VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MOŽNOSTI VYUŽITÍ SOLÁRNÍCH KOMÍNŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR‘S THESIS

AUTOR PRÁCE MARTIN MORAVČÍK
AUTHOR

BRNO 2010

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student:	Martin Moravčík	***ID:***	106653
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Možnosti využití solárních komínů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- základy a rozbor konstrukce solárních komínů
- teoretická analýza využití
- praktické možnosti využití v České republice a Evropě
- ekonomické vyhodnocení

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2010 ***Termín odevzdání:*** 31.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Procházka

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

MORAVČÍK, M. *Možnosti využití solárních komínů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Procházka.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

....

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Možnosti využití solárních komínů

Martin Moravčík

vedoucí: Ing. Zdeněk Procházka
Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2010

Brno

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering

Bachelor’s Thesis

Possibilities of Solar Chimney Power Plants

by

Martin Moravčík

Supervisor: Ing. Zdeněk Procházka
Brno University of Technology, 2010

Brno

ABSTRAKT

Práce obsahuje teoretické shrnutí současného stavu řešení problematiky solárních komínů. V první kapitole se soustředí na matematické metody popisu funkce solárního komína obecně, stanovuje vztahy pro výkon, účinnost, rychlost proudění v komíně a vztahy pro návrh solárního komína. V další kapitole je uvedeno rozdělení solárních komínů a soustředí se především na popis solárních vzestupných komínů. Okrajově si všímá také plovoucích a spádových komínů. Dále jsou zde uvedeny možnosti jak využít princip solárního komína ke klimatizaci a větrání. V další kapitole je popsáno využití solárních komínů, s kogenerací, pro výrobu vodíku, v chladících věžích a komínech a také je tu podrobně popsán projekt v Manzanares. Ve páté kapitole je popsána ekonomika provozu pro dva srovnávací projekty solárních komínů, které jsou na konci ekonomicky analyzovány a zhodnoceny. V poslední kapitole je uvedeno shrnutí cílů práce, uveden je také návrh dalšího postupu a nakonec je zde uvedeno také zhodnocení solárních komínů a závěr práce.

Klíčová slova: sluneční; energie; solární komín; kogenerace; elektřina; klimatizace; kolektor; komín; větrná turbína

ABSTRACT

This thesis contains teoretical summary of present situation of problems involved in solar chimneys development. In the first chapter there are mathematical methods for describing the functions of solar chimneys in general. It establishes figures for power output, efficiency, speed of flow inside the chimney and figures for desinging solar chimney. In the next chaper there is a division of solar chimneys and it mainly focuses on describing the solar updraft towers and solar floating chimneys. And marginally it focuses on solar downdraft towers. Next there are possibilities how to use principle of solar chimney for air-conditioning and ventilation. In the next chapter it describes the use of solar chimneys, with cogeneration, hydrogen production, in cooling towers and chimneys, and there is also fully described the project in Manzanares. In the fifth chapter it describes the economy of the two comparative projects of solar chimneys, which are at the end economically analyzed and assessed. The last chapter is a summary of the objectives of this thesis, and the subsequent approach is described too and at last there is also evaluation of solar chimneys and the conclusion of this thesis.

Keywords: solar; energy; solar chimney; cogeneration; electricity; air conditioning; collector; chimney; wind turbine

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ 9

SEZNAM TABULEK 10

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK 11

1 CÍLE PRÁCE 13

2 SOLÁRNÍ KOMÍNY 14

- **2.1 Úvod** 14
- **2.2 Popis funkce** 14
- **2.3 Základní vztahy** 15

3 ROZDĚLENÍ A POPIS SOLÁRNÍCH KOMÍNŮ 18

- **3.1 Výroba elektrické energie** 18
  - 3.1.1 Solární vzestupné komíny 18
  - 3.1.2 Solární „plovoucí“ komíny 23
  - 3.1.3 Solární spádové komíny 23
- **3.2 Komíny pro větrání a klimatizaci** 24
  - 3.2.1 Princip 24
  - 3.2.2 Konstrukce 25
  - 3.2.3 Možnosti využití 25

4 MOŽNOSTI VYUŽITÍ SOLÁRNÍCH KOMÍNŮ 27

- **4.1 Projekt v Manzanares** 27
  - 4.1.1 Parametry a konstrukce 27
  - 4.1.2 Provoz a výsledky projektu 28
- **4.2 Využití pro výrobu energie** 29
  - 4.2.1 Současný stav 29
  - 4.2.2 Chladící věže a komíny 29
  - 4.2.3 Výroba vodíku 30
- **4.3 Možnosti kogenerace** 30
  - 4.3.1 Zemědělské využití 30
  - 4.3.2 Umístění FV panelů 31
  - 4.3.3 Městské využití 31
  - 4.3.4 Odsolování mořské vody 32

5 EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ 33

- **5.1 Návrh parametrů** 33
- **5.2 Ekonomika provozu** 34
- **5.3 Financování a rentabilita investice** 37

6 ZÁVĚR 40

- **6.1 Splnění cílů práce** 40
- **6.2 Návrh dalšího postupu** 40
- **6.3 Závěr práce** 41

POUŽITÁ LITERATURA 42

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 3-1 Princip vzestupného solárního komína.[21] 19

Obrázek 3-2 Příklad efektu uskladnění tepla v kolektoru s použitím potrubí naplněného vodou.[21] 20

Obrázek 3-3 Příklad konstrukce solárního komína v řezu [19] 21

Obrázek 3-4 Princip naklánění plovoucího komína [16] 23

Obrázek 3-5 Princip klimatizace se solárním komínem 24

Obrázek 3-6 Komín na FSI VUT v Brně [23] 25

Obrázek 4-1 Prototyp v Manzanares. 28

Obrázek 5-1 Závislost CE na úrokové míře a délce úvěru pro Projekt 1 37

Obrázek 5-2 Závislost NPV na úrokové míře a délce úvěru pro Projekt 1 38

Obrázek 5-3 Závislost doby návratnosti na výkupní ceně elektřiny 39

SEZNAM TABULEK

Tabulka 5-1: Parametry zvolených solárních komínů......34
Tabulka 5-2: Vypočtené investiční náklady......35

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

symbol	název veličiny	jednotka
A	vyrobená energie za rok	GWh
G	množství dopadající sluneční energie	kWh m^{-2}
H	výška komína	m
I	intenzita slunečního záření	W m^{-2}
I_M	maximální průměrná denní intenzita záření	W m^{-2}
K_i	investiční náklady	€
N_{odp}	náklady na odpisy	€
N_{Pc}	současná hodnota provozních nákladů	€
P	výkon	W
P_{co}	současná hodnota zisků za uhlíkové kredity	€
P_M	maximální výkon	W
Q_{fl}	hmotnostní tok proudění vzduchu	kg s^{-1}
R	poloměr komína	m
S_k	plocha kolektoru	m^2
T	teplota	K
ΔT	teplotní rozdíl	K
T_o	teplota okolí	K
Z	zisk	€
c_p	měrná tepelná kapacita vzduchu	J kg^{-1} K^{-1}
g	gravitační zrychlení	m s^{-2}
h	výška střechy kolektoru	m
i	úroková míra	r^{-1}
i_{inf}	míra inflace	r^{-1}
n	délka splácení úvěru	r
p	tlak	Pa
Δp	tlakový rozdíl	Pa
p_u	procento údržby a provozu	%

symbol	název veličiny	jednotka
r	poloměr kolektoru	m
v	rychlost	m s^{-1}
β	koeficient objemové termální expanze	K^{-1}
η_{fr}	ztráty třením	-
η_{gen}	účinnost generátoru	-
η_{ch}	účinnost komína	-
η_{k}	účinnost kolektoru	-
η_{M}	maximální účinnost	-
η_{t}	účinnost turbíny	-
π	Ludolfovo číslo	-
ρ	hustota vzduchu	kg m^{-3}
ρ_{o}	hustota vzduchu vně komína	kg m^{-3}

Zkratky:

zkratka	význam
CE	výrobní cena elektřiny
EKN	současné ekvivalentní náklady na údržbu a provoz
€c	eurocent
NPV	čistá současná hodnota
PP	doba návratnosti
VKE	výkupní cena energie

1 CÍLE PRÁCE

Téma solárních komínů v sobě zahrnuje stavebním, strojní, energetickou a ekonomickou problematiku. Tato práce se zabývá tématem z hlediska energetického a ekonomického, proto byly zvoleny následující cíle práce:

1) Rozbor problematiky solárních komínů - Především z hlediska jejich možné konstrukce a funkčního principu. Zahrnuje rešerši dostupných materiálů týkajících se této problematiky a zjištění současného stavu řešené problematiky.

2) Možnosti využití principu solárních komínů - Zahrnuje rozbor teoretických možností využití principu solárních komínů s důrazem na energetiku a využití v kombinaci s dalšími principy. Dále zahrnuje také praktické možnosti využití v ČR a v Evropě.

3) Ekonomická analýza solárních komínů - Zaměřuje se především na rozbor investičních nákladů stavby a provozních nákladů. Dále zahrnuje také možnosti financování a zhodnocení rentability solárních komínů v závislosti na podmínkách financování.

2 Solární komíny

2.1 Úvod

Solární komíny patří mezi obnovitelné zdroje energie. Obnovitelné zdroje energie jsou podle běžné definice zdroje, které jsou člověku volně k dispozici a jejichž zásoba je nevyčerpatelná nebo se obnovuje v časových měřítcích srovnatelných s jejich využíváním.

Obnovitelné zdroje energie lze rozdělit do tří skupin podle základní energie, na které jsou založeny. Jsou to zdroje založené na rotační a gravitační energii Země a okolních vesmírných těles, například přílivová energie, potom na tepelné energii zemského jádra, například geotermální energie, a na energii dopadajícího slunečního záření. Právě tyto zdroje, které jsou založeny na energii dopadajícího slunečního záření mají největší potenciál využití. Využívá se jí buď přímo jako energie přímého či rozptýleného slunečního záření nebo v transformovaných formách, například energie vody, větru, biomasy atd. Právě do skupiny využití přímého a rozptýleného záření patří právě solární komíny.

V současném světě stále roste poptávka po energii, především v rozvojových zemích roste se zvyšující se životní úrovní také počet obyvatel, což vyvolává exponenciální růst poptávky po energii. Klasické relativně jednoduché zdroje energie z fosilních zdrojů by mohly tento problém řešit, ale v době vážných debat o spojitosti spalování fosilních paliv a globálním oteplováním by toto řešení mohlo mít katastrofální důsledky, nehledě na stále se zmenšující zásoby těchto paliv. Tímto řešením by také mohlo dojít k ekologickým kolapsům celých oblastí, bohužel si však tyto země nemohou z ekonomicko sociálních důvodů dovolit ochranu životního prostředí. Jaký druh zdroje by tedy byl ekologický, ekonomický a zároveň bezpečný. Jaderné zdroje nejsou vhodné právě kvůli nedostatečnému lidskému kapitálu v těchto zemích. Nejlepším zdrojem v rozvojových, ale i jiných zemích, které mají větší množství nevyužitého prostoru (pouště, savany apod.) je tedy Slunce.

Evropská unie v dnešní době již silně podporuje rozvoj využívání obnovitelných zdrojů energie ve všech členských státech. Do roku 2020 chce dosáhnout 20% podílu výroby z obnovitelných zdrojů z celkového množství vyrobené energie.

Jednou z možností jak získat energii ze Slunce pomocí relativně jednoduchých technologií jsou solární komíny. Stačí k tomu pouze komín, skleník a větrná turbína, což jsou v podstatě jednoduché a dobře zvládnuté technologie, které jen musíme aplikovat jiným způsobem a v jiném měřítku než na jaké jsme zvyklí. Solárních komínů je možné použít k větrání, klimatizaci i k výrobě elektrické energie a jejich velká plocha skleníku se nabízí i k zemědělskému využití. [15][17]

2.2 Popis funkce

Každý sluneční komín pracuje na jednoduchém principu a to tak, že horký vzduch stoupá vzhůru a studený vzduch klesá dolů. Jako zdroj energie pro ohřívání vzduchu využívá sluneční záření, které ohřívá vzduch ve skleníku a takto zahřátý vzduch pak

proudí skrz komín, na kterém komínový efekt vytváří tlakový rozdíl a ten vytváří proudění, které můžeme využít k výrobě elektrické energie pomocí uzavřených větrných turbín nebo jen k větrání či klimatizaci objektu.

2.3 Základní vztahy

2.3.1 Tlakový rozdíl

Pro výpočet parametrů solárního komína a jeho tepelné bilance je nutné analyzovat statický tlak vně a uvnitř komína, neboli stanovit rozdíl tlaku, který vytváří hnací sílu pro proudění vzduchu komínem. Tlakový rozdíl v komíně je:

$$\Delta p = p_i - p_o \qquad (2.1)$$

kde p_i je tlak u paty komína a p_o je tlak vně komína.
Po úpravách je Δp zjednodušeně:

$$\Delta p = g\,H\,(\rho_o - \rho) \qquad (2.2)$$

kde g je gravitační zrychlení, ρ_o je hustota vzduchu vně komína a ρ je hustota vzduchu u paty komína. V kolektoru se vzduch ohřívá o teplotní diferenciál ΔT, který dosadíme do rovnice výše a upravíme na:

$$\Delta p = \rho\, g\, \beta\, H\, \Delta T \qquad (2.3)$$

kde β je koeficient objemové termální expanze, dle:

$$\beta = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho \cdot \Delta T} \qquad (2.4)$$

V případě komínů vyšších než 1km by se měla hustota vně komína přepočítat na pokles tlaku a hustoty vzduchu s výškou.

Rovnice (2.3) ovšem nepočítá s profilem kolektoru a dodávkou energie ze Slunce, proto po náročných úpravách, které kvůli rozsahu této práce nevypisujeme získáme rovnici, ve které zanedbáváme ztráty způsobené viskozitou proudění:

$$\Delta p = \sqrt[3]{\frac{g^2 \cdot \rho_0^2 \cdot \beta^2 \cdot H^2 \cdot r^4 \cdot I^2}{2 \cdot c_p \cdot \rho \cdot R^2}} \qquad (2.5)$$

kde H je výška komína, r je poloměr kolektoru, I je intenzita slunečního záření, c_p je měrná tepelná kapacita vzduchu a R je poloměr komína.

Solární komín přeměňuje tuto dopadající energii na kinetickou energii vzduchu pomocí tepelných konvekčních proudů. Tyto proudy jsou závislé na výšce komína, tedy na rozdílu hustoty teplého vzduchu (v kolektoru) a studeného vzduchu (v atmosféře na špičce komína), takže tento rozdíl hustot zde funguje jako poháněcí síla vzduchu v komíně. Teplý vzduch má menší hustotu než studený a tedy stoupá vzhůru a je nahrazo-

ván studeným vzduchem vstupujícím do kolektoru na jeho okraji. Tlakový rozdíl Δp stoupá s výškou komína.[13][24]

2.3.2 Výkon a účinnost

Celkový výkon solárního komína závisí na mnoha proměnných, proto z hlediska rozsahu této práce popišme výkon nejdříve zjednodušeně. Vycházíme z toho, že výkon vykonaný solárním komínem lze spočítat z množství přijímané energie slunečním kolektorem G a součinu s příslušnými účinnostmi přeměny na elektrickou energii:

$$P = G \,.\, \eta_k \,.\, \eta_{ch} \,.\, \eta_t \,.\, \eta_{gen} \tag{2.6}$$

V rovnici (2.6) ovšem prozatím neznáme účinnosti kolektoru η_k a komína η_{ch}, stejně tak účinnost turbíny η_t a generátoru η_{gen} je závislá na podmínkách provozu. Proto budeme postupovat jiným způsobem. Pro zjednodušení zanedbáme změny v hustotě vzduchu při expanzi, které jsou pro změnu teplot a tlaku, se kterou pracujeme zanedbatelné.

Víme, že celková maximální účinnost je dána poměrem dodávaného maximálního elektrického výkonu P_M a dodávané energie ze Slunce E:

$$\eta_M = \frac{P_M}{E} = \frac{P_M}{S_k \cdot I} \tag{2.7}$$

kde S_k je plocha kolektoru a I je intenzita dopadajícího slunečního záření.
A také víme, že výkon je dán tímto poměrem:

$$P_M = \frac{\Delta p \cdot Q_{fl}}{\rho} \tag{2.8}$$

kde Q_{fl} je tok proudění vzduchu v komíně, dle vztahu:

$$Q_{fl} = \pi \sqrt[3]{\frac{2g \cdot \rho \cdot H \cdot R^4 \cdot r^2 \cdot I}{c_p}} \tag{2.9}$$

Pro maximální možný výkon, bez započtení ztrát získáme vztah:

$$P_M = S_k \cdot I \cdot \frac{g \cdot H}{c_P \cdot T_0} \tag{2.10}$$

Dosazením rovnice (2.10) do rovnice (2.7), získáme celkovou účinnost samotného komína:

$$\eta_{ch} = \frac{g \cdot H}{c_P \cdot T_0} \tag{2.11}$$

Z této rovnice vyplývá základní vlastnost solárního komína a to, že jeho účinnost je lineárně závislá na výšce komína.

Vzrůst teploty pod kolektorem je dán vztahem:

$$\Delta T = \eta_k (T, Q_{fl}) \cdot \frac{I \cdot S_k}{c_P \cdot Q_{fl}} \tag{2.12}$$

kde účinnost kolektoru η_k je funkcí teplotních poměrů vně a uvnitř kolektoru a hmot-

nostním tokem proudění Q_{fl}.

Z rovnic uvedených výše můžeme říci, že celkový výkon je závislý na ploše kolektoru a výšce věže. Tyto dva parametry jsou tedy pro naše účely nejdůležitější. Závisí také na jejich poměru, jelikož nízký komín a velký kolektor mohou podat stejný výkon jako vysoký komín a malý kolektor. Také vidíme, že pro dosažení co nejvyšší účinnosti je nutné stavět komíny velké výšky, což sebou nese také vyšší ekonomické náklady, ale je to lepší řešení než kvůli dosažení vyššího výkonu stavět příliš velký kolektor, jehož náklady rostou se zvětšujícím se průměrem ještě rychleji. Samozřejmostí je také použití turbín a generátorů s co nejvyšší účinností i přes jejich vyšší cenu, protože ta se silně projeví na celkové účinnosti stavby.[9][21][24]

2.3.3 Vztahy pro návrh

Při návrhu parametrů stavby platí několik zásadních optimalizačních vztahů. Především pak ideální poměr mezi výškou komína H a poloměrem komína R je dle teoretických modelů dán poměrem:

$$\frac{H}{R^2} \cong 0{,}08 \tag{2.13}$$

kde byl v modelu uvažován neměnný průměr komína.

Pro výběr správné výšky kolektoru nad zemí si zvolíme koeficient světlosti komína sv, který by podle teoretického modelu měl být vyšší než 6, aby bylo možné zanedbat ztráty třením v kolektoru a přechodu mezi ním a komínem. Sv je definován rovnicí:

$$sv = \frac{r + H}{\sqrt[3]{S_k \cdot h + \pi \cdot R^2 \cdot H}} \tag{2.14}$$

kde h je výška střechy kolektoru nad zemí.

Pokud uvažujeme ideální pokles tlaku Δp na turbíně o 2/3, tak pro jmenovitý výkon můžeme psát:

$$P_n = \eta_{gen} \cdot \eta_{fr} \cdot \eta_t \cdot \eta_k \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{g \cdot H \cdot S_k \cdot I}{c_P \cdot T_0} \tag{2.15}$$

kde η_{fr} jsou ztráty třením a pro většinu geometrických modelů stanoveny přibližně na 0,9 a η_k uvažujeme mezi 0,4 – 0,5 v závislosti na provozních podmínkách.

Pro dimenzování turbíny potřebujeme znát ještě také rychlost proudění v komíně a tedy rychlost s jakou bude turbína muset pracovat. Rychlost proudění je dána:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot H \cdot \frac{\Delta T}{T_0}} \tag{2.16}$$

Vztahy uvedené výše jsou získány z teoretických modelů uvedených v literatuře.[9][13]

3 Rozdělení a popis solárních komínů

Pro účely této kapitoly si rozdělíme solární komíny podle jejich využití na solární komíny vhodné pro výrobu elektrické energie, tedy konstrukce s kruhovým kolektorem či skleníkem a rozměrným komínem uprostřed a na komíny vhodné ke klimatizaci či větrání budov, které využívají proměnlivé konstrukce, ale platí u nich původní princip solárního komína.

3.1 Výroba elektrické energie

V této podkapitole jsou uvedeny tři různé principy solárních komínů, které jsou primárně určeny pro výrobu elektrické energie pomocí turbín umístěných u paty komína.

3.1.1 Solární vzestupné komíny

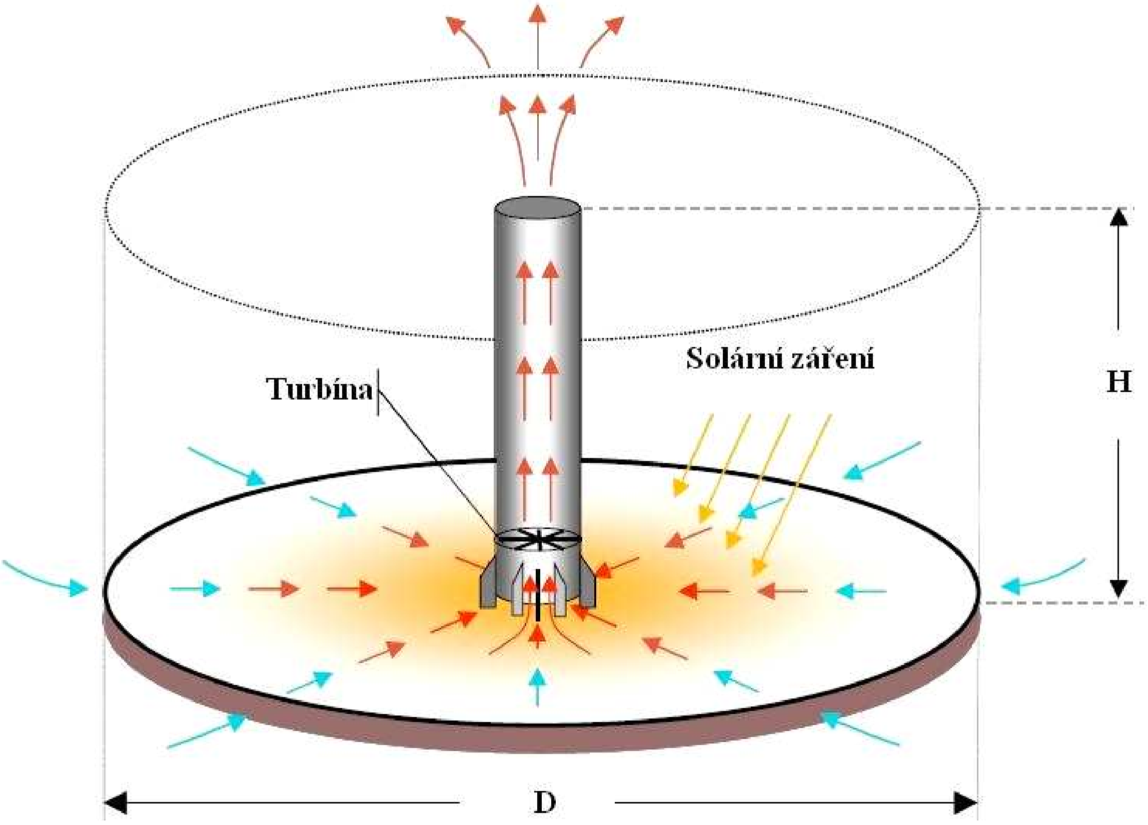
Vzestupné komíny jsou nejčastěji zmiňovanými typy solárních komínů v literatuře a byly prozatím jako jediný typ využity také v praxi.

Funkční princip

Otcem tohoto druhu komína je Jörg Schlaich, německý konstruktér projektu v Manzanares. Princip tohoto typu komínu je znázorněn na obrázku 3-1. Vzduch je ohříván slunečním zářením v nízké kruhové průhledné nebo průsvitné střeše neboli skleníku, který je otevřen na okraji a země pod ní tvoří sluneční kolektor. Uprostřed skleníku je vertikální věž s velkými vstupy vzduchu na její základně. Spoj mezi střechou a věží je vzduchotěsný. Jelikož je horký vzduch lehčí než studený vzduch, tak tento vzduch má tendenci stoupat vzhůru. Čímž vzniká sání teplého vzduchu z kolektoru a tento vysátý vzduch nahrazuje studený vzduch vstupující z vnějšího obvodu. Pokud chceme, aby tento proces probíhal po celý den, tedy i po západu Slunce kdy se sluneční kolektor již nezahřívá, tak umístíme nádoby, jímky, či potrubí naplněné například vodou, která bude během dne akumulovat mnohem větší množství tepla než pouze samotný vzduch, takže může naakumulované teplo vydávat pozvolna i v noci. Jelikož je voda pouze pracovním médiem, které je v uzavřeném systému, tak není třeba kontinuální dodávky vody do takovéto elektrárny. Tímto způsobem dosáhneme přibližně konstantního proudu vzduchu komínem po celý den. Energie obsažená v mechanickém pohybu vzduchu do komína u jeho paty je využívána k roztočení turbín, které již vyrábí elektrickou energii.

Solární komín má relativně malou účinnost vůči jiným solárním technologiím, ale zato ke svému provozu nepotřebuje přímé sluneční záření, postačí i plně rozptýlené záření. Nejdůležitější funkci zde má, na rozdíl od fotovoltaických systémů, infračervené záření. Největší vliv na účinnost mají kromě samotných parametrů zařízení hlavně podnebné podmínky na místě. Teplota okolního vzduchu by tu měla být co nejnižší, ale neměla by poklesnout pod bod mrazu. Charakter půdy, jako tepelná konduktivita, měrná tepelná kapacita, hrubost a albedo povrchu určují kolik energie záření bude přeměněno na tepelnou, jaký bude přenos této energie do vzduchu pod kolektorem a jaký bude kapacitní efekt půdy. Charakter větru v okolním prostředí má vliv na ztráty tepla prou-

děním a vedením. A také charakter rozložení teplotních vrstev v atmosféře může mít efekt na parciální atmosférický tlak na vrcholu komína, který by měl být co nejnižší. Vliv má také obsah pevných částic ve vzduchu, které snižují intenzitu dopadajícího záření, a také usazování prachu na kolektoru.[9][21]



Obrázek 3-1 Princip vzestupného solárního komína.[21]

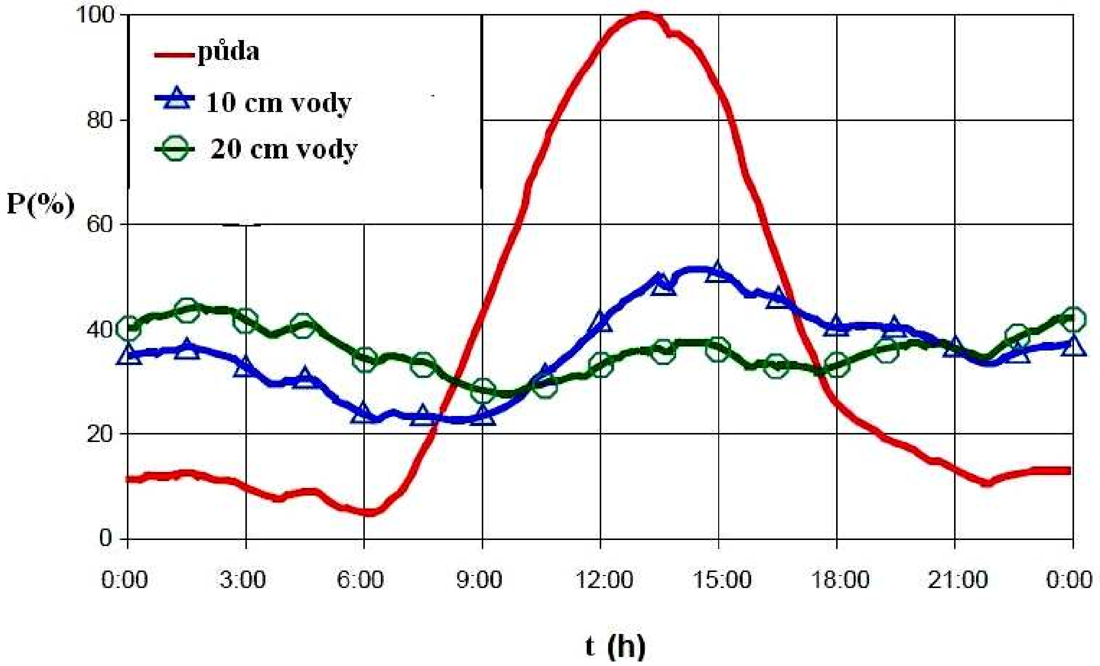
Kolektor

Kolektor je v podstatě jednoduchý skleník, který zachycuje krátkovlnné sluneční záření a dlouhé vlnové délky tepelného záření. Vyrábí se obvykle ze skla nebo plastů, které mají dostatečný samočisticí účinek na sedavý prach a navátý písek. Dešťová voda je odváděna kanálky mezi tabulemi skla, nebo je propouštěna otvorem ve spodní části prohnutého krytí na plastové bázi. Krycí materiál se umístí na nosnou konstrukci ve výšce několika metrů nad zemí, přičemž se výška zasklení zvyšuje zároveň s přibližováním ke středu, tak aby se co nejlépe využilo proudění vzduchu a nedocházelo ke ztrátám třením na zúženém přechodu komína a skleníku, zlepšuje se tak účinnost a snižují se třecí ztráty. Krytí skleníku umožňuje, aby bylo přijímáno sluneční záření a zabraňuje úniku většiny tepla uloženého v zemi nebo v kapacitním médiu.

Pro zvýšení tepelné kapacity skleníku je možné přidat například potrubí či jiné zásobníky s vodou natřené černou barvou ležící přímo na půdě. Toto médium pak ohřívá vzduch pod skleníkovou střechou, který proudí do komína. Množství vody v potrubí pak mění parametry rozložení výkonu celé elektrárny, jak můžeme vidět na obrázku 2-2. Čím větší množství vody je použito, tím je využití výkonu v průběhu dne plynulejší. Protože přechod tepla mezi vzduchem a vodou je snadnější než v případě vzduchu a půdy a také tepelná kapacita vody je asi pětkrát vyšší než půdy. Využití vody není samozřejmě povin-

né, je možno využít i jiného kapacitního média, ale voda je zde zvolena jako nejvhodnější substance. Situace kdy použijeme pouze obyčejný skleník (na obrázku červeně) připomíná diagram zatížení u ostatních solárních technologií, tato situace by byla ovšem neefektivní z hlediska dimenzování turbín, které by musely být navrženy pro vyšší okamžitý výkon než je pro vyrobení stejného množství elektřiny nezbytně nutné.

Rozměry plochy kolektoru jsou dány požadavky na hmotnostní průtok vzduchu komínem a ten je dán především velikostí teplotního nárůstu ΔT, z rovnice (2.12), pod kolektorem vůči okolnímu vzduchu. Zvětšování kolektoru sice ΔT společně s hmotnostním průtokem zvyšuje, ale klesá celková účinnost kolektoru a hlavně rostou náklady na kolektor. Limit ΔT je cca 12-15K, nad tuto hranici už pouze rostou ztráty kolektoru a nedochází k dalšímu markantnímu nárůstu ΔT. Výška kolektoru nad zemí ovlivňuje třecí ztráty v něm a jeho zvýšení tedy vede, i když jen do určité míry, ke vzrůstu účinnosti kolektoru i díky tomu, že proudící vzduch zůstává pod kolektorem delší dobu a proudí pomaleji.[8][9][21]



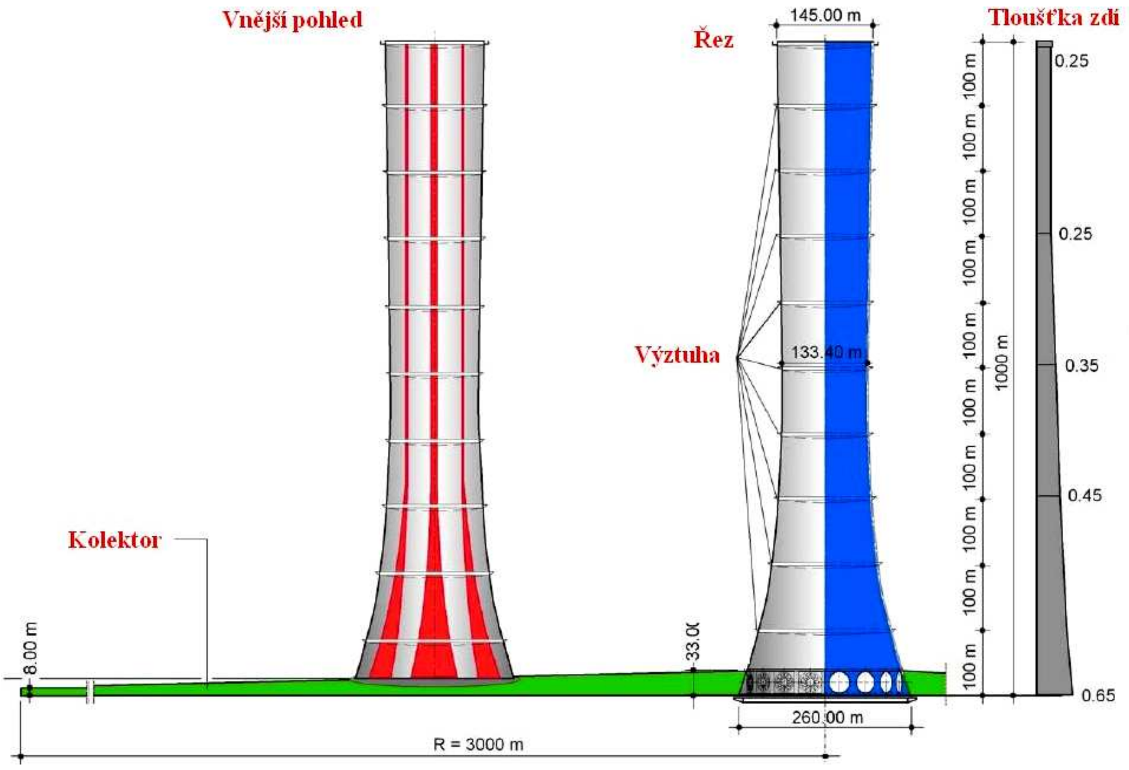
Obrázek 3-2 Příklad efektu uskladnění tepla v kolektoru s použitím potrubí naplněného vodou.[21]

Komín

Komín u těchto elektráren je v podstatě velmi podobný konstrukci klasickým chladícím věžím. V podstatě se jedná o konstrukci, která v sobě spojuje parametry chladící věže s vysokým komínem, jak je vidět i na obrázku 3-3. Jelikož u staveb těchto rozměrů nutně dochází ke značné zátěži vlivem povětrnostních podmínek je nutné použít pro stavbu nejlépe vyztužený železobeton. Ohromné rozměry takovéto stavby také vyžadují rozšířenou dolní část jako u chladicích věží, kvůli nutnosti nést hmotu stavby komína. Nutné je také rozšíření horní části pro vyšší pevnost a odolnost vůči povětrnostním vlivům. Toto vyztužování stavby je nutné také kvůli možnosti vzniku rezonance komína

s větrem a jeho rozkmitání. Rezonance by, ale neměla být faktorem u komínů vyšších než 1 km, kvůli profilu rychlosti větru v různých výškách, který by neměl umožnit vznik rezonancí. Vhodné je také vložení rovnoměrně podélně rozložených vyztužovacích prstenců do komína, které udržují pevný kruhový tvar a zabraňují kroucení konstrukce. U menších staveb je také možné použít i lehčí materiály s nižší pevností, například lehké kovové slitiny nebo je kombinovat s plasty jako u projektu v Manzanares. Postačí zde totiž jakýkoliv komín, jedinými požadavky na použitý materiál je pouze jeho mechanická pevnost, odolnost proti vnějším vlivům, hustota a také cena. Povrch komína musí být ovšem co nejhladší, aby nedocházelo ke ztrátám v turbulentním proudění u stěn. Běžný rozdíl teploty okolí a teploty vzduchu pod kolektorem u výkonnějších komínů se pohybuje i kolem 20 K, přesto je rychlost proudění relativně malá, asi do 15 m/s, protože většinu z rozdílu tlaku využije turbína. Z tohoto důvodu je možné provádět většinu veškeré údržby takovéto elektrárny přímo za plného provozu.

Rozměry komína co do výšky jsou dány požadavky na výkon a účinnost elektrárny, což vyplývá z rovnic (2.10) a (2.11). Zvyšováním komína roste účinnost nejenom samotného komína, ale také účinnost kolektoru zvýšením hmotnostního průtoku vzduchu a snížení ΔT, viz podkapitola kolektor. Průměr komína snižuje třecí ztráty a jeho zvýšení má tedy podobný, i když menší, efekt jako zvýšení komína. Se zvyšujícím se rozměry komína ovšem rostou proporcionálně také náklady a náročnost stavby, takže je nutné vždy hledat optimální rozměry vzhledem k nákladům.[8][9][21]



Obrázek 3-3 Příklad konstrukce solárního komína v řezu [19]

Turbíny

Turbíny pro solární komíny musí využívat nízkých rychlostí proudění vzduchu, podobně jako pomalé turbíny pro hydroelektrárny či pro pomalé větrné elektrárny, proto se na rozdíl od klasických větrných elektráren, využívá uzavřené konstrukce turbín, podobné větrným motorům s difuzory, které mají lepší využití tlakového spádu proudění na plochu turbíny než klasické větrné turbíny. Pro co nejlepší využití energie takové turbíny je nutné regulovat výkon a průtok vzduchu turbínou, tak aby pracovala v co nejoptimálnějším zatížení.

Za tímto účelem se využívají turbíny s nastavitelným sklonem rotorových listů, čímž se reguluje odpor, který turbína klade na proudící vzduch, a tím lze ovlivňovat rychlost proudění a výkon turbíny. Systém s natáčivými listy dokáže zajistit konstantní otáčky ve velkém rozsahu rychlostí větru, aniž by se výrazně měnila jeho účinnost. Umožňuje také snadnější rozběh stojícího rotoru. Pracuje tak, že se list turbíny natáčí až do polohy, kdy tětiva listu je téměř rovnoběžná s rovinou vrtule. Roste tím vztlaková síla i odpor profilu, tak jak se zvětšuje úhel náběhu. Změnou směru výsledné síly na listu se udržuje přibližně konstantní. V krajní poloze při zastaveném rotoru nevytváří proud vzduchu moment síly, při otáčejícím se rotoru vzniká moment, který působí proti otáčení rotoru a rotor brzdí. V této poloze kladou listy proti větru velký odpor a síla přenášená na konstrukci je větší. Natáčení může být zajišťováno hydraulicky, pneumaticky nebo elektricky. Při poruše regulačního a ovládacího zařízení musí být zajištěno automatické zastavení, aby nedošlo k havárii. Turbíny dimenzujeme dle parametrů komína, především bereme v úvahu nároky na jejich výkon, dle rovnice (2.15) a rychlosti proudění, dle rovnice (2.16). Poté dle parametrů vhodných turbín rozhodneme o jejich počtu a umístění. Umístění je možné buď pro jednu turbínu horizontální nebo pro více turbín svisle po obvodu paty komína.[13][21]

Generátory

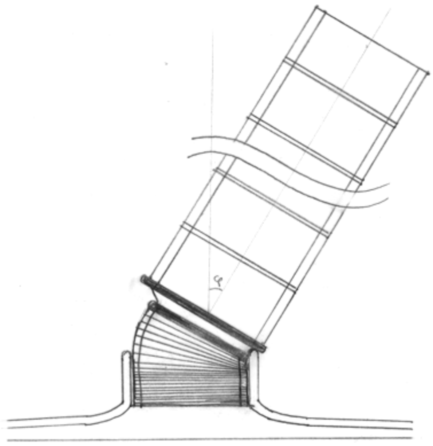
Elektrická energie se v solárních komínech může vytvářet pomocí 3-fázových synchronních či asynchronních generátorů připojených buď přímo nebo přes převodovku k větrné turbíně. Pro vyšší účinnost je doporučeno vždy použít rotory s permanentními magnety. Pro menší výkony na výrobní jednotku dosahované v solárních komínech je nejvhodnější použít asynchronní generátory, které mohou mít rotor s vinutím klecovým nebo kroužkovým, přímo připojené k distribuční síti a dvojitě napájené s měničem v rotorovém obvodu. Připojování k distribuční síti postačí přímé doplněné softstartem, případně může být celé zařízení řízeno frekvenčním měničem. Pro turbíny vysokých výkonů je možné využít pomaloběžné synchronní generátory s vyšším počtem pólů, navržené vždy pro konkrétní komín, v kombinaci s regulací otáček samotné turbíny, viz předchozí kapitola. Tak aby byly splněny požadavky na frekvenci elektrické energie dodávané do sítě a zároveň jsme se mohli vyhnout použití měničů frekvence a tím i jejich ztrátám. V takovém případě by bylo ovšem nutné zajistit co nejstálejší profil rychlosti větru v patě komína v průběhu celého dne. Toho je možné dosáhnout vhodným návrhem tepelné kapacity kolektoru. Nevýhodou může být připojování takového generátoru na síť a s tím spojené přechodné jevy. Problematika generátorů u solárních komínů je také

velmi podobná problematice generátorů větrných elektráren, takže je při návrhu možné použít bohatých zkušeností s nimi a navíc ani není třeba tak komplikovaná regulace dodávaného výkonu.[2][13]

3.1.2 Solární „plovoucí" komíny

Nejedná se, jak může z názvu vyplývat o komín, který plave na hladině, ale spíše o koncept solárního komína téměř libovolných rozměrů, který je vyroben z lehkých materiálů. Samotný komín je samonosný právě díky prstencům z lehkých materiálů používaných například pro balóny či vzducholodě naplněných nehořlavým plynem lehčím než vzduch.

Celá výška komína je složena z prstenců uložených na nosné konstrukci komína z lehké látky vyztužené prstencovými pruty z odlehčených kovových slitin. Ostatní části tohoto typu solárního komína jsou stejné jako u vzestupného komína a také princip výroby energie je naprosto stejný. Pouze je možno zvýšit celkovou účinnost přeměny energie díky vyššímu komínu, který nepotřebuje celou železobetonovou konstrukci, ale pouze železobetonový základ, složený z prstenců, které složením přes sebe dovolují plynulý náklon celého komína působením síly větru, znázorněno na obrázku 3-4, který má značný vliv na náklon takovéto stavby, právě kvůli její malé hmotnosti a tomu, že je samonosná. Což ovšem také pomáhá proudění na vrcholu komína, protože je mu usnadněno se dostat do prostředí, které vlivem větru proudí podobným směrem jako proudění vycházející z komína, což sníží ztráty v turbulentním proudění na vrcholu komína a tím i nepatrně zvýší účinnost.



Obrázek 3-4 Princip naklánění plovoucího komína [16]

Tento typ konstrukce je mnohem levnější než u klasických železobetonových komínů a zvyšuje se tedy i ekonomičnost takového projektu. Díky této technologii by bylo možné postavit několikakilometrové solární komíny už za současného stavu technologií na rozdíl od staveb ze železobetonu. Nevýhodou je malé využívání těchto ultralehkých technologií v současnosti a s tím vznikající náklady na další rozvoj těchto technologií pro průmyslovou výrobu. Tato technologie by ovšem alespoň teoreticky měla být schopna uvést i značně rozměrné solární komíny do praktického využití při zachování nižších ekonomických nákladů než u betonových staveb, za cenu velkého snížení doby životnosti samotného komína.[16]

3.1.3 Solární spádové komíny

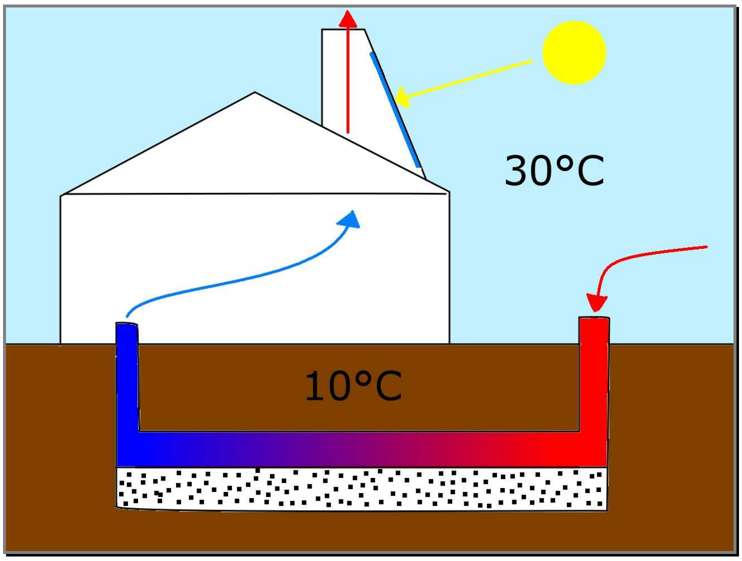
V literatuře někdy nazývány „Energetické věže". Tento druh solárních komínů by měl využívat komína velkého průměru (až 500 m) a výšky (až přes 1000 m), bez slunečního kolektoru. Na vrchol komína se má přivádět mořská nebo brakická voda z blízkého vodního zdroje a rozstřikovat se na vrcholu komína, kde se většina vypaří a ochladí

vzduch v oblasti vrcholu komína, ten se stává těžším než okolní a tedy klesá do komína, což je v podstatě opačný efekt než můžeme vidět u ostatních komínů. Tento druh komínů by bylo vhodné umísťovat v horkém a suchém klimatu, kde je možnost extrakce energie ze vzduchu nejvyšší, tedy rozdíl hustoty mezi ochlazeným a zvlhčeným vzduchem a okolním horkým a suchým vzduchem nejvyšší. Tento druh solárního komína by měl fungovat také v noci, ale ještě v menší míře než noční činnost klasických vzestupných komínů, jelikož nemá zdaleka takové možnosti akumulace tepla a jeho účinnost se také markantně snižuje při vzrůstu vlhkosti okolního vzduchu a také při poklesu okolní teploty, jako například v noci nebo při změně počasí apod. Tento typ komína má i menší účinnost, protože asi polovinu získané energie z turbín u paty komína je k zapotřebí k čerpání vody na vrchol komína. Čerpání slané vody může být také nevýhodné kvůli zvýšené korozi materiálu potrubí, komína a turbín. V současné době není tento druh komína nijak prakticky implementován, a tak jsou údaje o něm dostupné pouze z teoretických studií. Jedná se tedy pouze o teoretický koncept jehož využití je v praxi nepravděpodobné.[12]

3.2 Komíny pro větrání a klimatizaci

3.2.1 Princip

Tento druh solárního komína využívá principu naznačeného v kapitole 1 a na obrázku 3-5. Na kterém vzduch z okolí vstupuje do podzemního rezervoáru, kde se postupně ochlazuje a je nasáván do budovy a vypouštěn skrz střešní solární komín. Používá se ke snížení energetické náročnosti větrání v budovách a domech. Jedná se o solární komín, který je umístěn nejčastěji na střeše budovy. Je obvykle vyroben z materiálu snadno pohlcujícím teplo. Absorbující část je působením slunečního záření zahřívána a díky principu popsanému v kapitole 1, proudí komínem vzduch vzhůru a ven z komína přičemž dochází k nasávání vzduchu do komína, který je připojen k větracímu systému budovy. V podstatě tedy zde komín nahrazuje elektricky poháněnou větrnou turbínu, která umožňuje nucené proudění vzduchu v budově.



Obrázek 3-5 Princip klimatizace se solárním komínem

Účinnost větrání je závislá na mnoha faktorech, jako jsou vlastnosti samotného komína, především jeho celková plocha, která je v určitou denní dobu vystavena slunečnímu svitu a její schopnosti absorpce tepelné energie především z infračervené složky slunečního záření, a také na zdroji nasávaného vzduchu. V případě vyšších požadavků na

tah komína je možno vystavět účinnější komín, tzn.: vyšší, širší nebo z lépe absorbujícího materiálu a nebo je jej možno posílit klasickými větráky.[25]

3.2.2 Konstrukce

Konstrukce solárního komínu pro tyto účely se obvykle skládá z čelní prosklené stěny, vzduchové mezery a ze zadní absorpční stěny, z druhé strany pokryté izolačním materiálem. Prosklená stěna solárního komínu bývá orientována na jih tak, aby byla co nejčastěji přímo vystavena slunečnímu záření. Postačí ovšem i komín bez absorpční stěny zkonstruovaný pouze z jednoduché, kompletně prosklené nosné konstrukce připomínající velmi široký komín.

Obrázek 3-6 Komín na FSI VUT v Brně [23]

Simulace ukazují, že výška komína by měla být nejméně 1 m. Optimální poměr vzduchové mezery a výšky komína je ½ čímž se sníží ztráty. Hmotnostní průtok vzduchu roste lineárně s výškou komína. Větší poměr mezery a výšky už ovšem nemá vliv na zvýšení proudění vzduchu, naopak při větších šířkách dochází ke zpětným proudům, které průtok snižují.[14]

3.2.3 Možnosti využití

Větrání

Využití těchto komínů se nabízí téměř kdekoliv, tedy i v našich podmínkách. Systém větrání funguje na známém principu přirozené konvekce. Proudění je poháněno slunečním záření, které ohřívá samotnou konstrukci komína, ze které se poté přenáší teplo do vzduchu ve vzduchové mezeře. Současně se také akumuluje teplo do absorpční stěny, které se poté uvolňuje v době, kdy intenzita slunečního svitu poklesne. Díky tomu může být v letních měsících solární komín využit i k částečnému nočnímu pasivnímu chlazení objektu. Nejjednodušší použití je využití solárního komína pro běžné větrání, tedy výměnu vzduchu v objektu, která je poháněna konvekcí komína a také z rozdílu teplot uvnitř budovy a venku, toto řešení je vhodné pouze pro letní období jelikož v zimním období je hlavní hnací silou rozdíl teplot uvnitř budovy a venku a komín funguje jen jako běžná větrací šachta, která tvoří nežádoucí tepelnou ztrátu.

Zástupce této technologie v praxi nemusíme hledat daleko. Solární komíny pro větrání se začínají využívat mimo výzkumné projekty i v ČR. Prvním zástupcem solárního komína byly u nás komíny na Energetickém ústavu FSI VUT v Brně, který vybudoval solární komíny na budově těžkých a lehkých laboratoří. Komíny mají výšku 3 m a plochu

solárního kolektoru 2,4 m^2, jeden je zobrazen na obrázku 3-6. Ústav na těchto komínech od roku 2003 provádí dlouhodobá měření, která jsou k dispozici na webových stránkách ústavu. Dále ústav také postavil experimentální dům ve kterém využívá k větrání mimo jiné i solární komín.[11][23]

Klimatizace

Ke klimatizaci a větrání se využívá stejné technologie komína jako v předchozí kapitole. Využívá konvekce k vynucenému proudění venkovního vzduchu přes podzemní rezervoár, tvořený komorami nebo potrubím, umístěný v nezámrzné hloubce, kde se vzduch v zimě předehřívá a v létě ochlazuje na teplotu půdy, která má v průběhu roku v našich podmínkách teplotu kolem 10 °C. Takto upravený vzduch se poté zpracuje ve vzduchotechnických jednotkách, tak aby měl požadované vlastnosti a dále se pak distribuuje větracím systémem do jednotlivých místností. Tento druh využití již vyžaduje vyšší počáteční investici na dostatečně dimenzovaný podzemní rezervoár, přes který proudí vychlazovaný vzduch a na potřebnou vzduchotechniku.

František Havránek z ČVUT na komplexním teoretickém modelu školní budovy kalkuloval úspory energie ve výši 53% u tohoto typu hybridní klimatizace na provozu vzduchotechnických systémů v klimatických podmínkách České republiky. Solární komíny pro klimatizaci jsou tedy i v našich podmínkách vhodnou technologií a to i z hlediska ekonomické a konstrukční náročnosti.[11]

Chladící komíny

Princip je zde podobný jako ten popsaný v kapitole 2.1.3. Proudění vzniká ochlazením vzduchu odpařováním vody na vrcholu věže, toto proudění míří do budovy kam přivádí ochlazený vzduch z věže. Účinnost tohoto chlazení lze zvýšit umístěním dalšího vzestupného solárního komína k výpusti vzduchu z budovy kvůli zvýšení rychlosti proudění vzduchu. Jelikož se jedná pouze o technologii pro větrání, tak nejlepším zdrojem vody je obyčejná dešťová voda, protože ji lze získávat relativně snadno a neobsahuje minerální látky které by se v komíně usazovaly. Komíny se mohou lišit distribucí vody a využitím větru. Pro bezvětrné oblasti je vhodné vodu rozstřikovat a zároveň je nutný vyšší komín. Pro větrné oblasti je možno využít větru pro rychlejší vypařování vody a nebo její ochlazování ve výměnících přímo na vrcholu věže. Opět je celý tento princip vhodnější pro oblasti se sušším a teplejším klimatem, ale není to podmínkou. Využívá se i v zeměpisných šířkách mírného pásu, především na americkém kontinentu.[4]

4 Možnosti využití solárních komínů

Možností využití solárních komínů pro energetiku je mnoho, ale v praxi nejsou aplikovány. Samotné solární komíny jsou mnohem častěji užívány pro účely techniky prostředí v budovách. V této práci se ovšem jedná především o energetické využití komínů a proto je využití pro techniku prostředí popsáno spíše okrajově v kapitole 3.2.3. V této kapitole je popsáno energetické využití solárních komínů formou výčtu a popisu hlavních možností využití, které je ovšem možné modifikovat a navzájem kombinovat, takže zde nemohou být uvedeny všechny možnosti a jedná se spíše o nástin možností využití. Na začátku popíšeme zatím jediný příklad využití v praxi.

4.1 Projekt v Manzanares

Tento solární komín byl postaven v roce 1982 u Manzanares v jižním Španělsku, z leteckého pohledu na obrázku 4-1. Projekt byl zaplacen z fondů Německého Ministerstva Výzkumu a Technologií (BMFT) se spoluprací s UNION ELECTRICA S.A. Projekt měl trvat původně pouze 3 roky, ale prodloužil se až do roku 1989, kdy silná bouře strhnula komín, který nebyl pro tuto délku projektu původně navržen. Zařízení dokonce běželo v periodě mezi 1986 a 1989 úplně automatizovaně a dodávalo energii průměrně 8,9 h denně a to bez jakékoliv odstávky. Cílem projektu bylo ověření teoretických konceptů a vliv jednotlivých částí projektu na účinnost a výkon komína a jejich chování v reálných podmínkách, dále ověření možnosti plně automatizovaného provozu při zachování vysoké spolehlivosti a dále zaznamenat a vyhodnotit výsledky dlouhodobých měření provozních veličin.[21]

4.1.1 Parametry a konstrukce

Zvolen byl špičkový výkon komína 50 kW, komín byl vysoký 194,6 m, jeho průměr byl 5,08 m a průměrný poloměr kolektoru byl 122 m (nebyl totiž kruhový), průměrná výška kolektoru byla 1,87 m, plocha kolektoru byla cca 46000 m^2. Jedna horizontální turbína měla průměr 5 m, otáčky při provozu do sítě byly 100 ot/min a její účinnost byla 83 %. Manzanares vyrobil ročně cca 44 MWh energie. Teplotní diferenciál byl zvolen vysoký, kvůli vyšší přesnosti měření, ale také snížil celkovou účinnost kolektoru na pouhých 32 %, a byl 17 K, rychlost proudění na turbínách dosahovala rychlostí kolem 12 $m.s^{-1}$.

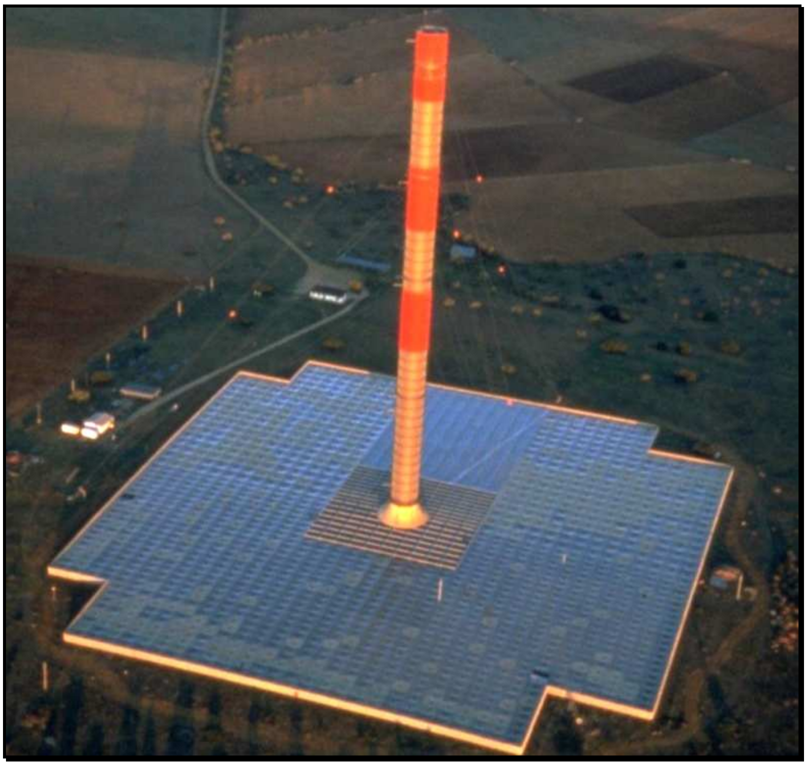
Jako materiálu pro komín byly použity místo betonu 10 m vysoké roury z 1,25 mm tlustého plechu s vyztužovacími prstenci naskládané na sebe a zajištěné soustavou 3 skupin kotvících lan. Železobeton byl použit pouze pro 10 m vysokou základnu ve které byla umístěna horizontální turbína se čtyřmi nastavitelnými lopatkami. Pro kolektor bylo použito částečně sklo, které se i přes vyšší pořizovací náklady dlouhodobě osvědčilo, a částečně také tvrzené PVC fólie, které se ovšem působením povětrnostních vlivů trhaly a neměly tak účinný samočistící efekt jako sklo. V dnešní době je PVC již nahraditelné modernějšími materiály s lepšími fyzikálními vlastnostmi. Dále bylo použito polyesteru s PVF filmem, který měl vhodné vlastnosti. Většina konstrukčních prací byla provedena

na místě vyškolenými pracovními silami, což bylo výhodné pro místní ekonomiku.[9][10]

4.1.2 Provoz a výsledky projektu

Parametry projektu byly navrženy tak aby bylo možné získat reprezentativní výsledky i pro další možné klimatické oblasti. Byla zvolena podnebná oblast svými vlastnostmi velmi podobná pouštím a stepím. Stavba se nacházela ve větrné (až 30 m/s) a prašné oblasti, což negativně ovlivňovalo intenzitu dopadajícího záření, která se proto pohybovala nejčastěji jen do 900 W/m^2. Albedo přirozeného povrchu bylo v pozdější fázi projektu vylepšeno tenkou vrstvou bitumenu a nebo uhelného dehtu, rostliny, které začali samovolně růst pod kolektorem, též zlepšovali absorpci přirozeného povrchu. Díky vysokému ΔT dosahovala kolem poledne teplota půdy až 70 °C a toto teplo postupně prostupovalo svrchní vrstvou půdy a večer, když byla teplota povrchu nižší než vrstvy pod ní, tak teplo postupovalo vzhůru a ohřívalo svrchní vrstvu a vzduch nad ní. Projekt, pokud neuvažujeme tepelnou kapacitu půdy, ovšem postrádal další akumulátory tepelné energie, takže jeho okamžitý výkon korespondoval s okamžitým výkonem dopadajícího slunečního záření, neboť naměřená konduktivita půdy, která by tento výkon pohlcovala, byla menší než u modelů. To způsobovalo často kolísavou dodávku (až 20 %) energie v průběhu dne. To je ovšem řešitelné přidáním absorpčního média a efektivnější regulací natáčení lopatek turbíny.

Výsledkem projektu bylo, že tento zatím jediný solární komín v takovém měřítku, prokázal velmi vysokou spolehlivost, tedy nízkou poruchovost jeho součástí, a že modely používané pro výpočty provozních a konstrukčních parametrů jsou dostatečně přesné pro vyhodnocování dalších projektů ve větším měřítku.[9][10][21]



Obrázek 4-1 Prototyp v Manzanares

4.2 Využití pro výrobu energie

4.2.1 Současný stav

V současné době působí na trhu tři hlavní společnosti zabývající se výzkumem, návrhy, získáváním investorů a propagací solárních komínu. Jsou to Schlaich Bergermann und Partner, GreenTower Ltd. a Enviromission Inc.

Schlaich Bergermann und Partner

Tato úspěšná německá konstruktérská kancelář se zabývá strukturálním inženýrstvím a jednou z jejích specializací jsou také solární tepelné elektrárny. Společnost projektovala a poté spravovala projekt v Manzanares. V současnosti se v tomto oboru zaměřuje především na různé typy koncentračních solárních elektráren, ale solární komíny jsou stále součástí jejich portfolia solárních projektů. Především díky prof. Schlaichovi, který se svým týmem nadále zpracovává projekty 30÷200 MW solárních komínů pro rovníkové oblasti Afriky.[20]

GreenTower Ltd

Tato technologická společnost již od roku 1996 využívá pro svůj projekt solárních komínů v Namibii spolupráci s odborníky ze světových univerzit, především z Německa. Zpracovávala studii proveditelnosti na stavbu 1÷8 400 MW solárních komínů se zemědělsky využitelným skleníkem, zachycováním výparků a využitím vyrobené energie pro stavbu dalších komínů v okolí, kterou si zadala namibiská vláda a ocelářský sektor v oblasti. V současnosti získává finanční podporu na další fázi studií proveditelnosti. Nabízí projekt 400 MW, 1,5 km vysokých solárních komínů s 37 km^2 kolektorem s čehož by 25 km^2 bylo využito zemědělsky, především pro exporty do EU. Jeden takovýto kompletní solární komín by měl podle odhadů společnosti stát přibližně 600 mil. €, což je značně optimistický předpoklad.[8]

EnviroMission Ltd

Tato původně australská společnost, nyní sídlící v USA, se zabývá propagací, získáváním investorů a projektováním solárních komínů pro využití v Austrálii a USA. V Austrálii před několika lety získala předběžný kontrakt na stavbu 200 MW, 1 km vysokých solárních komínů. Poté byly tyto projekty zmenšeny na 50 MW komíny a s příchodem finanční krize byly přípravné projekty pozastaveny a až dosud nebyly získány dostatečné finanční prostředky pro stavbu. V USA probíhá získávání finančních prostředků, pozemků a povolení pro možnost stavby 200 MW solárních komínů v pouštních oblastech Arizony.[6]

4.2.2 Chladící věže a komíny

Idea solárních komínů vznikla právě při projektování co nejúčinnějších a největších chladících věží pro velké jaderné elektrárny, zde prof. Jörg Schlaich a jeho tým přišli s návrhem využít komínový efekt pro výrobu elektrické energie pomocí větných turbín.

Tato metoda tedy nadále zůstává možností využití principu, ale pokles účinnosti takto využité chladící věže či nadimenzování nové chladící věže, tak aby pokryla ztráty na účinnosti chlazení by výkonový zisk větrného motoru ekonomicky určitě nepokryl. Ekonomicky by bylo možné využít pouze chladící věže, které jsou v současných provozech předimenzovány, například kvůli rušení části bývalých výrobních bloků.

Umístění ve vysokých komínech určených pro odvod spalin je také možností, ale návratnost investice do úprav komínu a instalace turbíny s příslušenstvím by závisela na místních podmínkách a velmi pravděpodobně by nebyla pokryta ziskem z výroby elektřiny větrným motorem. Proto je takové využití vhodné spíše jako demonstrační ukázka funkčnosti principu nebo v nadstandartně efektivním ekologickém provozu výrobny či továrny, než jako seriózní možnost výroby energie.[18]

4.2.3 Výroba vodíku

Jako další možnost využití energie získané ze solárních komínů, stejně jako ostatních solárních technologií, je výroba vodíku elektrolýzou vody přímo na místě. Odpadá zde nutnost výstavby nákladné distribuční sítě v odlehlých stepních a pouštních oblastech vhodných pro výstavbu rozsáhlých solárních elektráren. Solární komín by tedy pracoval mimo rozvodnou síť. Vyrobený vodík by byl dopravován k tomuto určených kontejnerech do oblastí s poptávkou po vodíku, který není vyráběn petrochemickými metodami, které dnes vyrábí až 95 % světové produkce vodíku. Takto vyrobený vodík má totiž velmi vysokou čistotu, takže je vhodný pro použití například pro vodíkové palivové články. Elektrolytická metoda má sice menší účinnost (do 80 % z elektrické energie) než petrochemické metody, ale dosahuje vyšší účinnosti než katalitická termolýza nebo vysokoteplotní elektrolýza (do 50 % z tepelné energie), které ovšem vyrábí vodík přímo z nepřeměněného tepla, takže jejich celková účinnost, v porovnání se solárními komíny, je vyšší. Proto má tento způsob využití největší konkurenci právě v koncentračních solárních elektrárnách, které jsou ovšem pro výrobu vodíku prozatím, podobně jako solární komíny, teprve ve stádiu pilotního projektu Hydrosol-2, který je umístěný také ve Španělsku. Současná cena vodíku na světových trzích se pohybuje kolem 1,9 €/kg. Cena vodíku vyrobeného například v projektech od Greentower Ltd, při uvažování výstupní ceny elektřiny 1,5 €c/kWh, a při spotřebě 50 kWh/kg vodíku by měla být přibližně 75 €c/kg plus doprava na místo poptávky. Tato bilance se jeví jako rentabilní, ovšem častěji se uvádí výrobní cena 6 a více €c/kWh a tedy vodík v ceně 3 €/kg a vyšší, takže výroba vodíku při současných cenách vodíku není pro solární komíny ekonomicky výhodná.[3][8]

4.3 Možnosti kogenerace

4.3.1 Zemědělské využití

Experiment v Manzanares ve Španělsku, popsán v kapitole 4.1, ukázal, že rostliny pod kolektorem rostou rychleji a že se změnila i druhová skladba rostlin ve prospěch rostlin náročnějších na vlhkost vzduchu. Tak došlo ke zjištění, že prostředí vzniklé pod průsvitným kolektorem se chová jako běžný skleník, který navíc zachycuje také vlhkost,

která uniká z půdy přes noc. Tuto vlhkost v kombinaci s vyšší teplotou pak mohou využívat rostliny pro svůj růst. Proto se pro zlepšení ekonomické návratnosti nabízí možnost využití půdy pod kolektorem pro pěstování rostlin vhodných pro vzniklé prostředí a to často i na před tím špatně zemědělsky využitelných půdách. V oblastech s nevhodnými půdami je také možné navézt vrstvu kvalitního humusu, který má lepší schopnost udržovat vlhkost a zvýšit tak zemědělskou produkci až o 170 % vůči intenzivnímu zemědělství na již zabrané půdě. Ovšem kvůli vyšším rychlostem proudění vzduchu u středu kolektoru a také vysokým teplotám tu není vhodné místo pro pěstování rostlin, ty by byly umístěny asi ve 1/3 vzdálenosti od středu. Pro zachování výkonu solárního komína je nutné pouze zachovat dostatečnou výšku kolektoru od země. Pod klasickým skleníkem také často vzrůstá teplota natolik, že se rostliny musí nákladně chladit vodou, ovšem v kolektoru solárního komína jsou chlazeny přímo proudícím vzduchem. Rostliny navíc zvyšují účinnost kolektoru díky jejich nižším ztrátám vyzařováním.

Další možností je také instalace nádrží s vodou pod kolektor pro pěstování jedlých řas nebo řas pro výrobu biopaliv a nebo pěstování ryb v sádkách, které zároveň slouží i jako kapacitory pro uskladnění tepla. Při průměrné výšce vodní hladiny 1,2 m by navíc byla uložena tepelná energie na více než 6 dnů nominálního provozu.[1][5][8]

4.3.2 Umístění fotovoltaických panelů

V případě nutnosti lepšího využití plochy pro výrobu energie na ploše kolektoru je možné pod kolektor instalovat fotovoltaické panely, čímž se zvýší účinnost obou systémů, protože fotovoltaické panely při své funkci produkují ztrátové teplo, které zároveň snižuje účinnost těchto panelů. Proudění vzduchu pod kolektorem tyto panely může ochlazovat a zároveň se ohřeje vzduch pod kolektorem, což zvýší účinnost kolektoru i panelů. Nevýhodou je, že část energie slunečního svitu je ztracena přechodem přes membránu kolektoru. V oblasti kolem středu kolektoru to ovšem není příliš významná ztráta, neboť účinnost kolektoru směrem k jeho středu klesá. Zemědělské využití a FV panely se dají i kombinovat, například umístěním panelů ke středu kolektoru, tedy tam kde není vhodné rostliny pěstovat, a zbytek plochy využít zemědělsky. Pro vyšší účinnost panelů je ovšem vhodnější je umístit spíše k okrajům kolektoru.[1]

4.3.3 Městské využití

Nabízí se také možnost využití solárních komínů ve městech. Ať už jako součást konstrukce středu mrakodrapu, kde je kolektorem a zároveň komínem prosklená budova nebo pokrytí plochy mezi budovami kolektorem nebo více vrstvami kolektorů na nichž jsou instalovány komíny. Toto řešení nabízí produkci energie plus zlepšení městského prostředí, především odstraňováním nízkých vrstev znečištěného vzduchu v ulicích. Ve studených oblastech by jedna vrstva kolektoru zvýšila teplotu vzduchu ve městě, což by snížilo náklady na vytápění a v teplých oblastech by dvojitá vrstva kolektoru s polopropustnou membránou z FV panelů vyráběla energii a zároveň snižovala množství slunečního svitu dopadajícího do ulic města, čímž by se snížila teplota vzduchu ve městě a komín by navíc zvyšoval přirozené proudění vzduchu. Tato řešení jsou ovšem kvůli jejich ekonomické náročnosti vhodná pouze pro velmi znečištěná a zalidněná města, kde

by se stavba v tak velkém měřítku mohla ekonomicky vyplácet ve formě výrazného zlepšení životního prostředí ve městě.[1]

4.3.4 Odsolování mořské vody

Solární komín je možno pouze s malými úpravami použít i jako systému pro odsolování mořské vody. Postup odsolování v klasickém komíně vypadá následovně. Do kolektoru se vpustí vrstva mořské vody, která je působením tepla odpařována a vlivem proudění vzduchu je výparek odnášen do komína, kde je vzduch využit pro turbíny a výparek společně se vzduchem vystupuje na vrchol komína, kde je umístěn kondenzátor par, ve kterém se působením chladného vzduchu z okolí komína výparek zkondenzuje a je odveden do potrubí, které navíc může vést tuto vodu na malou vodní turbínu umístěnou u paty komína, kde se využije potenciální energie odsolené vody. Tento typ komína vyrobí méně energie, protože dochází k tepelným ztrátám v kolektoru kvůli odpařování mořské vody, tyto ztráty se dají částečně vyrovnat zpětným využitím energie z potenciálu vody. Tento typ komína je tedy především vhodný pro oblasti s nedostatkem pitné vody, ale s blízkým zdrojem mořské vody. Cena takto odsolené vody by se měla, při započtení vyrobené energie a navýšení počátečních nákladů, vyrovnat či být levnější než ostatní metody odsolování.[1][26]

5 Ekonomické vyhodnocení

Otázka ekonomičnosti provozu solárních komínů je náročná kvůli absenci komerčního provozu takovéto stavby v současnosti či minulosti, samozřejmě kromě solárních komínů určených ke klimatizaci a větrání, které mají své využití po celém světě a jejich ekonomický potenciál je dobrý, především díky výrazným úsporám na elektrické energii pro kompresory či v případě společného využití komínů a umělé klimatizace pro jednotky na úpravu vzduchu.

V této kapitole budeme pracovat s komíny pro výrobu elektrické energie, které mají odlišnou konstrukci a proto ceny a metody zde uvedené budou většinou kvalifikované odhady vycházející z uvedených prací. Konkrétní ekonomika provozu v praxi se může značně odlišovat. Porovnávání s projektem v Manzanares, viz kapitola 4.1, nám nemůže s ekonomického hlediska posloužit, neboť se jednalo pouze o výzkumný projekt ukončený před více než 20 lety.

5.1 Návrh parametrů

Z hlediska účinnosti zvolíme nejčastěji uvažovaný komín s výškou 1000 m. Samotná výška stavby, i když jistě závratná, je plně v možnostech dnešních stavebních metod a dostupných materiálů, příkladem může být věž pro komerční účely Burj Dubaj, která má výšku 882 m. Komín umístíme do pro něj nejvhodnější oblasti za kterou je považována poušť Kalahari a Namib (Projekt 1) s průměrnou přízemní roční teplotou T_0 25 °C. Pro srovnání zvolíme ještě komín o výšce 500 m s menší plochou kolektoru a tedy nižšími nároky na zabranou plochu (Projekt 2). Tento komín umístíme do klimatické oblasti odpovídající Jižní Evropě, konkrétně jižního Španělska, kde je průměrná přízemní teplota T_0 15°C. Parametry obou spočteme ze známých vztahů postupem popsaným níže.

Poloměr komína R zvolíme dle vztahu (2.13). Poloměr kolektoru r spočteme podle námi požadovaného maxima výkonu P_M dle upravené rovnice (5.1). Výkon sice roste proporcionálně s plochou kolektoru, ale pro zvýšení výkonu je vhodnější spíše zvyšovat komín než zvětšovat poměrně drahý kolektor. Upravená rovnice pro výpočet poloměru kolektoru je:

$$r = \sqrt{\frac{3 \cdot P_n \cdot c_p \cdot T_0}{2 \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{fr} \cdot \eta_t \cdot \eta_k \cdot g \cdot H \cdot \pi \cdot I_M}} \tag{5.1}$$

kde při výpočtu použijeme nejlepších možných turbín a generátorů (η_{gen} = 0,95 a η_t = 0,90), účinnost kolektoru s vegetací uvažujeme η_k = 0,45. Jelikož je parametr světlosti dle (2.13), při výšce kolektoru 5 m nad zemí, větší než 6, tak můžeme dosadit η_{fr} = 0,9. Dosazujeme maximální průměrnou denní intenzitu záření I_M, neboť uvažujeme rovnoměrné denní rozložení výkonu díky vysoké tepelné kapacitě kolektoru s kapacitním médiem.

Plocha kolektoru pak odpovídá ploše kruhu méně horizontální plocha komína a ústí kolektoru, tedy:

$$S_k = \pi \cdot (r^2 - (2R)^2) \tag{5.2}$$

Z nyní známé plochy kolektoru můžeme vypočítat celkovou vyrobenou energii za rok dle upravené rovnice:

$$A = \eta_{gen} \cdot \eta_{fr} \cdot \eta_t \cdot \eta_k \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{g \cdot H \cdot S_k \cdot G}{c_P \cdot T_0} \tag{5.3}$$

kde dosadíme parametr G, což je celková dopadající sluneční energie na m² za rok, která je odečtena z mapy v databázi SoDa pro zvolené oblasti, dle [22]. Výsledek tohoto výpočtu je zjednodušením skutečné situace, pro přesnější údaj by bylo nutno použít komplexní tepelný a geometrický model s parametry místních podmínek v průběhu celého roku. Všechny vypočtené, zvolené a zjištěné parametry jsou zaokrouhleny na celá čísla a jsou uvedeny v tabulce 5-1.

Tabulka 5-1: Parametry zvolených solárních komínů

Parametr	**Projekt 1**	**Projekt 2**
výška komína - H [m]	**1000**	**500**
poloměr komína - R [m]	**110**	**70**
poloměr kolektoru - r [m]	**2440**	**1170**
plocha kolektoru – S_k [m²]	**18 672 370**	**4 269 110**
maximální průměrná denní intenzita záření – I_M [W/m²]	**400**	**350**
sluneční energie za rok - G [kWh/m²]	**2700**	**2300**
maximální výkon – P_M [MW]	**50**	**5**
vyrobená energie za rok - A [GWh]	**387**	**39**

5.2 Ekonomika provozu

Jelikož se jedná o velmi komplexní problematiku, která vysoce překračuje možnosti této práce, bude většina metod výpočtů a většina cen v této části převzata z dokumentu [7], který srovnává starší modely výpočtů a cen nejvýznamnějších prací z tématiky solárních komínů a zavádí přesnější metodiku, neboť rozdíly dřívějších odhadů se často liší až trojnásobně a neodpovídají tak současným podmínkám.

Investiční náklady určíme podle zjednodušujícího vzorce:

$$K_i = A \cdot 2\pi \cdot R \cdot H + B \cdot S_k + C \cdot P_M \quad [9] \tag{5.4}$$

kde parametr A je cena komína na m², B je cena kolektoru na m² a C je cena výrobní části na kW.

Parametr A jsme vypočetli z údajů uvedených v [7] a [21] se započtením průměrné inflace na současnou hodnotu 225 €/m². Parametr B při použití skla je dle [7] 36 €/m² a pro plastové pokrytí je dle [21] 9 €/m². Parametr C je dle [7] 421 €/kW, a to při použití 22 vertikálních uzavřených turbín rozložených po celém obvodu komína. Uvedené parametry v sobě zahrnují veškeré náklady na stavbu, dopravu, pracovní síly a ostatní náklady. Budou použity pro oba projekty, ovšem vzhledem k menšímu rozsahu druhého projektu a jeho lokalizaci v oblasti s vyšší cenou pracovních sil mohou být pravděpodobně vyšší.

Investiční náklady na komín, kolektor a výrobní část jsou spočteny dle vztahu (5.4). Pro kolektor Projektu 2 použijeme plastické hmoty ke snížení pořizovací ceny kolektoru. Použitím plastických hmot se snižuje samočistící schopnost kolektoru vůči sklu, což by ale z hlediska zvolené oblasti neměl být výrazný problém. Výrazně také klesá celková životnost kolektoru, vůči sklu více než čtyřikrát, což je poměr pořizovacích cen, tuto skutečnost zohledníme ve zvýšení nákladů na údržbu a tedy i na postupnou výměnu pokrytí. Volba méně odolného materiálu je opodstatněná také proto, že ve zvolené oblasti se nedá očekávat plné využití životnosti projektu. Vypočtené investiční náklady na jednotlivé části komína jsou uvedeny v tabulce 5-2 níže.

Tabulka 5-2: Vypočtené investiční náklady

	Projekt 1	**Projekt 2**
Komín [mil. €]	**155,5**	**49,5**
Kolektor [mil. €]	**672,2**	**38,4**
Výrobní část [mil. €]	**21,1**	**2,1**
Celkem - K_i [mil. €]	**848,8**	**90**

V tabulce 5-1 vidíme, že výška komína má největší vliv na nominální výkon a vyrobenou energii. Například při zvýšení komína o 100 m a zachování dalších parametrů Projektu 1 by se vyrobená energie zvýšila o 10 %, ke stejnému efektu bychom dospěli při zvětšení kolektoru o téměř 1,9 km^2, což činí značný rozdíl v pořizovací ceně. Zvýšení komína by stálo cca 16 mil. € a zvětšení kolektoru již cca 67 mil. €, tedy čtyřnásobně více. Tuto zákonitost nám ilustruje také Projekt 2, který má poloviční komín a čtvrtinový kolektor a vyrobí přesto desetkrát méně energie. Z tabulky 5-2 také vidíme, že největší vliv na celkové náklady má cena kolektoru, která zahrnuje celých 65 % z celkových nákladů. Vliv na její snížení použitím levnějších materiálů s nižší životností ilustruje Projekt 2, kde náklady na kolektor činí pouze 35 % z celkových nákladů.

Náklady na údržbu a provoz v prvním roce jsou odhadovány na 0,5 % z celkové pořizovací ceny, ve výpočtech označováno jako procento údržby a provozu p_u. Pro Projekt 2 je p_u zvoleno 1 % neboť se nachází v oblasti s vyšší cenou práce a materiálů. Do pořizovací ceny nejsou započteny náklady na potřebné pozemky, které jsou ovšem ve zmíněných oblastech relativně velmi levné a neměli by se výrazněji podílet na pořizovacích nákladech.

Současnou hodnotu nákladů na údržbu a provoz po celou dobu provozu N_{Pc} vypočteme dle rovnice:

$$N_{Pc} = \frac{\frac{p_u}{100} \cdot K_i}{i_{\inf} - i}\left[\left(\frac{1+i_{\inf}}{1+i}\right)^n - 1\right] \quad [7] \qquad (5.5)$$

kde p_u je procento údržby a provozu, i je úroková míra, $i_{\inf}$ je míra inflace a n je délka splácení úvěru.

Výrobní cenu elektřiny CE vypočteme z poměru ekvivalentních nákladů na údržbu

a provoz EKN, které zahrnují náklady na údržbu a provoz po dobu splácení investice a také náklady na splátky, a vyrobené energie A dle vztahu:

$$\mathrm{CE} = \frac{\mathrm{EKN}}{\mathrm{A}} \quad [7] \tag{5.6}$$

kde EKN vypočteme dle vztahu:

$$EKN = (K_i + N_{Pc} - P_{co}) \cdot \left[\frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad [7] \tag{5.7}$$

kde P_{co} je současná hodnota zisků z prodeje ušetřených uhlíkových kreditů.

Jelikož je provoz solárního komína nezatížen emisemi skleníkových plynů, tak lze jeho provozem šetřit uhlíkové kredity, které je možno prodávat na trhu s emisními povolenkami. Samotná stavba solárního komína sice tyto emise produkuje, ale dle [9] je doba energetické a tedy i uhlíkové návratnosti (primární energie pro stavbu uvažujeme čistě z fosilních zdrojů) cca 7 let. Tuto energii ve výpočtu získaných uhlíkových kreditů zanedbáváme neboť je již zahrnuta v celkových investičních nákladech. Zisk z prodeje uhlíkových kreditů za rok je pak při uvažování 0,95 kg CO_2 na kWh z průměrné uhelné elektrárny a průměrné ceně 16 €/t CO_2 (průměrný údaj z roku 2008, v roce 2009 došlo vlivem ekonomické krize k poklesu na cca 12 €/t). Projekt 1 takto ušetří 367 tis. tun CO_2 ročně, což je 5,9 mil. € a pro Projekt 2 to je 593 tis. €. Současná hodnota zisků z prodeje emisních povolenek za dobu splácení investice je vypočtena dle:

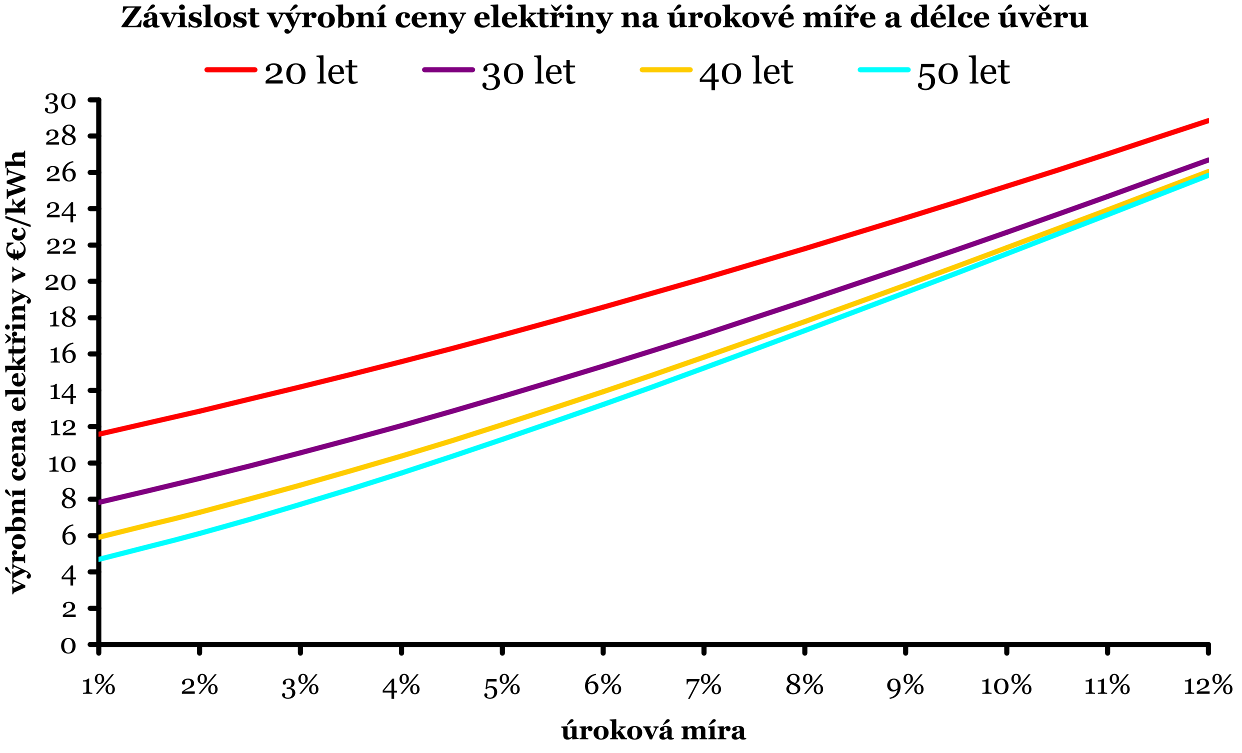
$$P_{co} = \frac{5{,}9 \cdot 10^6}{i_{\mathrm{inf}} - i} \left[\left(\frac{1 + i_{\mathrm{inf}}}{1+i} \right)^n - 1 \right] \tag{5.8}$$

Ve výpočtech je uvažována míra průměrné inflace 3 %, což odpovídá dlouhodobému průměru pro vyspělé země v období mimo ekonomické krize.

Doba životnosti solárního komína je omezena především životností turbín a generátorů, pro které se dá uvažovat doba životnosti vyšší než 80 let podobně jako u velkých vodních elektráren. Pokud bychom na konci tohoto období obměnili tyto komponenty, tak můžeme dosáhnout provozu mnohem delšího, odhady hovoří i o více než 200 letech, především díky masivnímu komínu z posíleného železobetonu a průběžně obměňovatelnému kolektoru složeném převážně ze skla, betonu a oceli. Provoz po uplynutí doby splácení již bude zatížen pouze náklady na údržbu a současná výrobní cena elektřiny, díky prodeji uhlíkových kreditů bude pro Projekt 1 znamenat automatický zisk za každou vyrobenou kWh, celkem to bude 0,04 €c/kWh a pro Projekt 2 bude již v červených číslech, díky vyšší ceně údržby, a to 0,07 €c/kWh. Pokud do této bilance nezahrneme zisk z uhlíkových kreditů tak výrobní cena bude pro Projekt 1 pouhý 1 €c/kWh a pro Projekt 2 už 2,3 €c/kWh. Uhlíkové kredity činí pokles CE o 2÷3 €c/kWh v průběhu splácení investice a po splacení investice by byly tyto zisky schopny financovat téměř veškeré náklady na provoz a údržbu. Provozní náklady jsou totiž velmi nízké a po splacení investice je tedy CE také velmi nízká, menší než u fosilních zdrojů a při stálé výkupní ceně je tak velmi výhodná pro investora.

5.3 Financování a rentabilita investice

Jelikož je doba životnosti solárního komína velmi dlouhá, tak také doba pro splácení úvěrů získaných na stavbu projektu bude muset být nutně nižší (kvůli vysokým investičním nákladům by měla být ideálně co nejdelší s co nejmenším úrokovým zatížením). Neznáme také úrokovou míru pro úvěr na podobnou stavbu, nejpravděpodobnější je financování více investory z bankovního sektoru pomocí úvěru s omezeným ručením spláceného přímo ze zisků projektu s ručením pouze na samotný projekt. Investoři budou ovšem požadovat určité procento výnosnosti po projektovanou dobu životnosti. Proto provedeme analýzu výrobní ceny elektřiny při proměnné úrokové míře a při různých dobách splácení úvěru, a to 20, 30, 40 a 50 let, abychom získali přesnější představu o ekonomické návratnosti investice do solárních komínů. Ve výpočtech je nadále uvažována míra průměrné inflace 3 %. Výsledky této analýzy pro Projekt 1 můžeme vidět na obrázku 5-1 a pro Projekt 2 mají stejný průběh, ale jsou o 2,2÷2,8 €c/kWh vyšší. Zisky z prodeje emisních povolenek jsou zde zahrnuty také, pokud by zahrnuty nebyly tak CE vzroste u obou projektů opět o dalších cca 2÷3 €c/kWh v závislosti na parametrech financování.



Obrázek 5-1 Závislost CE na úrokové míře a délce úvěru pro Projekt 1

Výrobní ceny jsou pro odpovídající regiony relativně vysoké, ale odpovídají ceně ze solárních zdrojů, které často potřebují ke své správné ekonomické funkci další dotace. Cena vyrobené energie by ovšem poklesla v případě výstavby vyššího komína a menšího kolektoru při zachování závislosti nákladů na materiálu.

Pro zjištění rentability investice provedeme také analýzu čisté současné hodnoty investice NPV v závislosti na požadované úrokové míře (procento výnosnosti pro inves-

tory) a výkupní ceně elektřiny. NPV bude vycházet z následujícího vztahu:

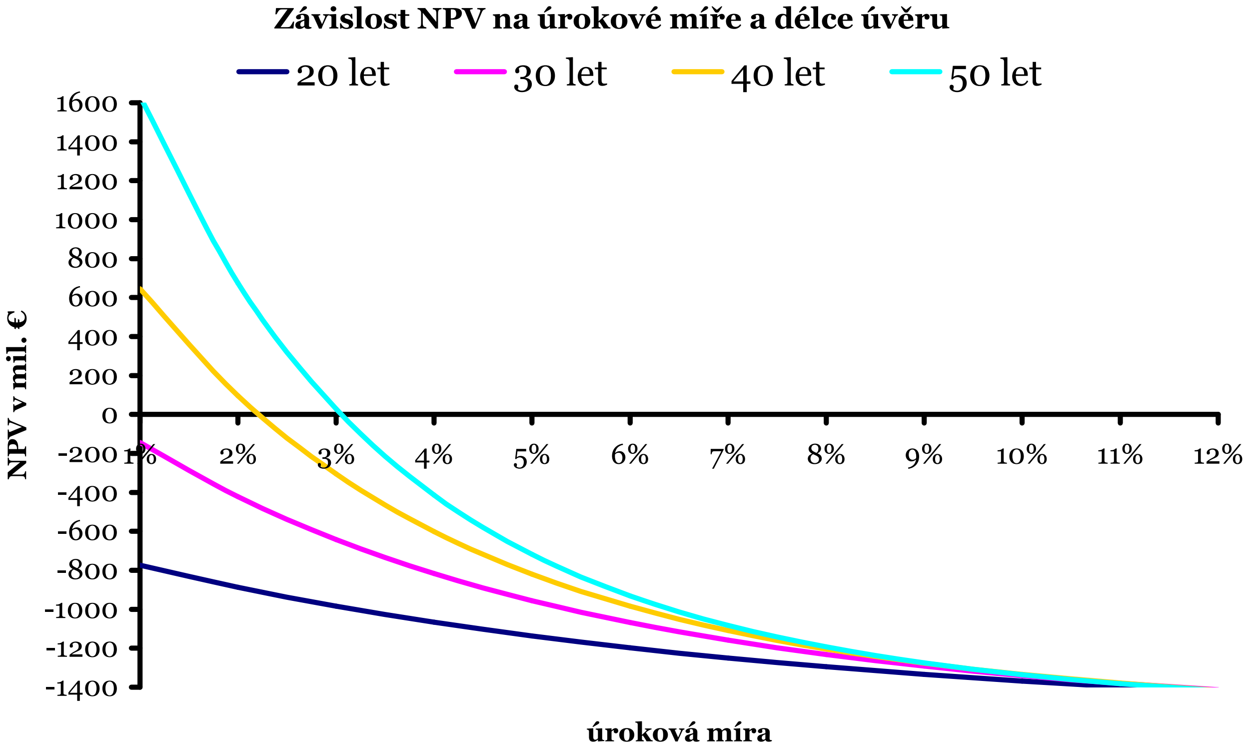
$$NPV = \frac{Z}{i_{\inf} - i} \cdot \left[\left(\frac{1 + i_{\inf}}{1 + i} \right)^n - 1 \right] - K_i \qquad (5.9)$$

kde Z je roční nezdaněný zisk projektu, který vypočteme pomocí rovnice:

$$Z = A \cdot (VKE - CE) + N_{odp} \qquad (5.10)$$

kde VKE je výkupní cena energie, CE je příslušná výrobní cena energie a N_{odp} jsou náklady na odpisy. Náklady na odpisy jsou spočteny pro poslední odpisovou skupinu při rovnoměrném odepisování, která je na dobu 50 let.

Pro analýzu si zvolíme výkupní cenu energie 8 €c/kWh, která odpovídá VKE pro nedotované zdroje u nás. Výsledek této analýzy pro Projekt 1 vidíme na obrázku 5-2.



Obrázek 5-2 Závislost NPV na úrokové míře a délce úvěru pro Projekt 1 při výkupní ceně 8 €c/kWh

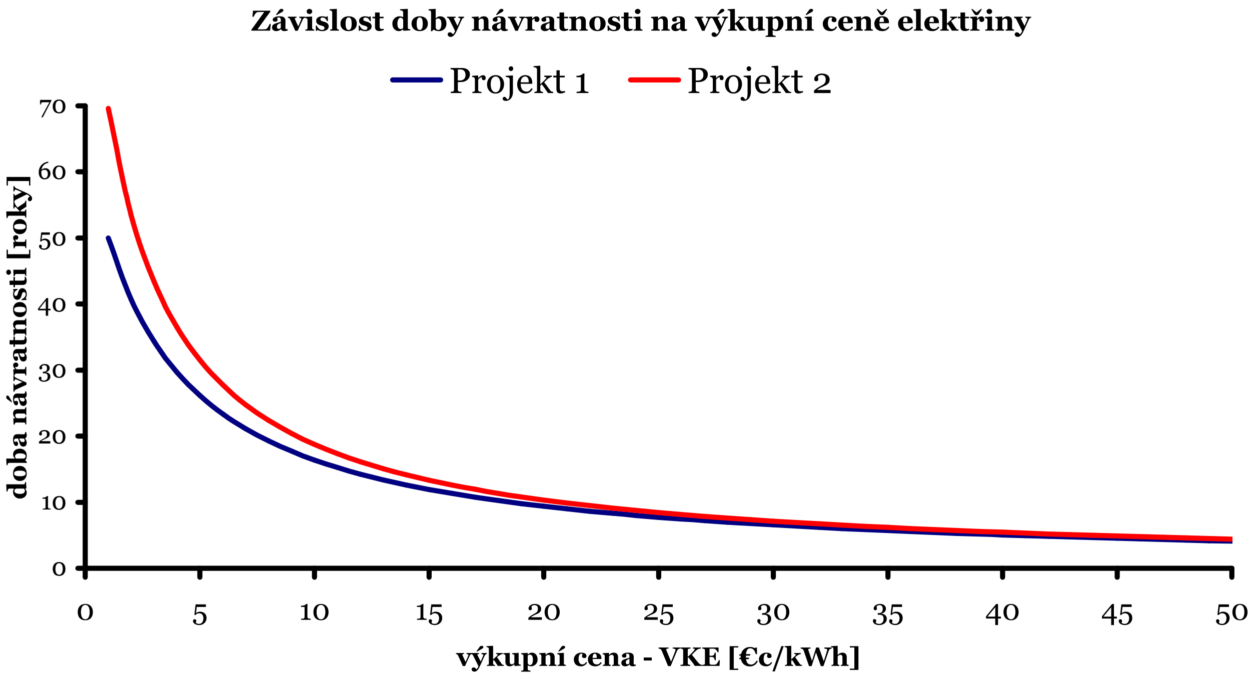
Investice s takto nastavenou výkupní cenou je schopna po dobu splácení vytvořit zisk pouze pro dobu splácení 40 a 50 let a to jen při nízké úrokové míře. Tedy pro téměř ideální financování by se investice po dobu 50-ti let zhodnocovala jen 3 %, což je uvažovaná míra inflace, takže investice není dostatečně rentabilní (obvykle požadujeme výnosnost vyšší než je míra inflace). Projekt 2 nedosáhne ani na tuto výnosnost, NPV je pro něj v kladných hodnotách pouze po 2%-ní úrokovou míru.

Doba návratnosti pro investora je bohužel pro vyšší požadovaná procenta výnosnosti velmi vysoká. V případě financování z vlastních zdrojů, tedy bez nutnosti vytvářet určité procento výnosnosti, jedná se pouze o dobu za jakou projekt vytvoří zisk, který pokryje investiční náklady, je doba návratnosti mnohem kratší. Orientační dobu návrat-

nosti PP spočteme pomocí následujícího vztahu:

$$PP = \frac{K_i}{Z + N_{odp}} \tag{5.11}$$

Tato doba návratnosti by při námi nastavené VKE 8 €c/kWh, bez daně ze zisku, byla u obou projektů pouze cca 18 let a pokud nezapočteme zisk z uhlíkových kreditů tak by byla 19 let pro Projekt 1 a 22 let pro Projekt 2, což je stále relativně krátká doba. Pro větší názornost provedeme výpočet doby návratnosti pro velký rozsah VKE. Výsledek pro oba projekty můžeme vidět na obrázku 5-3.



Obrázek 5-3 Závislost doby návratnosti na výkupní ceně elektřiny

Výkupní cena je zvolena v rozsahu mezi 1 €c/kWh a 50 €c/kWh, což odpovídá současné dotované výkupní ceně elektrické energie z fotovoltaických panelů u nás, tedy také energie získané ze slunečního záření. Doba návratnosti v závislosti na VKE je velmi podobná té z fotovoltaických panelů. Proto pro nižší VKE, které jsou reálné pro zvolené oblasti, je doba návratnosti relativně vysoká, takže tato investice není v podobě jak je nastíněna v této práci pro většinu investorů dostatečně rentabilní.

Pokud by se ovšem využil kolektor také k intenzivnímu zemědělství (viz kapitola 4.3.1), čímž by docházelo také k rekultivaci pouštní oblasti a vzniku několika tisícovek pracovním míst v zemědělství, tak by zisk z prodeje pěstovaných rostlin nejlépe do průmyslových zemí měl být schopen částečně pokrýt potřebné náklady na splátky a provoz v průběhu splácení investice či značně vylepšit dobu návratnosti a alespoň minimalizovat ekonomické ztráty investora i při pro něj nevhodných podmínkách financování. A navíc se také projekt stává velkým přínosem celému regionu. Investice nutná k zemědělskému využívání kolektoru by zvýšila investiční náklady o cca 6% a zároveň by v případě Projektu 1 vzniklo cca 1465 ha půdy pod skleníkem vhodné k využití velmi intenzivním zemědělstvím.[8]

6 ZÁVĚR

6.1 Splnění cílů práce

V této podkapitole se budeme věnovat shrnutím zvolených cílů práce.

1) Rozbor problematiky solárních komínů

V rámci tohoto cíle byla provedena rešerše dostupných zdrojů zabývajících se touto problematikou. Na začátku práce jsme zpracovali úvod do funkčního principu solárních komínů pomocí fyzikálních vztahů, které jeho funkci popisují. Dále byly solární komíny rozčleněny podle konstrukce a principu mezi komíny určené pro výrobu elektrické energie a komíny určené k větrání a klimatizaci. Komíny pro výrobu elektrické energie byly dále rozčleněny do tří skupin z nichž nejvýznamnější jsou vzestupné komíny, které jsou rozebírány nejpodrobněji, okrajově si všímáme také solárních plovoucích a spádových komínů. Komíny pro větrání a klimatizaci jsou také popsány z hlediska jejich principu, konstrukce a použití.

2) Možnosti využití principu solárních komínů

V rámci tohoto cíle byla popsána možnost praktického využití solárních komínů pro větrání a klimatizaci i v České republice. Dále jsou popisovány možnosti využití komínů pro energetiku. Podrobně je zde popsán zatím jediný prototyp solárního komína pro výrobu energie v Manzanares ve Španělsku. Také je popsán současný stav projekčních kanceláří a firem zabývajících se touto problematikou. Vylíčeny jsou také možnosti jak využít komíny pro nepřímou výrobu vodíku a pro výrobu energie v chladících věžích a komínech. Velká pozornost je věnována také kogeneračním možnostem solárních komínů, především zemědělskému využití kolektoru a odsolování vody.

3) Ekonomická analýza solárních komínů

V rámci tohoto cíle byl proveden návrh dvou zvolených srovnávací projektů solárních komínů, pro které byla zpracována ekonomika provozu a byly analyzovány a diskutovány možnosti financování. Dále bylo provedeno zhodnocení rentability těchto projektů, které se bohužel projevily jako neatraktivní pro investora.

6.2 Návrh dalšího postupu

Rozsah této práce nedovoloval věnovat se mnohým tématům spojených se solárními komíny a také nedovoloval podrobnější analýzu, proto je návrh dalšího postupu nasnadě. Postupovat dále by bylo možno zpřesněním některých údajů a parametrů v této práci přebíraným či odhadovaných, především se nabízí zpracování podrobného tepelného a geometrického modelu pro simulaci chování proudění v kolektoru a komíně, především za účelem zjištění přesnějších provozních parametrů při změnách okolního prostředí pro kolektor s různými tepelnými kapacitami a zpřesnění množství vyrobené energie za určité období. A dále by se měla zpracovat ekonomická analýza s využitím modelu popsaného výše u investice do solárního komína se zemědělsky využitelným kolektorem, což by mělo mít teoreticky velký vliv na atraktivitu takovéto investice.

Další možností postupu by bylo zpracování strukturální analýzy stavby a chování samotného komína vyššího než 1 km především s důrazem na snížení investičních nákladů při zachování jeho funkce.

6.3 Závěr práce

Solární komíny zatím nebyly, i přes to že se jedná o už asi o 30 let starý princip výroby energie, stále komerčně využity, a to i přes úspěšný projekt v Manzanares, který prokázal, že tento způsob výroby energie je ve větších měřítcích technicky uskutečnitelný i se současnými stavebními technologiemi.

Možnosti užití solárních komínů spočívají především v oblasti techniky prostředí, a to ať už pro zlepšení ekonomiky provozu větracích systémů či jako pomoci při úpravě vzduchu v budovách. Další hlavní možností užití je kombinace solárního komína pro výrobu energie s kolektorem využitelným pro intenzivní zemědělství, popřípadě současně s odsolováním mořské vody. Další možnosti využití této technologie v chladících věžích, či komínech nebo k výrobě vodíku pomocí elektrolýzy přímo na místě se z ekonomického hlediska jeví jako nevýhodné. Využití pro výrobu energie bez dalšího využití zabrané plochy je také ekonomicky nerentabilní.

Samotný princip solárních komínů pro výrobu energie má ovšem mnoho specifických vlastností, které nám jeho využití nabízí. Především je to jeho jednoduchý princip činnosti, nízká náročnost na údržbu a velmi nízká poruchovost, které dávají možnost plně automatizovanému provozu. Dále může pracovat se stálým dodávaným výkonem díky akumulaci získaného tepla ze slunečního záření v kolektoru i po několik dnů bez ohledu na počasí. A společně s možností dalšího užití kolektoru pro zemědělství či odsolování vody se tak dá využít pro zásobování izolované oblasti jídlem, pitnou vodou a elektrickou energií i v ostrovní rozvodné síti. A zároveň je to také ekologický způsob výroby energie, který nevypouští při provozu CO_2 a jeho uhlíková návratnost je pouze 7 let. Jeho stavba je také nenáročná na použité materiály, protože hlavní složky jsou beton a sklo a ty mohou být vyrobeny přímo v dané oblasti a stejně jako zemědělsky využitý kolektor vytváří množství pracovních míst pro nekvalifikovanou pracovní sílu. Zároveň je také základní konstrukce solárního komína velmi odolná a má tak velmi dlouhou životnost. Jeho hlavní nevýhodou jsou ovšem velmi vysoké počáteční investiční náklady a jeho velmi nízká účinnost přeměny sluneční energie na elektřinu se kterou je spojena nutnost využití větší plochy k vyrobení stejného množství energie jako jiné technologie. Tato plocha ovšem může být využita i k dalším účelům.

Ekonomika provozu v této práci ukazuje, že výrobní cena elektrické energie získané v solárním komíně, který není nijak jinak využit, bude díky nutnosti splácení počáteční investice relativně vysoká, ale v případě jeho dalšího využití by měla dostatečně poklesnout. Samotná doba návratnosti v porovnání z celkovou dobou životnosti je pak relativně nízká, a jestliže uvážíme i těžko vyčíslitelný dlouhodobý přínos pro rozvojový region ve formě spolehlivé dodávky čisté energie, pracovních míst a potravin nezbývá, než takovýto projekt podpořit, i když jeho ekonomický přínos není pro investora okamžitý a je nutná vyšší počáteční investice.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] BOSSCHAERT , Tom. Solar Updraft Towers: Variations and Research [online]. 2008 , 7. říjen 2008 [cit. 2009-11-17]. Eng. Dostupný z WWW: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2008/10/solar-updraft-towers-variations-and-research-53742>.

[2] Deutsches Windenergie-Institut GmbH Germany, Tech-wise A/S Denmark, DM Energy United Kingdom. Wind Turbine Grid Connection and Interaction. ENERGIE [online]. 2001 [cit. 2010-03-04]. Dostupný z WWW: <http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/wind_energy/maxibrochure_final_version.pdf>.

[3] DOTY, David F. A Realistic Look at Hydrogen Price Projections. *Doty Scientific* [online]. Mar. 11, 2004, [cit. 2010-04-01]. Dostupný z WWW: <http://www.dotynmr.com/PDF/Doty_H2Price.pdf>.

[4] ELLIOT, Tom. Passive Air Conditioning [online]. [2007] [cit. 2009-11-17]. Eng. Dostupný z WWW: <http://www.thefarm.org/charities/i4at/lib2/aircool.htm>.

[5] Enviroment party. Brief Proforma for a Solar Updraft Tower Algae Biosphere [online]. 2006 [cit. 2009-11-17]. Eng. Dostupný z WWW: <http://environmentparty.org/node/10>.

[6] EnviroMission Limited. *EnviroMission Limited : clean, green renewable energy* [online]. c2010 [cit. 2010-04-04]. Dostupné z WWW: <http://www.enviromission.com.au>.

[7] FLURI, T.P., et al. Cost analysis of solar chimney power plants. *Solar Energy* [online]. 2009, 83, 2, [cit. 2010-04-01]. s. 246–256. Dostupný z WWW: <doi:10.1016/j.solener.2008.07.020>.

[8] GreenTower Ltd. *Green Tower* [online]. 2008 [cit. 2010-03-18]. Dostupné z WWW: <http://www.greentower.net>.

[9] HAAF, W., et al. Solar Chimneys, Part I : Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares. *Solar energy*. 1983, 2, s. 3-20.

[10] HAAF, W. Solar Chimneys, Part II : Preliminary Test Results From the Manzanares Pilot Plant. *Solar Energy*. 1984, 2, s. 141-161.

[11] HAVRÁNEK, František. Solární komín - využití solárního komínu pro přirozené větrání budov. *3pól : Magazín plný pozitivní energie* [online]. Prosinec 2008, 4/2008, [cit. 2010-03-18]. Dostupný z WWW: <http://www.tretipol.cz/722-solarni-komin-vyuziti-solarniho-kominu-pro-prirozene-vetrani-budov>.

[12] Israel - India Steering Committee. Energy Towers : for Producing Electricity and Desalinated Water [online]. 2001. Fraunhofer IWES, 2007 [cit. 2009-11-04]. Eng. Dostupný z WWW: <http://www.iset.uni-kassel.de/abt/FB-I/projekte/new_et-brochure_zaslavsky.pdf>.

[13] KOONSRISUK, A.; LORENTE, S.; BEJAN, A. Constructal solar chimney configuration. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 15 January 2010, 53, 1-3, [cit. 2010-04-01]. Dostupný z WWW: <doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.026>.

[14] LIPING, Wang; ANGUI, Li A numerical study of vertical solar chimney for enhancing stack ventilation in buildings. In *Plea2004 : The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Eindhoven, The Netherlands : [s.n.], 2004 [cit. 2010-03-22]. Dostupné z WWW: <http://alexandria.tue.nl/openaccess/635611/p1145final.pdf>.

[15] MEYERS, C M. Towers of power : The solar updraft tower. Energize [online]. 2008 [cit. 2009-11-04], s. 51-54. Eng. Dostupný z WWW: <http://www.eepublishers.co.za/images/upload/03%20GT%20-%2004%20Towersbb.pdf>.

[16] PAPAGEORGIOU, Christos. SOLAR TURBINE POWER STATIONS WITH FLOATING SOLAR CHIMNEYS [online]. 2004 [cit. 2009-11-25]. Eng. Dostupný z WWW: <http://www.floatingsolarchimney.gr/Downloads/Documentation/paper1_2004.pdf>.

[17] Plán obnovitelných zdrojů energie : Příprava cesty k dosažení 20% podílu obnovitelných energií ve skladbě zdrojů energie v EU do roku 2020 [online]. Brusel : 2007 [cit. 2010-03-04]. Dostupný z WWW: <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=MEMO/07/13&format=HTML&aged=1&language=CS&guiLanguage=cs>.

[18] RYCHETNÍK, V., PAVELKA, J., JANOUŠEK J. *Větrné motory a elektrárny*. Praha:Vydavatelství ČVUT, 1997, 199 stran. ISBN 80-01-01563-7

[19] SCCN -Solar Chimney Competence Network. Solar Chimney: Project Arabia [online]. 25.4.2008 [cit. 2009-11-04]. Eng. Dostupný z WWW: <http://www.ruhr-uni-bochum.de/imperia/md/content/asib/sccn_solar_chimney.pdf>.

[20] *Schlaich Bergermann und Partner (SBP), Stuttgart* [online]. c2010 [cit. 2010-04-04]. Dostupné z WWW: <http://www.sbp.de>.

[21] SCHLAICH, Jörg, et al. Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems : Utilization of Solar Induced Convective. Journal of Solar Energy Engineering [online]. 2005 [cit. 2009-11-04]. Eng. Dostupný z WWW: <http://www.sbp.de/de/html/contact/download/The_Solar_Updraft.pdf>.

[22] SoDa. *Solar radiation data : Services for Professionals in Solar Energy and Radiation* [online]. 2008 [cit. 2010-04-15]. Maps of irradiation, Irradiance, and UV. Dostupné z WWW: <http://www.soda-is.com/eng/map/>.

[23] ŠTĚTINA, Josef. *Odbor termomechaniky a techniky prostředí : Solární komín* [online]. 2005, Leden 2006 [cit. 2010-03-18]. Dostupné z WWW: <http://ottp.fme.vutbr.cz/laboratore/komin.php>.

[24] TINGZHEN, Ming, WEIN, Liu, GUOLIANG, Xu. Analytical and numerical investigation of the solar chimney. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH [online]. 2006, no. 30 [cit. 2009-11-25], s. 861-873. Dostupný z WWW: <DOI: 10.1002/er.1191>.

[25] Wikipedia. Solar chimney [online]. [2009] , 12 Září 2009 [cit. 2009-11-17]. Eng. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_chimney>.

[26] XINPING, Zhou, et al. Comparison of classical solar chimney power system and combined solar chimney system for power generation and seawater desalination [online]. 2009 [cit. 2009-11-17]. Eng. Dostupný z WWW: <doi:10.1016/j.desal.2009.03.007>.