dodávat energii po 7,5 h, teplota horkého zásobníku je cca 400 °C. [43]



Obrázek 28: Pohled na solné zásobníky [44]

Crescent Dunes:

Jedna z prvních 5 solárních elektráren, ve spojených státech, využívající odraz slunečních paprsků na věž, využívajících tepelné zásobníky s roztavenou solí. Tato elektrárna se potýkala s několika problémy, jedním z nich bylo protékání solného zásobníku do okolí. V současnosti má elektrárna instalovaný výkon 110 MW. Tato elektrárna ukládá svoji energii rovnou do solných zásobníků, které jsou pak použity k ohřevu a odpaření vody na páru pro výrobu elektrické energie. Zásobník se dokáže nahřát až na teplotu 565 °C, produkce energie ze zásobníku přetrvává po 10 h. [45] [47]



Obrázek 29: Elektrárna Crescent Dunes [46]

Bokpoort:

50 MW solární elektrárna s parabolickými solárními kolektory v Jižní Africe. Jako ostatní skladuje svoji energii do zásobníků využívajících roztavenou sůl. Tato elektrárna má největší zásobník na teplo ze všech CSP elektráren v Jižní Africe, kapacita tohoto zásobníku činí 1300 MWh a dokáže dodávat energii po dobu 9,3 h. [48]

KaXu Solar One:

Další solární elektrárna o instalovaném výkonu 100 MW, se solnými zásobníky o stejné kapacitě, které dokáží dodávat elektrickou energii po dobu 2,5 hodin. [49]

Khi Solar One:

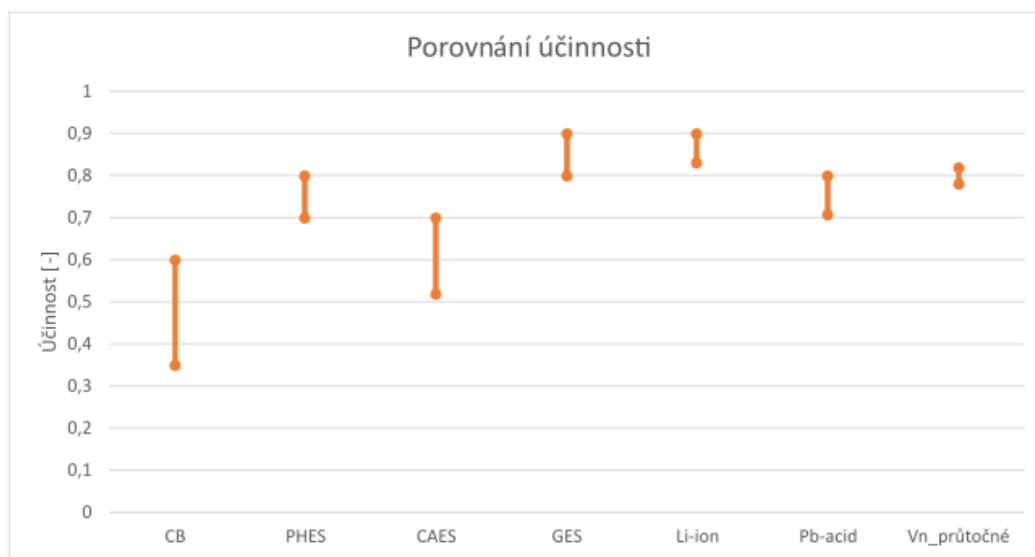
Kapacita zásobníků této solární elektrárny je 50 MW a jsou naplánované, aby dodávali teplo potřebné pro výrobu elektrické energie po dobu 2h. [50]

3 Vzájemné srovnání technologií

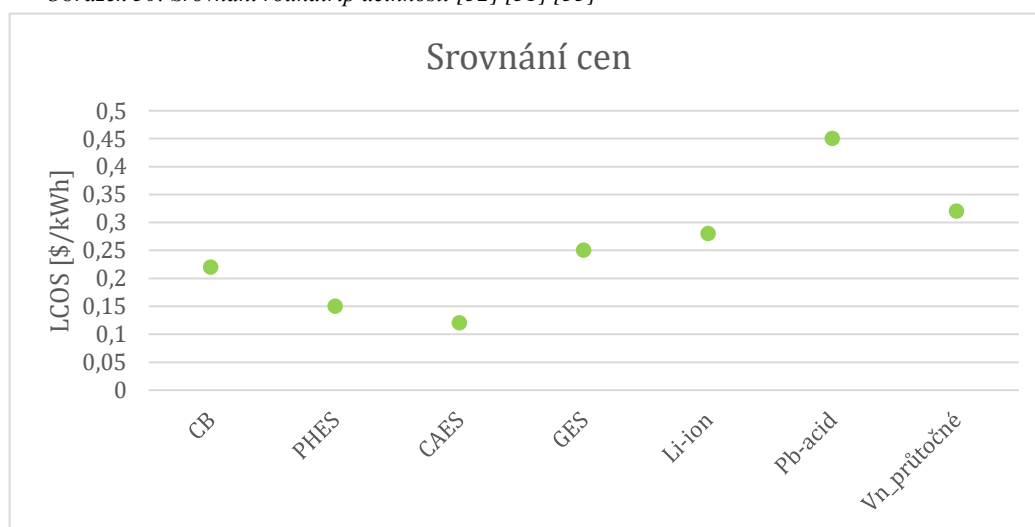
Jelikož je CB zatím postavěno velice málo (u technologie PTES s konverzí na elektřinu jen demonstrační projekty), tak se data ohledně účinností a výsledných cen (v měna/Wh) velice liší, protože většina z nich pochází z výpočetních modelů od různých skupin, které používali různé stupně idealizace průběhů, na hodnotách se také odráží použití různých technologií pro nabíjení, vybíjení a skladování energie. Proto je možné, že některá data v této kapitole, týkající se CB budou ve velkém rozsahu. Ceny baterií se liší v závislosti na velikosti úložiště, respektive měrná cena vztažená na kWh je u větších akumulacích zařízení ve finále menší, než u zařízení s menší instalovanou kapacitou. Proto se budu snažit srovnávat technologie, jejichž cena je odhadována na stejný výkon.

3.1 Srovnání technologie termálních CB s ostatními akumulátory elektrické energie

Srovnání s ostatními technologiemi na akumulaci proběhne z hlediska účinnosti, ceny a životnosti technologie.

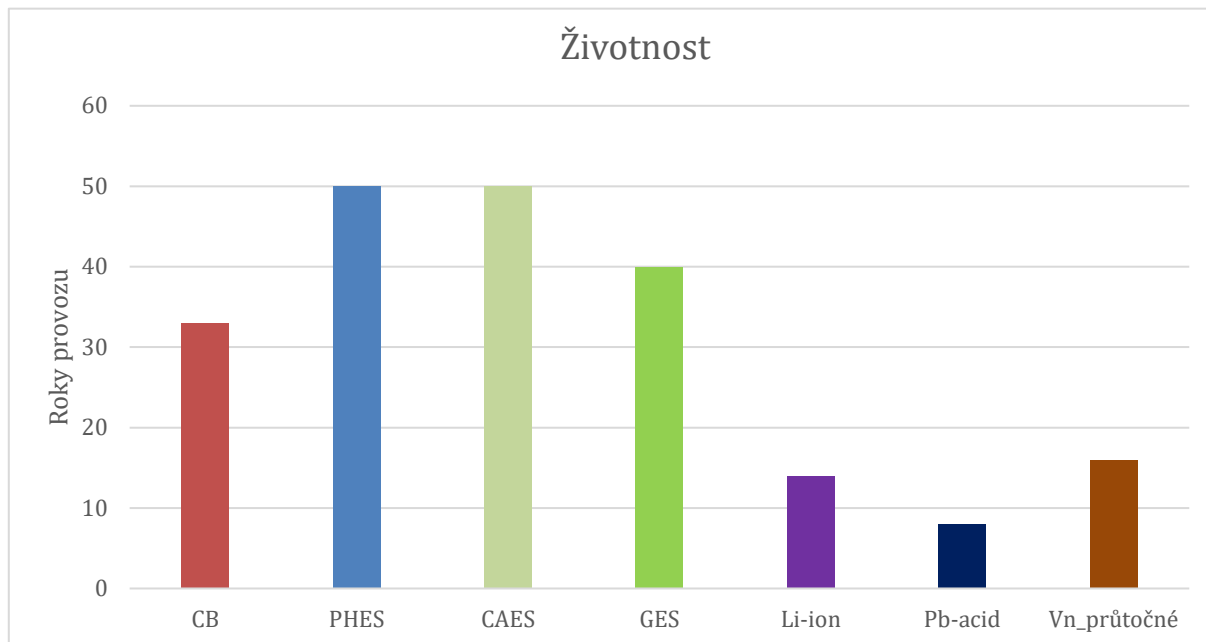


Obrázek 30: Srovnání roundtrip účinností [52] [51] [53]



Obrázek 31: Průměrné ceny různých technologií [51]

Graf ceny technologií zobrazuje průměrné ceny LCOS, což jsou ceny elektřiny, za které musí zařízení dodávat do sítě, aby se po dobu své životnosti splatilo.



Obrázek 32: Graf životnosti technologií [51]

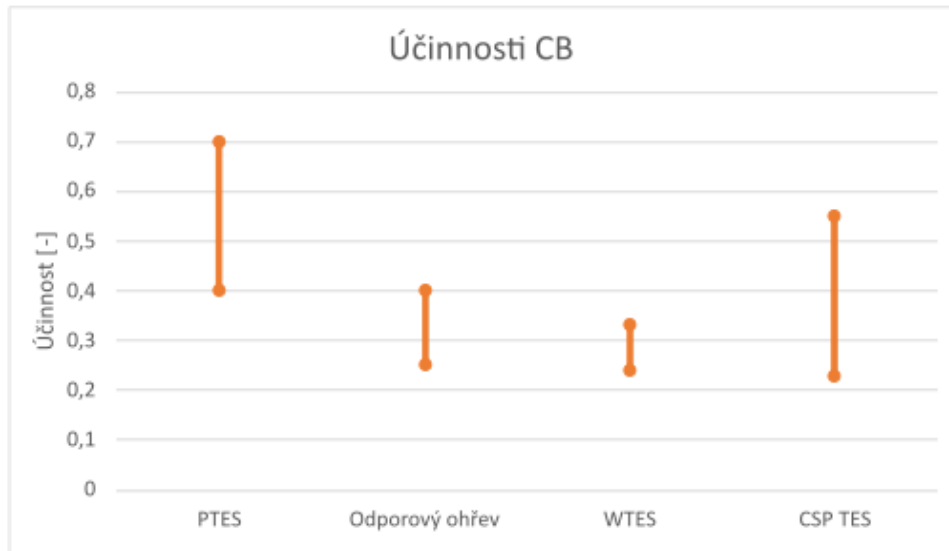
Srovnání všech technologií proběhlo pro instalovaný výkon 100 MW s dobou vybíjení 24 h.

3.2 Přehled účinností a pořizovacích cen různých technologií CB

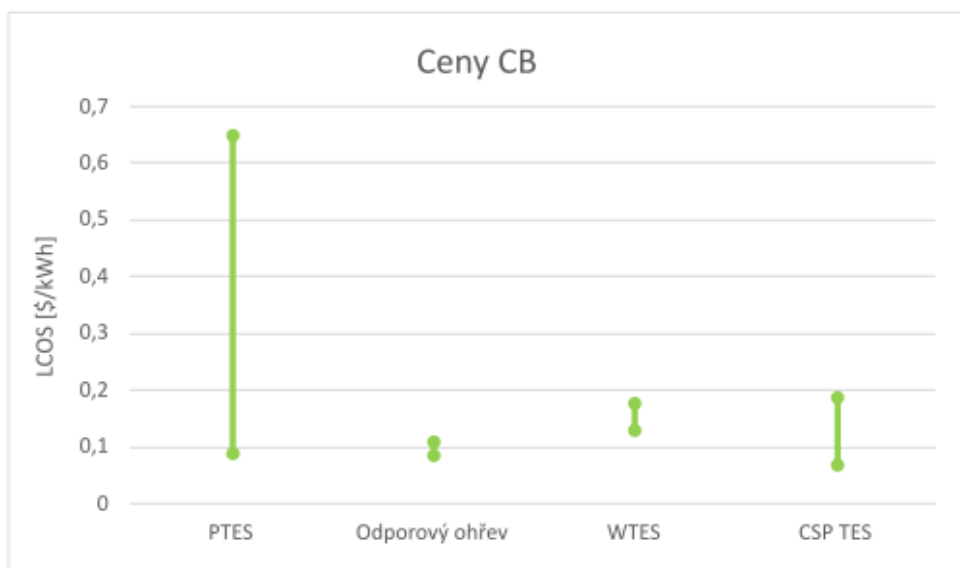
Zde bude srovnání různých typů technologií CB přes nabíjecí a vybíjecí cykly, po účinnosti, ceny a životnosti jednotlivých akumulčních nádrží.

3.2.1 Srovnání různých typů termálních CB

První graf srovnává účinnosti jednotlivých cyklů, u technologie PTES se nachází velký rozptyl, jak u účinnosti, tak u cen celých technologií. Rozptyl je způsoben rozmanitostí technologie, například jen nabíjecích cyklů je několik od Braytonova po nadkritický Rankinův. Typ PTES bývá dražší oproti ostatním z důvodu větší technické složitosti, je v nich potřeba složitějších zařízení jako jsou turbíny a kompresory, občas i s reverzním chodem, většinou je zapotřebí dvou tepelných nádrží, čímž cena taky naroste. Ostatní typy jako například CPS TES jsou integrovány v posavené solární věži, takže finální cena reflektuje jen termální úložiště s vybíjecím rankinovým cyklem. Rozdíly v účinnosti mohou způsobovat různé vybíjecí cykly nebo případ, kdy se tepelné baterie kvůli nedostatku tepelného záření nanabíjí na požadovanou teplotu. Cena elektřiny WTES je určena pro podobné podmínky. Ceny jednotlivých technologií jsou srovnány znovu pomocí LCOS. U odporového ohřevu je velice nízká cena, protože se uvažuje o integraci do existujících uhelných elektráren, takže investiční náklady spočívají jen ve zbudování tepelného úložiště s rozvody do existujícího parního bloku.



Obrázek 33: Účinnosti CB [54] [56] [58] [11]



Obrázek 34: Ceny CB [54] [55] [56] [57] [11]

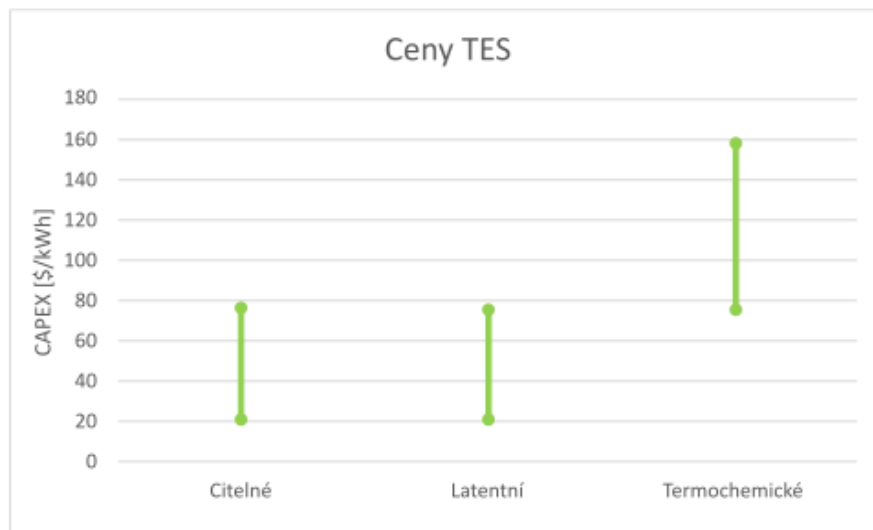
3.2.2 Srovnání tepelných nádrží

Rozdíl v účinnosti u tepelných nádrží je markantní u termochemických typů, jelikož velice záleží na volbě materiálu, kterou pro reakci použijeme, tak i volba reaktorů ve kterých absorpce či desorpce materiálu. Toto se odráží i na cenách a životnosti tohoto typu tepelné nádrže. Účinnosti u ostatních dvou typů tepelných akumulacích zásobníků je stejný a nachází se nad 90 %. Konverze elektřiny na teplo je téměř 100 % a ostatní účinnost snižuje jen přestup tepla do zásobníku samotného, tyto mechanismy jsou ale dobře zvládnuty.



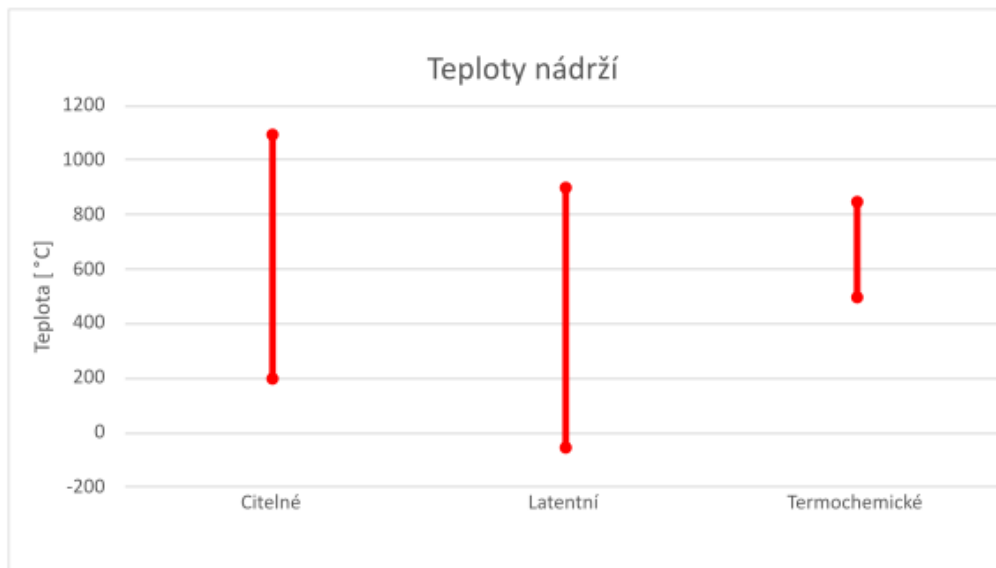
Obrázek 35: Účinnosti TES [59] [63]

Co se týče cen, tak citelné zásobníky bývají z velice levných materiálů, proto se jejich cena většinou pohybuje okolo 20 \$/kWh, jejich cena se může znatelně vyšplhat s použitím dražších materiálů s vyšší hustotou energie, teplota citelných zásobníků používajících pevné látky může být i přes 1000 °C, zatímco u kapalných se tato hodnota pohybuje okolo 600 °C. Latentní zásobníky tepla bývají dražší a vyšplhají se až nad 50 \$/kWh, použití se spíše nachází jako studené zásobníky pro PTES, kdy teplota dosahuje záporných hodnot, tam by se využilo přeměny kapalně-pevné skupenství na uložení chladu, který by se mohl využívat jak v průmyslu, tak pro klimatizaci civilních objektů.



Obrázek 36: Ceny TES [59]

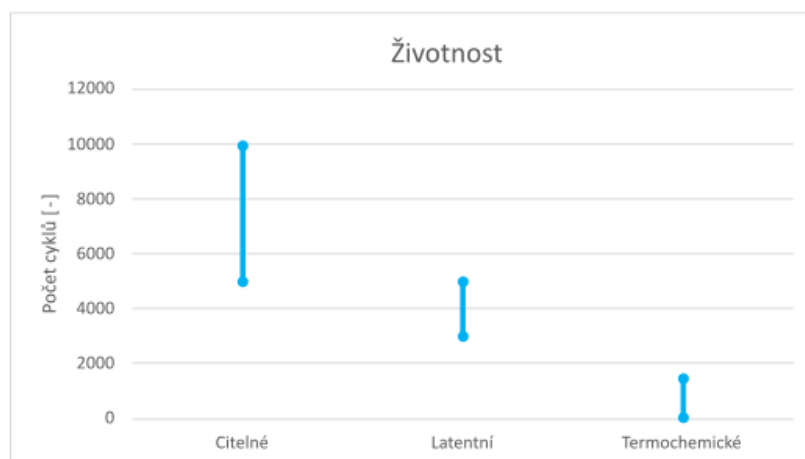
Cena CAPEX reflektuje celkovou kapitálovou investici do vybudování zařízení i s instalací a se všemi periferiemi.



Obrázek 37: Naakumulované teploty TES [60] [61] [1] [62]

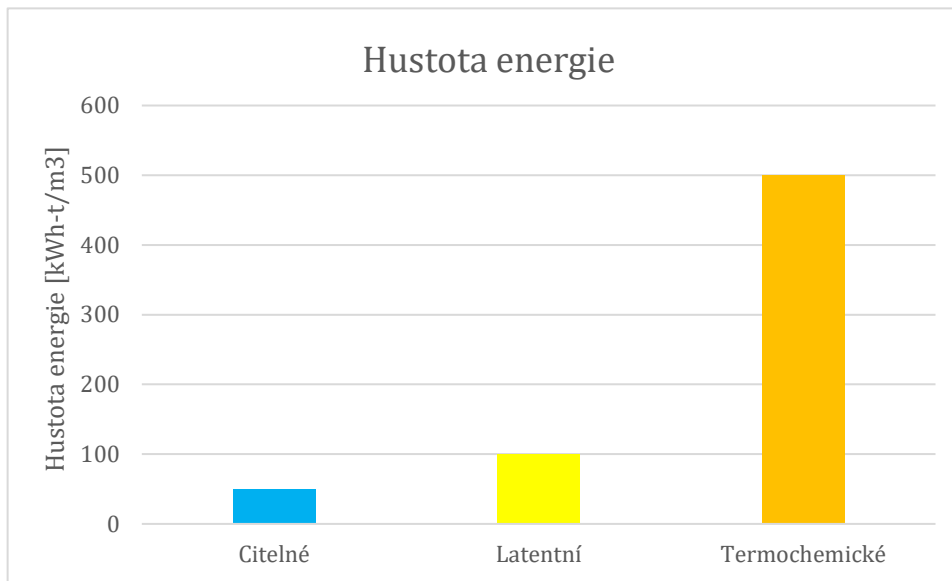
Teplota termochemických nádrží po nabití se drží na teplotě okolí do té doby, než začne probíhat vybíjecí reakce, při které se uvolňuje teplo. Uvolněné teplo může odcházet ve formě přehřáté páry nebo ohřátého vzduchu, vysoké teploty (až k 1000 °C) probíhají při reakcích oxidů kovů. Naakumulované teplo v termochemických bateriích se tudíž nikam neztratí, může vydržet čistě teoreticky nekonečně dlouho, dokud nepřidáme materiál potřebný pro reakci na uvolnění tepla. V citelných a latentních nádržích je teplo skladováno, při určitém teplotním gradientu oproti okolí, tím pádem probíhá tepelná ztráta do okolí, která bývá řádově v rámci desetin % za den. Proto je tyto nádrže nutno důkladně izolovat, na rozdíl od termochemických baterií se v těchto nádržích vyplatí držet akumulované teplo maximálně v rámci dnů, spíše hodin.

Co s týče životností, tak jsou na tom termochemické baterie v porovnání s ostatními typy nejhůře, při reakcích dochází ke slevování krystalků materiálu a tím se snižuje maximální kapacita celého zásobníku poměrně drasticky, v horších případech takovýto zásobník vydrží jen malé desítky cyklů. Společnost SaltX díky svému řešení nanopokrývání materiálu tvrdí, že se počet cyklů zvedl řádově až na tisíce.



Obrázek 38: Životnosti TES [59]

Na rozdíl od životnosti, vychází termochemické zásobníky z pohledu energetické hustoty mnohem lépe než latentní a citelné, zatímco ostatní typy mají kolem 100 a 50 kWh-t/m³, termochemický zásobník může dosáhnout mnohonásobně vyšších hodnot, jelikož se v chemických reakcích dá uschovat mnohem více energie, bude velikost zásobníku oproti ostatním při stejné kapacitě mnohem menší, záleží jestli tento faktor zvítězí nad vysokou cenou zásobníku.



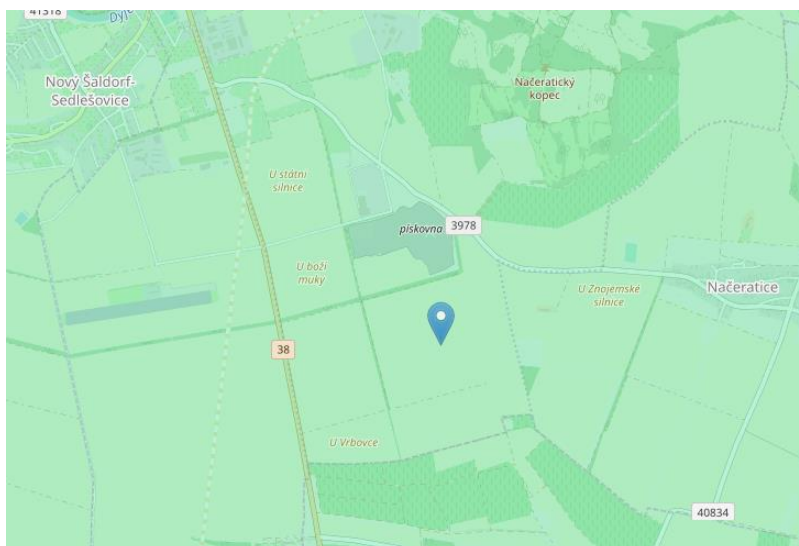
Obrázek 39: Hustoty energie TES [60] [61]

4 Bilanční návrh tepelné baterie

Navrhovaná baterie bude napájena z pole fototermických parabolických kolektorů. Teplonosná látka v kolektorech je termální olej Therminol VP-1, která po odebrání tepla z kolektorů je skladována v tepelném zásobníku. Kapacita zásobníku pro výpočet byla zvolena 1 MWh-t. Cyklus pro získání elektrické energie je ORC. Pro výpočet byla zvolena řada předpokladů, jmenovitě žádná tepelná ani tlaková ztráta ve výměníku baterie-ORC. Předpoklad pro tepelnou baterii je, že má ztrátu pouze prostupem stěn do okolí.

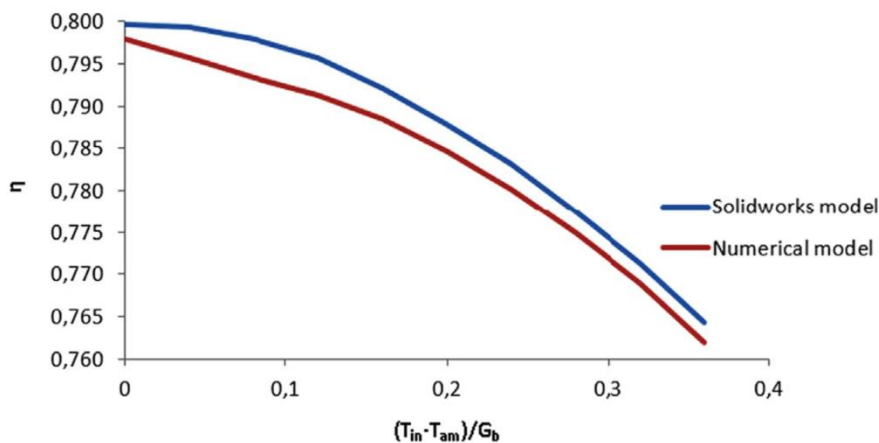
4.1 Určení lokality, dopadající energie a účinnosti kolektorů

Lokalita byla vybrána na území ČR. V nástroji PVGIS jsem vybral místo na Znojemsku, kvůli lepším podmínkám pro solární kolektory, jelikož na tomto území bývají největší hodnoty dopadající energie ze slunečního záření. Hodnota energie je průměrná hodnota za letní měsíce, záření dopadajícího pod úhlem 45°, orientací na jih.



Obrázek 40: Lokalita pro solární pole [65]

Co se týče účinnosti, tak byla vyčtena z grafu účinnosti v závislosti na teplotním spádu a dopadající energii, který byl publikován ve výzkumu termálních a optických vlastností parabolických kolektorů. Teplotní spád byl zvolen na 30 °C.



Obrázek 41: Graf účinnosti parabolických kolektorů [64]

4.1.1 Parametry solárního pole

Pro určení některých parametrů v této kapitole je třeba znát vlastnosti termálního oleje, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Termální olej:	
t_w [°C]	140
Kin. viskozita [m^2/s]	6,65E-07
Hustota [kg/m^3]	965
c_p [$J/kg \cdot K$]	1886
Tepelná vodivost [$W/m^2 \cdot K$]	0,1225

Tabulka 2: Parametry oleje Therminol VP-1 [66]

Dále byl zvolen výkon, který bude odbírán z kolektorů a předáván do termální baterie, díky tomu je možné určit minimální plochu, kterou musí pokrýt zrcadla kolektorů, aby dosáhla daného výkonu podle rovnice

$$P = S_{min} \cdot \eta \cdot G_m \rightarrow S_{min} = \frac{P}{\eta \cdot G_m} = \frac{125000}{0,795 \cdot 322,3} = 487,85 \text{ m}^2. \quad (4.1)$$

Následuje výpočet minimálního průtoku teplonosné látky kolektorem z kalorimetrické rovnice

$$P = \dot{m}_s \cdot c_p \cdot \Delta t \rightarrow \dot{m}_s = \frac{P}{c_p \cdot \Delta t} = \frac{125000}{1886 \cdot 30} = 2,21 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (4.2)$$

Poté můžeme hmotnostní průtok přepočítat na objemový v l/s

$$\dot{Q}_s = \frac{\dot{m}_s}{\rho} \cdot 1000 = \frac{2,21}{965} \cdot 1000 = 2,29 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (4.3)$$

Díky těmto výpočtům získáváme základní parametry solárního pole.

Solární pole:	
Dopadající energie [W/m^2]	322,3
Účinnost kolektoru [-]	0,795
P [kW-t]	125
Q [l/s]	2,29
S_{min} [m^2]	487,85

Tabulka 3: Parametry solárního pole [65] [64]

4.2 Základní rozměry tepelného zásobníku a výpočet jeho tepelné ztráty

4.2.1 Výpočet rozměrů

Důležitý parametr pro výpočet rozměrů tepelné baterie je jeho objem, ten lze vypočítat díky zvolení finální kapacity zásobníku (1 MWh-t). Jelikož výkon solárního pole je 125 kW-t, můžeme vypočítat čas, za který se nabije tepelná baterie. Výpočet pro dobu nabíjení je následující

$$T_n = \frac{P_{ak}}{P} = \frac{1000000}{125000} = 8 \text{ h}. \quad (4.4)$$

Z tohoto dopočteme objem tepleného zásobníku

$$V = \frac{\dot{Q}_s \cdot T_n \cdot 3600}{1000} = \frac{2,29 \cdot 8 \cdot 3600}{1000} = 65,93 \text{ m}^3. \quad (4.5)$$

Po vypočtení objemu se pro dopočet dalších parametrů, jako je třeba délka nebo vnější průměr, musí zvolit řada hodnot. Mezi zvolenými parametry je vnitřní průměr, tloušťka izolace, tloušťka válce, který drží kapalinu s naakumulovaným teplem a plechu, sloužící k udržení izolace na zásobníku. Dopočet délky je dle vzorce

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L \rightarrow L = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 65,93}{\pi \cdot 3,25^2} = 7,95 \text{ m}. \quad (4.6)$$

A výpočet vnějšího průměru dle

$$D = d + 2 \cdot (\delta_v + \delta_i + \delta_p) = 3,25 + 2 \cdot (0,02 + 0,4 + 0,002) = 4,09 \text{ m}. \quad (4.7)$$

Po výpočtech jsme tedy získali rozměry tepelného zásobníku.

Rozměry TZ:	
V [m ³]	65,93
d [m]	3,25
Tloušťka vnitřního válce [m]	0,02
Tloušťka izolace [m]	0,4
Tloušťka plechu [m]	0,002
L [m]	7,95
D [m]	4,09

Tabulka 4: Rozměry TZ

4.2.2 Tepelná ztráta

Pro výpočet tepelné ztráty je nutno určit tepelné odpory stěn nádoby, ta byla počítána jako válcová stěna s výjimkou boků zásobníku, které byly počítány jako rovinné. Pro učení tepelného odporu je třeba znát tepelné vodivosti materiálů.

Tepelné vodivosti materiálů [W/m*K]:	
Ocel	26
Pozink	54
Izolace	0,039

Tabulka 5: Tepelné vodivosti materiálů [68] [69] [70]

Výpočet tepelného odporu trupu zásobníku proběhl tedy

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_o} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_i} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_p} \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot \alpha_o} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 26} \cdot \ln\left(\frac{1,645}{1,625}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,039} \cdot \ln\left(\frac{2,045}{1,645}\right) + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 54} \cdot \ln\left(\frac{2,047}{2,045}\right) +$$

$$+ \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2,047 \cdot 15} = 0,8935 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}. \quad (4.8)$$

Pro výpočet tepelného odporu boků byl použit tento vzorec

$$R_2 = \frac{\delta_v}{\lambda_o} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{1}{\alpha_o} = \frac{0,02}{26} + \frac{0,4}{0,0039} + \frac{0,002}{54} + \frac{1}{15} = 10,32 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}. \quad (4.9)$$

Po určení tepelných odporů jsou dostupné všechny parametry pro výpočet tepelné ztráty. Plocha boků nádrže byla počítána jako plocha podstavy válce.

Ostatní parametry potřebné pro výpočet ztráty:	
Součinitel prostupu tepla do okolí [W/m ² *K]	15
Teplota okolí [°C]	25
R ₁ [m*K/W]	0,8935
R ₂ [m ² *K/W]	10,32
S _{boků} [m ²]	26,33
r ₁ [m]	1,625
r ₂ [m]	1,645
r ₃ [m]	2,045
r ₄ [m]	2,047

Tabulka 6: Hodnoty pro dopočet tepelné ztráty

Samotná tepelná ztráta se určí podle vzorce (teplota T_h, která odpovídá horní teplotě zásobníku, byla vybrána podle ORC v následující kapitole)

$$P_z = \frac{L \cdot \Delta t}{R_1} + \frac{S_{boků} \cdot \Delta t}{R_2} = \frac{7,95 \cdot (132 - 25)}{0,8935} + \frac{26,33 \cdot (132 - 25)}{10,32} = 1225 \text{ W}. \quad (4.10)$$

4.3 Parametry ORC

Jako vybíjecí cyklus byl vybrán ORC modul s výkonem 75kW.

Parametry ORC:			
Termální input:		Výkon:	
t [°C]	132	P [kW-e]	75
P [kW-t]	300		
Q [l/s]	5,49		

Tabulka 7: Parametry ORC [67]

Objemový tok teplonosné látky potřebný pro dodání tepla do ORC cyklu jsme vypočetli za pomoci kalorimetrické rovnice, konkrétně

$$P_{ORC} = \dot{m}_{ORC} \cdot c_p \cdot \Delta t \rightarrow \dot{m}_{ORC} = \frac{P_{ORC}}{c_p \cdot \Delta t} \rightarrow \dot{Q}_{ORC} = \frac{\dot{m}_{ORC}}{\rho} \cdot 1000 =$$

$$= \frac{5,3}{965} \cdot 1000 = 5,49 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (4.11)$$

4.4 Výsledné parametry tepelného zásobníku

Po vypočtení tepelné ztráty a potřebného toku můžeme dopočítat dobu vybíjení

$$T_v = \frac{V}{\dot{Q}_{ORC}} = \frac{65934}{5,49} = 3,33 \text{ h}. \quad (4.12)$$

A procentuální tepelnou ztrátu za den

$$\text{Ztráta} = \frac{P_z \cdot 24}{P_{ak} \cdot 1000} \cdot 100 = \frac{1225 \cdot 24}{1000 \cdot 1000} \cdot 100 = 2,94 \text{ \%/den}. \quad (4.13)$$

Po těchto krocích jsou známy všechny parametry tepelného zásobníku.

Termální zásobník:	
Kapacita [kWh-t]	1000
t_h [°C]	132
t_c [°C]	102
V [l]	65934
Doba nabíjení [h]	8
Doba vybíjení [h]	3,33
Tepelná ztráta [%/den]	2,94

Tabulka 8: Výsledné parametry TZ

4.5 Vyrobená energie a účinnost cyklu

Jako poslední je určen výkon dodaný ORC za jeden cyklus

$$P_e = P_{ORC} \cdot T_v = 75 \cdot 3,33 = 250 \text{ kWh}. \quad (4.14)$$

Společně s účinností celého cyklu

$$\eta_c = \eta_k \cdot \eta_{ORC} = 0,795 \cdot \frac{P_e}{P_{ak}} = 0,795 \cdot \frac{250}{1000} = 0,2. \quad (4.15)$$

Závěr

Carnotovy baterie jsou zajímavé řešení na otázku velkých akumulčních jednotek energie s obrovskou kapacitou a výdrží po dlouhé časové intervaly, jen se na zlepšení jejich technologií musí vyvinout ještě mnoho snahy. Tepelné baterie s konverzí na elektřinu disponují velikou kapacitou, s použitím termochemických zásobníků tepla navíc odpadá i tepelná ztráta, takže na rozdíl od citelných a latentních zásobníků, které ztrácejí kolem 5% své naakumulované energie za den, můžeme skladovat energii po teoreticky neomezeně dlouhou dobu, ale jejich schopnost přeměny naakumulovaného tepla na elektřinu mají oproti ostatním technologiím (např. přečerpávací elektrárny, bateriová úložiště) malou účinnost přeměny a to max. 50 % (u baterií je to spíše nad 80%). Jednou z jejich velkých výhod je nezávislost na okolním prostředí a relativní prostorová nenáročnost, na rozdíl od přečerpávacích elektráren tento způsob akumulace energie nevyžaduje náročný zásah do krajiny, takže mohou být vystaveny všude, navíc nabízí využití uzavřených uhelných elektráren, pomocí několika úprav by se tento objekt mohl přestavět na akumulční zařízení, které využívá původní infrastrukturu. Technologie PTES slibuje vysoké účinnosti až k 70%, ale zatím žádné demonstrační zařízení této účinnosti nedosahuje ani zdaleka, takže je třeba na čem pracovat, zejména na technologii turbín a kompresorů, které výrazně ovlivňují účinnosti tohoto typu technologie. Velkou výhodou PTES je, že mohou sloužit i k dodávce chladu, díky tomu že při použití této technologie s Braytonovým oběhem vzniká velké podchlazení studeného zásobníku, které dosahuje až záporné desítky °C, jejich další nevýhoda je ale velká cena za vystavění, což by se s rozvojem technologií mohlo zlepšit. Nejvíce využití tato technologie nachází ve fototermických elektrárnách, kde pomáhá zajistit dodávku elektřiny v době, kdy by to bez této pomocné technologie nebylo možné. Vystavění této baterie nám sice zvedne náklady na fototermickou elektrárnu, ale u elektráren vyšších výkonů se tato cena rozhodně zaplatí z dodávek pozdě do noci. Tepelné baterie společně s fototermickými elektrárnami neumožňují stahování špiček a ve výrobě elektrické energie a jejich následnou akumulaci, na rozdíl od ostatních typů. V současném stavu se tyto baterie spíše hodí k ukládání a následné dodávce pouze tepelné energie do průmyslu, či na vytápění obytných zón. Tímto můžeme ulevit síti v případě velkého přebytku energie a uschovat teplo na dobu, kdy ho bude potřeba využít.

Výpočet se zabýval jednoduchým návrhem tepelné baterie, která by se nabíjela pomocí fototermických kolektorů na území ČR. Kapacita 1MWh-t byla zvolena kvůli ztrátám (u menších zásobníků by byla ztráta moc velká a jejich stavba v této aplikaci by neměla smysl). Abychom dosáhli přijatelné nabíjecí doby, musela by plocha panelů zabírat 500 m², při této ploše se zásobník bude nabíjet 8h. Při těchto parametrech a zvoleném ORC, které se zvolilo z několika důvodů, jmenovitě: parabolické kolektory by ve zdejších podmínkách nemohli dodat takovou energii a teplotu média na to, aby klasický parní cyklus mohl pracovat v rámci rozumné účinnosti a kvůli tomu že ORC se prodává po modulech, které mají určené vstupní parametry a výstupní výkon, což usnadňuje výpočet, je dodávaná energie ze zařízení pouhých 250kWh-e za dobu 3h, přičemž účinnost celého cyklu je pouze 20%. Tepelná ztráta byla přijatelná a to 3% celkové akumulované energie za den. Bateriové úložiště, které by skladovalo stejný elektrický výkon, by zabralo mnohonásobně menší prostor a účinnost celého cyklu nabití a vybití by byla nad 90%. Všechny parametry byly počítány v rámci letních měsíců, v zimě by tato baterie s největší pravděpodobností nefungovala vůbec. Tento výpočet byl spíše demonstrační, tento typ tepelné baterie by v našich podmínkách nemohl být provozován z důvodu nízké hodnoty energie dopadajícího slunečního záření na m².

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PAUL, Alexej, Felix HOLY, Michel TEXTOR a Stefan LECHNER. High temperature sensible thermal energy storage as a crucial element of Carnot Batteries: Overall classification and technical review based on parameters and key figures. *Journal of energy storage* [online]. Elsevier, 2022, **56**, 106015 [cit. 2024-05-08]. ISSN 2352-152X. Dostupné z: doi:2022.106015
- [2] SCHUMACHER, Maximilian. ETES: Electric Thermal Energy Storage. In: <https://www.strommarkttreffen.org/english/> [online]. 2019 [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbfmadadm/https://www.strommarkttreffen.org/2019-05-10_Schumacher_ETES-Electric_Thermal_Energy_Storage.pdf
- [3] BAŠTA, Vít, Jan ŠPALE, Miroslav RATHAN, Martin HOFMAN, Michal KASAN, Václav NOVOTNÝ a František HRDLIČKA. Skladování elektřiny prostřednictvím tepla aneb Carnotovy baterie 2. díl – projekty a technologie ve světě a v ČR. *Tzbinfo* [online]. c2001-2024, 21.1.2021 [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elekriny/21727-skladovani-elekriny-prostrednictvim-tepla-aneb-carnotovy-baterie-2-dil-projekty-a-technologie-ve-svete-a-v-cr>
- [4] SALAVEC, Jiří. Siemens zprovoznil první elektrotermální úložiště energie, pojme 130 MWh. In: OM SOLUTIONS S.R.O. *OENERGETICE.cz* [online]. 2019, c2016 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/siemens-zprovoznil-prvni-elektrotermalni-uloziste-energie-pojme-130-mwh>
- [5] ALBERT, Max, Zhiwei MA, Huashan BAO a Anthony Paul ROSKILLY. Operation and performance of Brayton Pumped Thermal Energy Storage with additional latent storage. *Applied energy* [online]. Elsevier, 2022, **312**, 118700 [cit. 2024-05-08]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2022.118700
- [6] FRATE, Guido Francesco, Lorenzo FERRARI a Umberto DESIDERI. Techno-Economic Comparison of Brayton Pumped Thermal Electricity Storage (PTES) Systems Based on Solid and Liquid Sensible Heat Storage. *Energies (Basel)* [online]. Basel: MDPI, 2022, **15**(24), 9595 [cit. 2024-05-08]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15249595
- [7] RABI, Ayah Marwan, Jovana RADULOVIC a James M. BUICK. Pumped Thermal Energy Storage Technology (PTES): Review. *Thermo* [online]. MDPI, 2023, **3**(3), 396-411 [cit. 2024-05-08]. ISSN 2673-7264. Dostupné z: doi:10.3390/thermo3030024
- [8] NADALON, Emanuele, Ronelly DE SOUZA, Melchiorre CASISI a Mauro REINI. Part-Load Energy Performance Assessment of a Pumped Thermal Energy Storage System for an Energy Community. *Energies (Basel)* [online]. Basel: MDPI, 2023, **16**(15), 5720 [cit. 2024-05-08]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en16155720
- [9] AYACHI, Fadhel, Nicolas TAUVERON, Thomas TARTIÈRE, Stéphane COLASSON a Denis NGUYEN. Thermo-Electric Energy Storage involving CO₂ transcritical cycles and ground heat storage. *Applied thermal engineering* [online]. Elsevier, 2016, **108**, 1418-1428 [cit. 2024-05-08]. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.07.063
- [10] LINARES, José Ignacio, Arturo MARTÍN-COLINO, Eva ARENAS, María José MONTES, Alexis CANTIZANO a José Rubén PÉREZ-DOMÍNGUEZ. Carnot Battery Based on Brayton Supercritical CO₂ Thermal Machines Using Concentrated Solar Thermal Energy as a Low-Temperature Source. *Energies (Basel)* [online]. Basel:

- MDPI, 2023, **16**(9), 3871 [cit. 2024-05-08]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en16093871
- [11] OKAZAKI, Toru, Yasuyuki SHIRAI a Taketsune NAKAMURA. Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage. *Renewable Energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2015, **83**, 332-338 [cit. 2024-05-08]. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2015.04.027
- [12] YAMAMOTO, Kenjiro, Kazuhiro DOMOTO, Makoto TOBO, Tsutomu KAWAMIZU, Takahiro YAMANA a Yuji OTA. Thermal Storage System to Provide Highly-efficient Electric Power Resilience in the Era of Renewable Energy. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review* [online]. 2020, **57**(1), 11 [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbfmadadm/https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e571/e571040.pdf
- [13] KOÇAK, Burcu a Halime PAKSOY. Sensible Thermal Energy Storage in Packed Bed for Industrial Solar Applications. *EuroSun* [online]. 2018, 7 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: doi:10.18086/eurosun2018.13.06
- [14] SOPRANI, Stefano, Fabrizio MARONGIU, Ludvig CHRISTENSEN, Ole ALM, Kenni Dinesen PETERSEN, Thomas ULRICH a Kurt ENGELBRECHT. Design and testing of a horizontal rock bed for high temperature thermal energy storage. *Applied energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2019, **251**, 113345 [cit. 2024-05-10]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2019.113345
- [15] WANG, Ruzhu a Tianshu GE. In: *Advances in Solar Heating and Cooling*. Woodhead Publishing, 2016, s. 428. ISBN 978-0-08-100301-5.
- [16] GYUK, Dr. Imre et al. U.S. DOE Energy Storage Handbook. In: BYRNE, Dr. Ray. *Sandia National Laboratories DOE Office of Electricity Energy Storage Program* [online]. c2021 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.sandia.gov/ess/publications/doe-oe-resources/eshb>
- [17] JOUHARA, Hussam, Alina ŽABNIENSKA-GÓRA, Navid KHORDEHGAH, Darem AHMAD a Tom LIPINSKI. Latent thermal energy storage technologies and applications: A review. *International Journal of Thermofluids* [online]. Elsevier, 2020, **5-6**, 100039 [cit. 2024-05-10]. ISSN 2666-2027. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijft.2020.100039
- [18] TIAT, Vanessa Ho Kon a Elena Palomo del BARRIO. Recent Patents on Phase Change Materials and Systems for Latent Heat Thermal Energy Storage. *Recent Patents on Mechanical Engineering* [online]. 2011, **4**(1), 28 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: doi:10.2174/2212797611104010016
- [19] Thermochemical Energy Storage. MANGOLD, Dipl.-Ing. Dirk. *RESTORE* [online]. c2024 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.restore-dhc.eu/about-restore/thermochemical-energy-storage/>
- [20] SATTLER, Dr. Christian a Dr. Antje WÖRNER. Thermochemical Energy Storage: Overview on German, and European R&D Programs and the work carried out at the German Aerospace Center DLR. In: *ENERGY.GOV* [online]. 2013 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbfmadadm/https://www.energy.gov/eere/solar/articles/thermochemical-energy-storage
- [21] SIEMENS. Energy storage on the rise. *Siemens Gamesa Renewable Energy* [online]. c2024 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.siemensgamesa.com/explore/innovations/energy-storage-on-the-rise>

- [22] DEBOYSER, Bernard. Siemens Gamesa stocke l'énergie éolienne dans des roches volcaniques. BRAKSON. *Révolution Énergétique* [online]. c2024 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.revolution-energetique.com/siemens-gamesa-stocke-lenergie-eolienne-dans-des-roches-volcaniques/>
- [23] MAN ENERGY SOLUTIONS. A tale of fire and ice. *MAN energy solutions* [online]. c2024 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.man-es.com/discover/a-tale-of-fire-and-ice>
- [24] MAN ENERGY SOLUTIONS. MAN Energy Solutions to deliver first cross-sectoral ETES Heat-Pump system. *MAN energy solutions* [online]. c2024 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.man-es.com/company/press-releases/press-details/2021/02/04/man-energy-solutions-liefert-erstes-sektor-%C3%BCbergreifendes-etes-w%C3%A4rmepumpensystem>
- [25] FRAUGHTON, Christopher. Electro-Thermal Energy Storage: General Presentation. In: *MAN energy solutions* [online]. 2021 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbfmadadm/https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/21TMCES_Fraughton.pdf
- [26] MURRAY, Cameron. Nuclear power company Westinghouse to build 2GWh pumped heat storage in Bulgaria. In: SOLAR MEDIA LIMITED. *Energy Storage news* [online]. 2022 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.energy-storage.news/nuclear-power-company-westinghouse-to-build-2gwh-pumped-heat-storage-in-bulgaria/>
- [27] KORMAN, Nina. Westinghouse Alaska Energy Storage Project Tapped for DOE Program. In: ZACKIN PUBLICATIONS INC. *North american WINDPOWER* [online]. 2023 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://nawindpower.com/westinghouse-alaska-energy-storage-project-tapped-for-doe-program>
- [28] WESTINGHOUSE a ENERGY TASK FORCE. Energy Task Force / Pumped Thermal Energy Storage - Westinghouse. In: GOOGLE LLC. *Youtube* [online]. c2024 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=bnVGyZ8HzB4&t=1308s>
- [29] BELLINI, Emiliano. World's first utility-scale, rock-based storage facility goes online in Italy. In: PV MAGAZINE. *Pv magazine* [online]. 2022, July 3, 2023 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.pv-magazine.com/2022/11/11/worlds-first-utility-scale-rock-based-storage-facility-goes-online-in-italy/>
- [30] BRENMILLER ENERGY. Thermal Storage based Steam Generator. In: IRMEDIA. *Brenmiller* [online]. c2024 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbfmadadm/https://bren-energy.com/wp-content/uploads/2021/07/Electricity-to-heat.pdf
- [31] SURKES, Sue. Israeli green thermal storage company enters the Brazilian market. In: *THE TIMES OF ISRAEL* [online]. 11 August 2022 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.timesofisrael.com/israeli-green-thermal-storage-company-enters-the-brazilian-market/>
- [32] NASDAQ, INC. Fortlev and Brenmiller Energy Inaugurate the World's First Renewable Energy-Powered Thermal Energy Storage System for Plastic Manufacturing. In: NASDAQ, INC. *Nasdaq* [online]. AUG 9, 2022 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.nasdaq.com/press-release/fortlev-and-brenmiller-energy-inaugurate-the-worlds-first-renewable-energy-powered>
- [33] ENDEAVOR BUSINESS MEDIA. Heineken's Tempo Replacing Fossil Fuel Boilers with 32 MWh Thermal Energy Storage System. In: ENDEAVOR BUSINESS MEDIA, LLC. *EnergyTech* [online]. Oct. 13, 2023 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z:

- <https://www.energytech.com/energy-efficiency/article/21275469/heinekens-tempo-replacing-fossil-fuel-boilers-with-32-mwh-thermal-energy-storage-system>
- [34] KRAEMER, Susan. Morocco Pioneers PV with Thermal Storage at 800 MW Midelt CSP Project. In: SOLARPACES. *SolarPACES* [online]. April 25, 2020 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.solarpaces.org/morocco-pioneers-pv-to-thermal-storage-at-800-mw-midelt-csp-project/>
- [35] CSPPLAZA. Pre-Qualification Phase For The Noor Midelt II CSP-PV Project Launched In Morocco. In: CSPPLAZA. *CSPPLAZA* [online]. 2019, c2019 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://en.csplaza.com/pre-qualification-phase-for-the-noor-midelt-ii-csp-pv-project-launched-in-morocco>
- [36] IÑIGO-LABAIRU, Javier, Jürgen DERSCH a Luca SCHOMAKER. Integration of CSP and PV Power Plants: Investigations about Synergies by Close Coupling. *Energies (Basel)* [online]. Basel: MDPI, 2022, **15**(19), 7103 [cit. 2024-05-10]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15197103
- [37] COLTHORPE, Andy. SaltX aims to compete with pumped hydro's economics as 10MWh pilot launches. In: SOLAR MEDIA LIMITED. *Energy Storage news* [online]. April 15, 2019 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.energy-storage.news/saltx-aims-to-compete-with-pumped-hydros-economics-as-10mwh-pilot-launches/>
- [38] SALT X TECHNOLOGY. Final report for the pilot plant in Bollmora completed with good results. In: SALT X TECHNOLOGY. *SaltX Technology* [online]. c2024 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.saltxtechnology.com/cision/final-report-for-the-pilot-plant-in-bollmora-completed-with-good-results/>
- [39] SALT X TECHNOLOGY. SaltX Berlin pilot plant shows very promising results. In: SALT X TECHNOLOGY. *SaltX Technology* [online]. September 19, 2019 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.saltxtechnology.com/cision/saltx-berlin-pilot-plant-shows-very-promising-results/>
- [40] ACCIONA. Cerro Dominador CSP plant in Chile officially opens. In: ACCIONA. *ACCIONA* [online]. 9 OF JUNE, 2021 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: https://www.acciona.com/updates/news/cerro-dominador-csp-plant-chile-officially-opens/?_adin=11551547647
- [41] MCCUE, Dan. Abengoa and Acciona to build Cerro Dominador Solar Thermal Plant. In: HAYA COMUNICACIÓN, SL. *RENEWABLE ENERGY MAGAZINE* [online]. 01 August 2018n. 1., 10 May 2024 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: https://www.renewableenergymagazine.com/solar_thermal_electric/abengoa-and-acciona-to-build-cerro-dominador-20180801
- [42] INSTITUTE FOR ADVANCED SUSTAINABILITY STUDIES. Solana Generating Station CSP Project. In: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. *NREL* [online]. October 21, 2022 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://solarpaces.nrel.gov/project/solana-generating-station>
- [43] SOLARFEEDS MARKETPLACE. Biggest Solar Projects in Europe-by 2019. In: SOLARFEEDS MARKETPLACE. *SOLAR FEEDS* [online]. August 14, 2023 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.solarfeeds.com/mag/biggest-solar-projects-in-europe-by-2019/>
- [44] COBRA GRUPO. Extresol 1 & 2 & 3 Solar Thermal Power Plants. In: COBRA GRUPO. *Cobra GRUPO* [online]. 7 November, 2018 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.grupocobra.com/en/proyecto/extresol-1-2-3-solar-thermal-power-plants/>
- [45] INSTITUTE FOR ADVANCED SUSTAINABILITY STUDIES. Crescent Dunes Solar Energy Project CSP Project. In: NATIONAL RENEWABLE ENERGY

- LABORATORY. *NREL* [online]. October 25, 2023 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://solarpaces.nrel.gov/project/crescent-dunes-solar-energy-project>
- [46] SLGWV a PETER Z. Crescent Dunes Solar Energy Project. In: ATLAS OBSCURA. *Atlas Obscura* [online]. February 15, 2023 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.atlasobscura.com/places/crescent-dunes-solar-energy-project>
- [47] KRAEMER, Susan. Vast Solar's fix for tank leaks that stymied the first Tower CSP. In: SOLARPACES. *SolarPACES* [online]. April 04, 2023 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.solarpaces.org/vast-solar-has-a-fix-for-crescent-dunes-thermal-storage-tank-leak/>
- [48] BOOTH, Ingrid. Northern Cape solar project – a major step towards a renewable future. In: INVESTEC. *Investec* [online]. 26 January 2021n. 1. [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: https://www.investec.com/en_za/focus/innovation/bokpoort-a-major-step-towards-a-renewable-future.html
- [49] INSTITUTE FOR ADVANCED SUSTAINABILITY STUDIES. KaXu Solar One CSP Project. In: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. *NREL* [online]. October 26, 2023 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://solarpaces.nrel.gov/project/kaxu-solar-one>
- [50] INSTITUTE FOR ADVANCED SUSTAINABILITY STUDIES. Khi Solar One CSP Project. In: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. *NREL* [online]. October 26, 2023 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://solarpaces.nrel.gov/project/khi-solar-one>
- [51] VISWANATHAN, Vilayanur, Kendall MONGIRD, Ryan FRANKS, Xiaolin LI a Vincent SPRENKLE. 2022 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. *Energy Storage Grand Challenge Cost and Performance Assessment* [online]. Pacific Northwest National Laboratory, 2022, 174 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbdm/adm/https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/ESGC%20Cost%20Performance%20Report%202022%20PNNL-33283.pdf
- [52] AMEEN, Muhammad Tahir, Zhiwei MA, Andrew SMALLBONE, Rose NORMAN a Anthony Paul ROSKILLY. Demonstration system of pumped heat energy storage (PHES) and its round-trip efficiency. *Applied energy* [online]. Elsevier, 2023, **333**, 120580 [cit. 2024-05-14]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2022.120580
- [53] HRYTSIUK, Roman. Comparing Lithium-Ion, Thermal, and Hydrogen Energy Storage Technologies. In: SUN VALLEY ENERGY. *Sun Valley Energy* [online]. Apr 1, 2023 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.sunvalley.pl/post/comparing-lithium-ion-thermal-and-hydrogen-energy-storage-technologies>
- [54] ABARR, Miles, Brendan GEELS, Jean HERTZBERG a Lupita D. MONTOYA. Pumped thermal energy storage and bottoming system part A: Concept and model. *Energy (Oxford)* [online]. OXFORD: Elsevier, 2017, **120**, 320-331 [cit. 2024-05-14]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2016.11.089
- [55] MCTIGUE, Josh, Pau FARRÉS-ANTUNEZ a Alex WHITE. Pumped thermal energy storage: thermodynamics and economics. In: U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *ENERGY.GOV* [online]. November 17, 2019 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbdm/adm/https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/12/f81/SETO%20PTES%20Workshop%20McTigue_NREL.pdf

- [56] BASTA, Ales, Vit BASTA, Jan SPALE, Tomas DLOUHY a Vaclav NOVOTNY. Conversion of combined heat and power coal-fired plants to Carnot batteries - Prospective sites for early grid-scale applications. *Journal of energy storage* [online]. Elsevier, 2022, **55**, 105548 [cit. 2024-05-14]. ISSN 2352-152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2022.105548
- [57] HERNÁNDEZ, Catalina, Rodrigo BARRAZA, Alejandro SAEZ, Mercedes IBARRA a Danilo ESTAY. Potential map for the installation of concentrated solar power towers in Chile. *Energies (Basel)* [online]. Basel: MDPI, 2020, **13**(9), 2131 [cit. 2024-05-14]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13092131
- [58] PASCUAL, Sara, Pilar LISBONA a Luis M. ROMEO. Thermal Energy Storage in Concentrating Solar Power Plants: A Review of European and North American R&D Projects. *Energies (Basel)* [online]. MDPI, 2022, **15**(22), 8570 [cit. 2024-05-14]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15228570
- [59] HOOGLAND, Onne et al. Energy Storage Database and Use Case Matrix. In: EUROPEAN UNION. *European Commission* [online]. c1995-2024 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: https://energy.ec.europa.eu/document/download/0ad7146c-bd92-443c-beee-ca732d69ac5c_en?filename=Annex_2.1_Energy_Storage_Database_and_Use_Case_Matrix.xlsx
- [60] SOLAR IMPULSE FOUNDATION. SaltX EnerStore: Circular thermal energy storage system for peak shifting. In: SOLAR IMPULSE FOUNDATION. *Solar Impulse Foundation* [online]. c2024 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://solarimpulse.com/solutions-explorer/saltx-enerstore>
- [61] ANDRÉ, Laurie a Stéphane ABANADES. Recent Advances in Thermochemical Energy Storage via Solid–Gas Reversible Reactions at High Temperature. *Energies (Basel)* [online]. MDPI, 2020, **13**(22), 5859 [cit. 2024-05-14]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13225859
- [62] RAY, Alok Kumar, Dibakar RAKSHIT, K. RAVI KUMAR a Hal GURGENCI. A Comparative Study of High-Temperature Latent Heat Storage Systems. *Energies (Basel)* [online]. Basel: MDPI, 2021, **14**(21), 6886 [cit. 2024-05-14]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14216886
- [63] YAN, Ting, Hong ZHANG, Nan YU, Dong LI a Q.W. PAN. Performance of thermochemical adsorption heat storage system based on MnCl₂-NH₃ working pair. *Energy (Oxford)* [online]. Oxford: Elsevier, 2022, **239**, 122327 [cit. 2024-05-14]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2021.122327
- [64] TZIVANIDIS, C., E. BELLOS, D. KORRES, K.A. ANTONOPOULOS a G. MITSOPOULOS. Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector. *Case studies in thermal engineering* [online]. Elsevier, 2015, **6**(C), 226-237 [cit. 2024-05-14]. ISSN 2214-157X. Dostupné z: doi:10.1016/j.csite.2015.10.005
- [65] EUROPEAN UNION. PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. EUROPEAN UNION. *European Commission* [online]. c1995-2024, 01/03/2022 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
- [66] EASTMAN CHEMICAL COMPANY. THERMINOL® VP-1. In: EASTMAN CHEMICAL COMPANY. *THERMINOL* [online]. c2024 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: chrome-extension://oemmdcbldboiebfnladdacbfmadadm/https://www.therminol.com/sites/therminol/files/documents/TF09A_Therminol_VP1.pdf

- [67] ELECTRATHERM, INC. POWER MODULE75 Specification Sheet. In: ELECTRATHERM, INC. *ElectraTherm* [online]. 2022, c2021 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbfmadadm/https://electratherm.com/wp-content/uploads/2022/06/PM75-06-28-2022_Spec-Sheet.pdf
- [68] STAHLHANDEL GRÖDITZ GMBH. 1.4903 (X10CrMoVNb9-1) quenched and tempered directly from stock & cut to your required dimensions!. In: STAHLHANDEL GRÖDITZ GMBH. *Stahlhandel Gröditz GmbH* [online]. c2024 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.stahlportal.com/en/stock/14903-x10crmovnb9-1-quenched-and-tempered/>
- [69] PRODOMOS S.R.O. Minerální vata Climowool DF1. In: PRODOMOS S.R.O. *NonstopStavebniny* [online]. c2024 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: https://www.nonstopstavebniny.cz/mineralni-vata-climowool-df1-180-mm-039--baleni-5-04-m2/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw14yyBhAgEiwADSEjeAuiPPJDISwTWTSi2rYXVxbhD7UellhEnK6djLBKu_IxsjLLiqqrSRoC62MQAvD_BwE
- [70] EVEK GMBH. Ocelový pozinkovaný plech. In: EVEK GMBH. *Evek GmbH* [online]. c2008-2024 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: https://evек.vip/ocel/2322-306882-pozinkovan--ocelov--plech-4-8mm--elezn--plechy--ez-n--plechu-voliteln--po-adovan--rozm-r-mo-n--100x1000mm.html#/218-%C5%A1%C3%AD%C5%99ka-100mm/219-d%C3%A9lka-100mm/255-tlou%C5%A1%C5%A5ka_s%C3%ADla-2mm

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam
OZE	Obnovitelné zdroje energie
Li-ion	Lithium iontová baterie
CB	Carnotova baterie
PTES	Pumped thermal energy storage
ORC	Organický Rankin-Clausiiův cyklus
TI-PTES	Thermal-integrated pumped thermal energy storage
WTES	Wind thermal energy storage
TES	Thermal energy storage
PV	Fotovoltaické panely
CSP	Concetrated solar powerplant
PHES	Pumped hydro energy storage
CAES	Compressed air energy storage
GES	Gravitational energy storage
Pb-acid	Olovené baterie
Vn_průtočné	Vanadiové průtočné baterie

Symbol	Veličina	Jednotka
Q	Tepelná energie	J
m	Hmotnost	kg
t	Teplota	$^{\circ}C$
c_p	Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
ΔH	Entalpický rozdíl	$J \cdot kg^{-1}$
h'	Měrná entalpie ve stavu syté kapaliny	$J \cdot kg^{-1}$
h''	Měrná entalpie ve stavu syté páry	$J \cdot kg^{-1}$
P	Výkon	kWh
S	Plocha	m^2
η	Účinnost	–
G_m	Hodnota dopadající sluneční energie	$W \cdot m^{-2}$
\dot{m}	Hmotnostní průtok	$kg \cdot s^{-1}$
\dot{Q}	Objemový průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
Δt	Teplotní spád	$^{\circ}C$
ρ	Hustota	$kg \cdot m^{-3}$
T	Čas	h
V	Objem	m^3
L	Délka	m
d	Vnitřní průměr	m
D	Vnější průměr	m
δ	Tloušťka	m

R_1	Tepelný odpor válcové stěny	$m \cdot K \cdot W^{-1}$
R_2	Tepelný odpor rovinné stěny	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
r	Poloměr	m
λ	Tepelná vodivost	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
α	Součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$