



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## KONSTRUKCE SOLÁRNÍHO KOMÍNU PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ

CONSTRUCTION OF SOLAR CHIMNEY FOR ENERGY USE OF SOLAR RADIATION

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Zimmermann

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.

BRNO 2018

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektrotechnická výroba a materiálové inženýrství**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Bc. Martin Zimmermann **ID:** 183605 **Ročník:** 2 **Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

**Konstrukce solárního komínu pro energetické využití slunečního záření**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V odborné literatuře prostudujte využívání a konstrukce solárních komínů pro výrobu elektrické energie ze slunečního záření. Z dostupné literatury popisující praktické aplikace solárních komínů proveďte rešerši. Vytvořte model solárního komínu vhodný pro laboratorní měření v předmětu Obnovitelné zdroje energie. Vytvořte kompletní laboratorní úlohu včetně teoretického rozboru a pracovního postupu měření na vytvořeném modelu solárního komínu.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 22.5.2018

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**

*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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.

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá využitím solárních komínových elektráren v energetice, jako obnovitelného zdroje energie. Jedná se o rešerši a princip fungování solárních komínových elektráren, jejich aspekty a o další možnosti využití jejich principu. Dále se práce zabývá konstrukcí modelu solárního komínu do laboratorního prostředí a navržení úlohy do předmětu obnovitelné zdroje energie na katedře elektrotechnologie.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

solární komínová elektrárna, komín, kolektor, model solární komínové elektrárny

## **ABSTRACT**

This thesis consists of utilization solar chimney power plant (solar updraft tower), as possible renewable energy source. It describes its principles, aspects and other optional use of their principle. Then this project deals with solar updraft tower construction for laboratory use and suggest an experiment that could be used as demonstration of solar updraft tower for students. All for subject renewable energy sources on electrotechnology department.

## **KEYWORDS**

solar chimney power plant, chimney, collector, model of solar updraft tower

Zimmermann, M. *Konstrukce solárního komínu pro energetické využití solárního záření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2018. 76 s., 0 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Konstrukce solárního komínu pro energetické využití solárního záření jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce za pomoc při návrhu konceptu práce a při výrobě a vypořádání se s nastalými problémy.

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>8</b>
<b>1 Alternativní zdroje energie</b>	<b>9</b>
1.1 Dělení alternativních zdrojů energie .....	9
1.2 Solární energie .....	11
1.3 Fotovoltaika .....	15
1.4 Solární kolektory .....	19
1.5 Solární koncentrátory .....	21
1.6 Větrná energie .....	24
<b>2 Solární komínová elektrárna</b>	<b>26</b>
2.1 Kolektor .....	27
2.2 Turbíny a generátor .....	28
2.3 Komín .....	29
2.4 Lokace a údržba .....	32
2.5 Výpočet účinnosti systému .....	33
<b>3 Využití solárních komínů</b>	<b>37</b>
3.1 Příklady solárních komínových elektráren .....	37
3.2 Výsledky projektu v Manzanares .....	38
3.3 Ventilace .....	40
<b>4 Praktická část</b>	<b>42</b>
4.1 Zkušební model .....	42
4.2 Skutečný model .....	44
4.3 Vzduchová vpusť a zdroj záření .....	45
4.4 Komín, anemometr a měření teploty .....	47
4.5 Možnost vložení absorberu tepla .....	50
4.6 Výpočet účinnosti a parametrů systému .....	50
<b>5 Laboratorní návod</b>	<b>63</b>
5.1 Měření účinnosti solárního komínu .....	63

Cíl úlohy.....	63
5.1.1 Teoretický rozbor.....	63
5.1.2 Schéma pracoviště .....	66
5.1.3 Pracovní postup.....	67
<b>6 Závěr</b>	<b>68</b>
<b>Literatura</b>	<b>69</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>73</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>74</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>76</b>

# ÚVOD

Efektivní využívání obnovitelných zdrojů energie je nutností pro budoucí fungování stále se rozvíjející lidské společnosti. Solární energie představuje nevyčerpatelný, neznečišťující zdroj energie. Generování elektrické energie pomocí solárního komínu je relativně nová metoda, jak přeměnit sluneční energii na elektrickou. Jedná se o jednoduchý princip, jak zkombinovat ohřev vzduchu skleníkovým jevem a následně jeho nasávání vysokým komínem.

Výše uvedené jevy provedené ve velkém měřítku dokáží teoreticky generovat energii cenově srovnatelnou s konvenčními zdroji energie, bez vytváření oxidu uhličitého a spotřeby jakýchkoliv dodatečných zdrojů (paliva, vody a jiných materiálů) a s minimální údržbou. Jedná se o technologicky jednoduché zařízení, a proto je lze realizovat i v málo vyspělých zemích.

S nápadem vytvoření elektrárny na principu solárního komínu přišli poprvé němečtí inženýři Jorg Schlaich a Rudolf Bergemann v roce 1976. Tato elektrárna se skládá ze tří komponentů: kolektoru, komínu a turbíny. V průsvitném uzavřeném kolektoru je ohříván vzduch, který stoupá vzhůru do středu konstrukce, kde je umístěn komín, ve kterém je turbína s generátorem.

# 1 ALTERNATIVNÍ ZDROJE ENERGIE

Většina lidských činností je závislá na energii ať se jedná o osvětlování, ohřev, či dopravu. Spotřeba energie stále narůstá, a proto je kladen důraz na efektivní využití dostupných zdrojů a vývoj nových technologií, které by pomohly ukojit hlad po energii. Zdroje energie můžeme dělit na vyčerpatelné a nevyčerpatelné. Mezi hlavní vyčerpatelné zdroje energie patří jaderná energie a fosilní paliva což jsou uhlí, ropa a plyn. Všechny tyto zdroje energie je nutno těžít a je jich na zemské planetě omezené množství. Navíc při jejich spalování vznikají odpadní látky ať jsou to spaliny pro fosilní paliva, či vyhořelý jaderný odpad, který je problematické a nákladné skladovat. Z počátku bylo mnohem výhodnější těžít a spotřebovávat fosilní paliva, jelikož byla snadno dostupná a hojně rozšířená. S růstem průmyslu a energetickými požadavky byly snadno dostupné lokality rychle vytěženy. S přechodem na méně lukrativní lokality a z obavy z nedostatku fosilních paliv, začal výzkum ohledně alternativních zdrojů energie, které by vyráběly elektrickou energii bez spalování a co možná nejlevněji. [1]

## 1.1 Dělení alternativních zdrojů energie

Alternativní zdroje energie považujeme za takzvané obnovitelné zdroje, které využívají nevyčerpatelnou energii slunce, větru, vody, biomasy, geotermální a další. Jejich největší výhodou je jejich zdánlivá nevyčerpatelnost při postupném využívání. Další nespornou výhodou alternativních zdrojů energie je jejich postupné nahrazování fosilních paliv, tím předcházejí devastaci krajiny těžbou a znečištění ovzduší jejich spalováním (krom biomasy). [1]

### **Biomasa**

Mezi nejstarší zdroje patří bezpochyby energie biomasy. Biomasa je souhrn všech látek tvořících těla organismů, a to jak rostlin, hub tak i živočichů. Energie biomasy může být využita přímo spalováním (dřeviny), kompostací přeměněna na metan, či zkapalněna pro výrobu olejů. Největší význam biomasy jako zdroje energie je bezpochyby v zemích třetího světa, neexistující infrastrukturu nahrazují lokální bioplynové stanice. Při plánované těžbě a výsadbě rychle rostoucích dřevin by se jednalo o udržitelný zdroj energie. Bohužel skutečnost je taková, že je dřevo mnohem rychleji těženo, než je vysazováno a dochází tak k nenapravitelným škodám na životním prostředí zejména v oblastech pralesů. Navíc dochází při jeho spalování ke vzniku skleníkových plynů. [2]

## **Vodní elektrárny**

Druhým nejstarším typem jsou vodní zdroje energie, které byly v minulosti využívány k mletí obilovin. Vodní elektrárny jsou jedním z nejspolehlivějších alternativních zdrojů energie, na rozdíl od větrné, či solární energie nedochází k výkyvům v průběhu dne a lze je dobře regulovat průtokem vody. Vodní elektrárny můžeme dělit dle různých kritérií. Dle instalovaného výkonu na malé (do 10MW), střední (do 100MW), velké (nad 100MW), dle spádu vody na nízkotlaké (do 20 m), středotlaké (20 až 100 m), vysokotlaké (nad 100 m) a nakonec dle způsobu využití vodního toku na průtočné, jezové, akumulární a přečerpávací. Mezi nevýhody vodních elektráren patří přerušování vodního toku pro lodní přepravu a faunu, zatopení velkých oblastí (u akumulárních) a nutnost vhodné lokality, kterých není v České republice mnoho a většina z nich je již obsazena, tudíž k výraznému navýšení výkonu vodních elektráren nejspíše nedojde. [3]

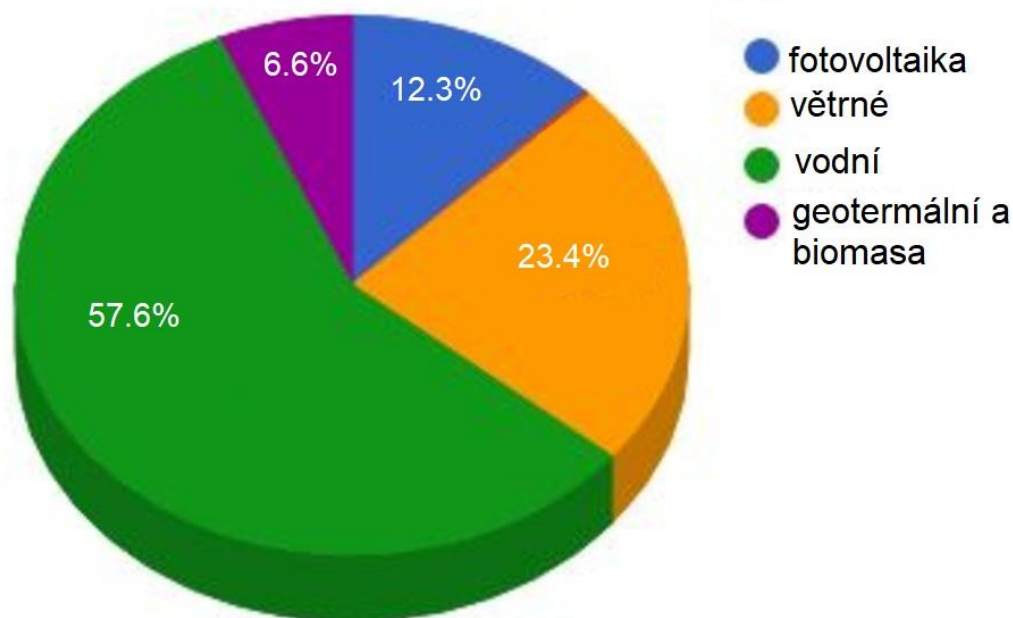
## **Geotermální energie**

Dalším důležitým zdrojem alternativního zdroje energie je geotermální energie. Jde o využití energie prostupující ze zemského jádra, tato energie byla dodána při vytváření planety a je dále podporována slapovými silami a rozpadem radioaktivních látek. Takto vzniklou energii lze používat k výrobě elektrické energie. Nevýhodou těchto elektráren je časté zanášení trubek a systému v důsledku silné mineralizace těchto vod. Dále pak většinou nestabilní geologické podloží nacházející se v místech vhodných pro tento typ elektráren. Nejrozšířenějšími jsou v USA, Filipínách, Novém Zélandu a Islandu. Další aplikací jsou pouze několik metrů hluboké vrty, které v zimě čerpají z půdy teplo a v létě chlad. Na Islandu jsou takto vyhřívány chodníky, skleníky a až 85 % domů. [4], [5]

## **Shrnutí**

V posledních letech je kladen mnohem větší důraz na ochranu životního prostředí a s tím roste zájem o obnovitelné zdroje energie. Díky tomu dochází k postupnému vylepšování a zlevňování těchto technologií a jejich větší dostupnosti. V posledních 14 letech došlo k raketovému vzestupu využívání alternativních zdrojů v EU. V roce 2004 tvořil procentuální podíl těchto zdrojů na celkové výrobě elektrické energie pouhých 8,5 % a v roce 2016 již 17 %. Plánem Evropské Unie je pokrytí 20 % spotřeby el. energie alternativními zdroji. Na konci roku 2015 tvořili obnovitelné zdroje 23,7 % z veškeré vyrobené energie, na obrázku 1.1 je vidět rozložení jednotlivých zdrojů. Nadpoloviční podíl mají vodní elektrárny, avšak fotovoltaika zaznamenala mezi lety 2014 a 2015 takřka třicetiprocentní nárůst a pokud bude tímto tempem pokračovat, stane se v budoucnu dominantním zdrojem. V kapitole 1.2 a 1.3 budou podrobněji rozebrány solární a větrná energie, které se této práci nejvíce týkají. [6]

## Obnovitelné zdroje energie 2015



Obr. 1.1 Graf globálního zastoupení obnovitelných zdrojů energie [5]

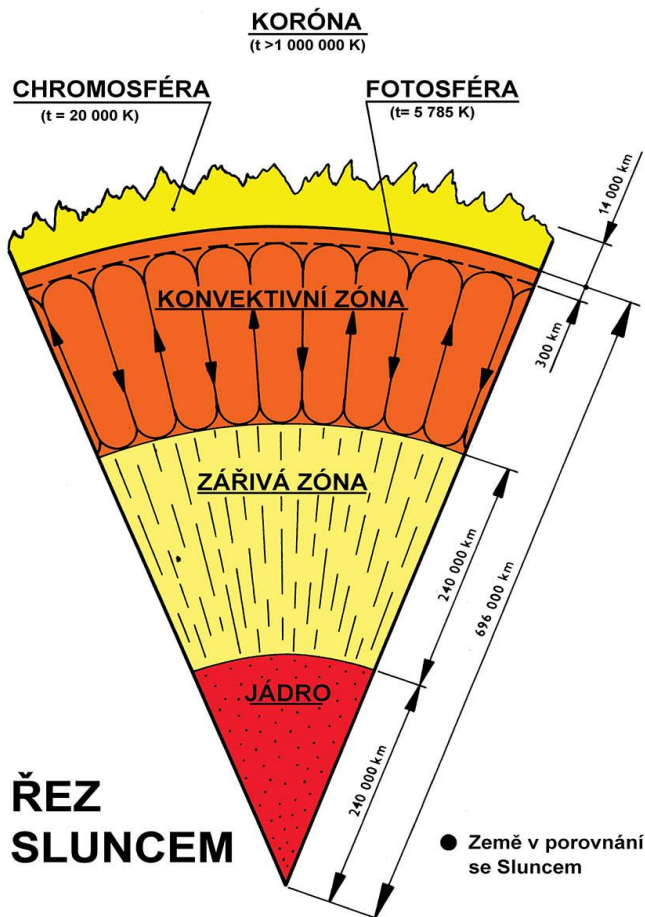
### 1.2 Solární energie

#### Slunce

Největším zdrojem energie je bezpochyby slunce, ze kterého ročně dopadá na Zemi přibližně 1 540 000 000 000 GWh energie. Takové množství energie by stačilo při dnešní roční spotřebě energie lidstva na 20 000 let. Zdrojem sluneční energie je neustále probíhající jaderná fúze ve slunečním jádru, což je slučování jader vodíku, při kterém vzniká helium a uvolňuje se při ní značné množství energie (teplota jádra Slunce je odhadována na 15 mil. °C). Stáří Slunce je odhadováno na 4,6 miliardy let a je složeno z 71 % vodíku a 27 % helia (2 % ostatní prvky), doba jeho života je odhadována na 10 miliard let. Každou vteřinu dochází k přeměně 700 miliónů tun vodíku na 695 miliónů tun helia, 5 miliónů tun je přeměněno na energii ve formě elektromagnetického záření a neutrina. Po vyčerpání většiny zásob vodíku se změní v rudého obra, který zvětší objem a zvýší hustotu jádra. S rostoucí hustotou jádra naroste i jeho teplota a při dosažení hranice 100 mil. °C započne fúze helia za vzniku uhlíku (tato fáze potrvá pouhých cca 100 mil. let), po spotřebování helia nebude mít Slunce dostatečnou hmotnost a teplotu na fúzi uhlíku a skončí jako bílý trpaslík. [7]

## Struktura

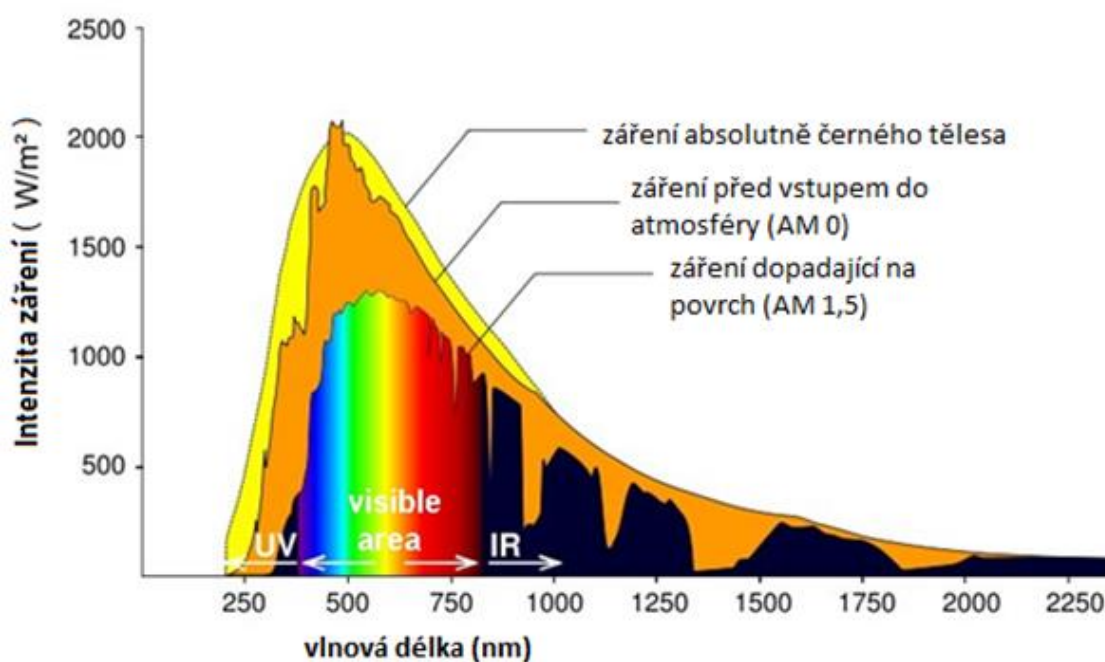
Struktura slunce je zobrazena na obrázku 1.2, jak bylo již řečeno v jádru probíhá termonukleární reakce. V zářivé zóně dochází k přenosu energie z jádra pomocí záření, fotony jsou zde opětovně pohlcovány a vyzařovány do různých směrů (i zpět směrem do jádra), proto jejich cesta skrz zářivou zónu může trvat i 100 000 let. Konvektivní zóna je horké sluneční plazma, které proudí vzhůru a předává energii konvekcí, ochlazená hmota pak znovu klesá směrem k centru Slunce, kde je opět ohřívána, zde vzniká magnetické pole slunce. Fotosféra je viditelný povrch slunce s teplotou asi 5 800 °C a je vrásněna výstupnými a sestupnými proudy konvektivní zóny. Chromosféra je tenká vrstva mezi korónou a fotosférou, kde dochází k ohřevu vlivem rozpadu tzv. Alfénových vln. Nakonec je zde koróna, nemá pevné hranice a je paradoxně mnohem teplejší než fotosféra (až 1,5 mil. °C), k jejímu ohřevu dochází rozpadem magnetoakustických vln šířících se plazmatem. [8]



Obr. 1.2 Řez strukturou Slunce [7]

## Sluneční záření dopadající na zemský povrch

Vlnová délka záření emitovaného sluncem se pohybuje od 0,1 nm až do 1000 metrů a leží tedy ve všech třech oblastech spektra: ultrafialovém, viditelném i infračerveném (viz obrázek 1.3). Nejvíce energie je obsaženo v ultrafialovém spektru, které je pro živé organismy ve větší koncentraci škodlivé. Naštěstí je většina ultrafialového záření absorbována ozónovou vrstvou, jak je názorně vidět na obrázku níže. Spektrum slunečního záření je ovlivněno více vlivy, žlutě je na obrázku znázorněno záření absolutně černého tělesa, které konturuje sluneční záření ve vesmíru, jelikož slunce se téměř jako absolutně černé těleso chová. [9]



Obr. 1.3 Spektrum slunečního záření [9]

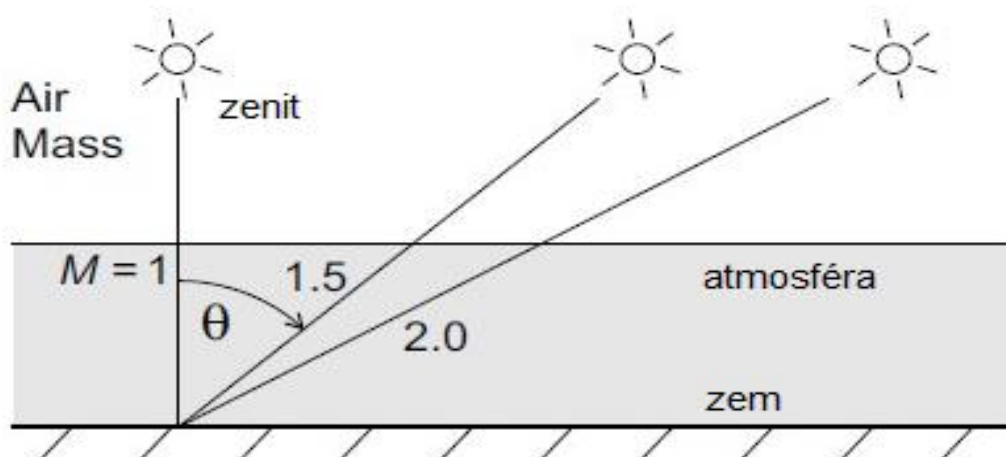
Jedním z faktorů ovlivňujících spektrum je index AM (air mass), který odpovídá slunečnímu spektru po průchodu určitým množstvím atmosféry a je charakterizován vztahem 1.1 takto:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta}. \quad (1.1)$$

$AM$  – air mass (-)

$\theta$  – úhel mezi zenitem a polohou slunce ( $^{\circ}$ )

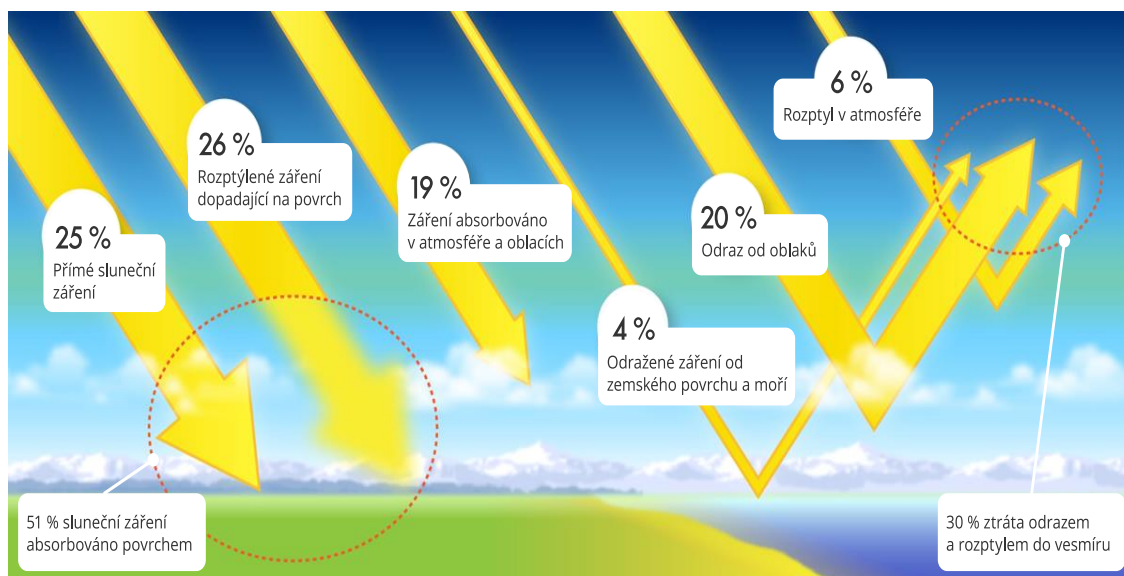
Celá situace je znázorněna obrázkem 1.4.



Obr. 1.4 Znáznornění výpočtu faktoru AM [10]

AM 0 odpovídá slunečnímu záření před vstupem do atmosféry, jedná se tedy o skutečné sluneční záření, jehož teoretické množství energie dopadající za sekundu na jednotku plochy je  $1361 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a je nazýváno solární konstantou. AM 1 odpovídá poloze slunce nad rovníkem kdy koeficient 1 znamená průchod šířkou jedné atmosféry. Čím dále jsme od rovníku tím delší dráhu musí světlo urazit atmosférou a tím více záření je v ní pohlceno. AM 1,5 odpovídá úhlu mezi zenitem a polohou Slunce  $48,2^\circ$  a je s ním počítáno pro instalace v Evropě, USA atp. vzhledem k zeměpisné šířce. Spektrum pro AM 1,5 je také zobrazeno na obrázku 1.3. Jsou zde patrné úbytky záření na určitých vlnových délkách, které odpovídají prvkům v atmosféře, které tyto vlnové délky výrazně pohlcují (nejvíce jsou to vodní páry). [11], [9]

Jen nepatrná část celkového slunečního záření dopadá na povrch atmosféry (asi jedna dvou-miliardtina). Přibližně 30 % tohoto záření je odraženo zpět do vesmíru, 19 % je absorbováno samotnou atmosférou a mraky a 51 % dopadne na zemský povrch (viz. obrázek 1.5). Celkové množství záření dopadajícího na Zemi se někdy říká globální záření (global radiation) a dělí se na přímé záření (záření které si zachová svůj směr) a difúzní záření (rozptýlené záření), které vzniká odrazem v atmosféře, či od zemského povrchu. Poměr obou složek záření je závislé na počasí a znečištění ovzduší, při oblačnosti je téměř všechno záření difúzní, naopak při jasné obloze je majorita přímého záření. [12], [13]



Obr. 1.5 Poměr složek slunečního záření dopadajícího na zemský povrch [13]

## Využití sluneční energie na Zemi

Jak již bylo řečeno sluneční energie je největším zdrojem energie na Zemi, a to jak přímým zářením, tak nepřímým důsledkem záření. Díky teplu slunečního záření dochází k odpařování vody a v důsledku tak k fungování hydrosféry (vodní elektrárny). Slunce v kombinaci s rotací země způsobuje i pohyb vzduchu (větrné elektrárny), různá místa na zemi jsou různě ohřívána a tím vznikají tlakové rozdíly, které tento pohyb způsobují.

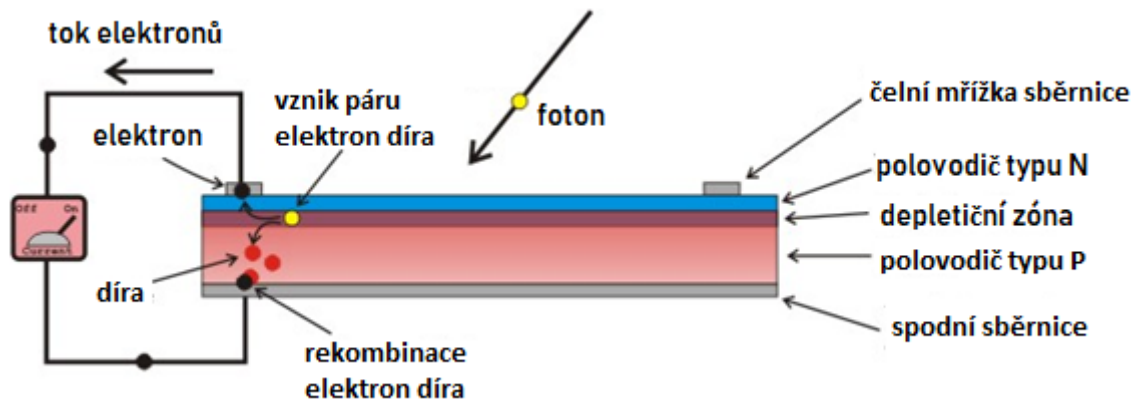
Solární energie může být využívána ke generování elektrické energie pomocí fotoelektrického jevu. Jedná se o obecně nejrozšířenější a nejrychleji se rozvíjející odvětví solární energetiky, ve které je sluneční záření přeměněno přímo na stejnosměrný proud. Dalšími způsoby jsou solární kolektory, které jsou uzpůsobeny tak aby absorbovaly co největší množství tepla a ohřáli jím nosné médium (většinou voda). Tato voda pak může sloužit přímo pro vytápění. Dalším způsobem využívání solární energie jsou v našich zeměpisných šířkách nevyužívané solární koncentrátoři, jedná se o systém zrcadel koncentrujících záření do jednoho bodu a zde ohřívají teplotonosné médium. Solární komínová elektrárna se nejvíce týká této práce, proto je zmíněna ve vlastní kapitole. [14]

## 1.3 Fotovoltaika

Fotovoltaické články fungují na principu fotovoltaického jevu. Jedná se o fyzikální jev, při němž jsou uvolňovány elektrony z valenčního do vodivostního pásu obalu po dopadu elektromagnetického záření o dostatečné energii. Na místě, kde byl dříve elektron

vznikne „díra“ neboli elementární kladný náboj. Je-li v polovodičovém materiálu vytvořen P-N přechod, dochází k separaci nábojů a přitahování k opačné elektrodě přes uzavřený obvod (kde dochází k rekombinaci), kterým takto prochází proud.

Nejčastějším polovodičovým materiálem je křemík, který je po kyslíku druhým nejčastějším prvkem na Zemi a je tedy velmi snadno dostupný. Na jedné jeho straně je vytvořen polovodič typu P obohacením o trojmocný prvek a na druhé straně polovodič typu N obohacením o pěti mocný prvek. Tím vzniká P-N přechod na kterém po dopadu záření dochází k vyražení elektronu, vzniku napětí a průchodu proudu přes sběrnice umístěné na obou stranách viz. obrázek 1.6. Na jednom článku vzniká napětí 0,5V - 0,6 V (pro křemík), sériovým propojením více článků je docíleno požadovaného napětí a jejich paralelním propojením potřebný proud, tím vzniká fotovoltaický modul o dimenzovaném výkonu. Tyto moduly jsou zpravidla ještě propojeny do řetězců (stringů) a posléze vyvedeny do střídače. [15]



Obr. 1.6 Schéma fotovoltaického článku [16]

Aby byl elektron z krystalové mřížky křemíku uvolněn musí mít foton energii aspoň 1,12 eV (šířka zakázaného pásu křemíku). Pro výpočet energie fotonu lze použít známý vztah 1.2:

$$E_{fot} = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.2)$$

$E_{fot}$  - je energie fotonu (eV)

$h$  - je Planckova konstanta ( $4,135\ 668 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ )

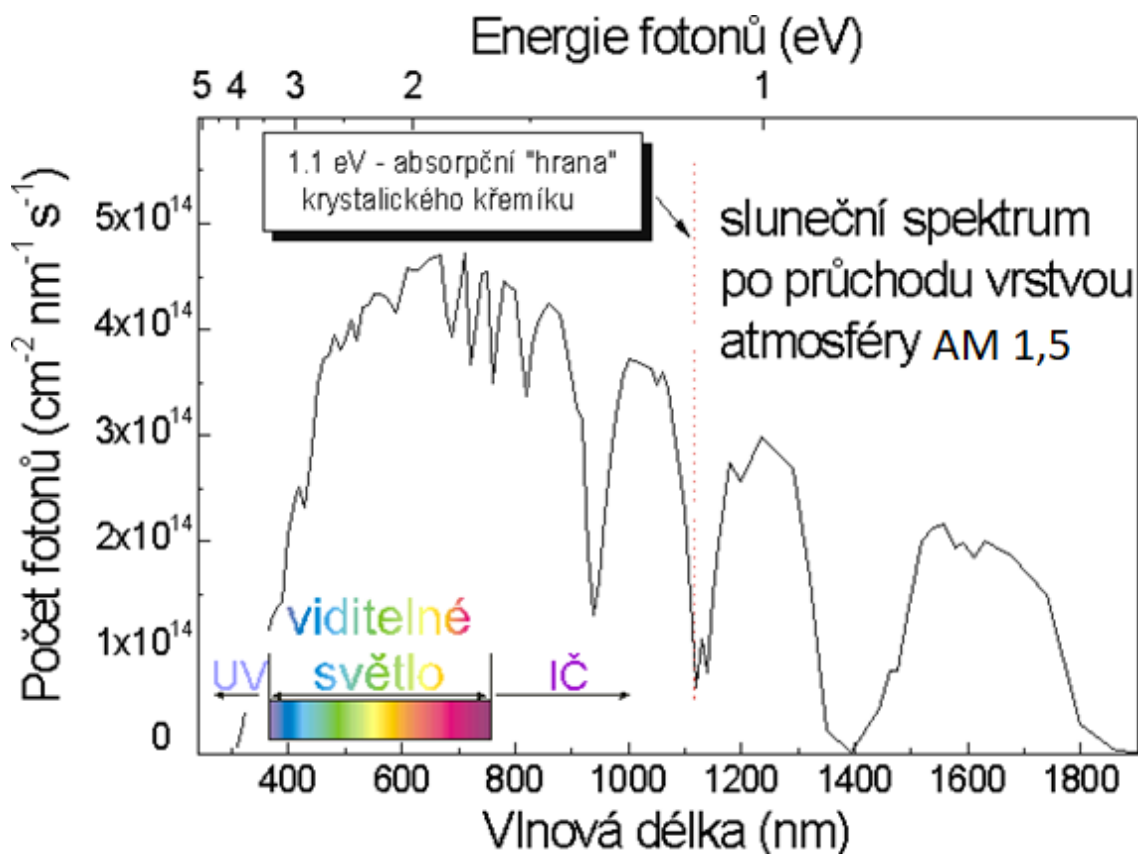
$c$  - je rychlost světla ( $2,997\ 924 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\lambda$  - vlnová délka (m)

Pomocí vztahu 1.2 můžeme snadno dopočítat, do které vlnové délky má záření dostatečné množství energie pro vyražení elektronu jako:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_{\text{fot}}} = \frac{4,135668 \cdot 2,997924 \cdot 10^{-7}}{1,12} = 1107 \text{ nm}$$

což je znázorněno na obrázku 1.7. Z čehož vyplývá, že křemík může teoreticky využít jen určitou část dopadajícího slunečního záření.



Obr. 1.7 Sluneční spektrum v AM 1,5 s vyznačením absorpční hrany křemíku [17]

Pokud je energie fotonu menší než výše zmíněných 1,12 eV, projde křemíkem a není absorbován. Pokud je jeho energie větší pak je absorbován a vznikne pár elektron díra, rozdíl mezi energií 1,12 eV a energií fotonu je přeměněn na teplo (to je jeden z důvodů, proč křemíkové jednovrstvé články nepřesáhnou účinnost 30%).

Existuje několik technologií fotovoltaických článků, kde každá má své výhody a nevýhody. V přírodě se nachází křemík o čistotě až 99 %, což pro elektrotechnické využití není stále dostačující. Křemík je tedy nutné vyrobit o ještě větší čistotě a to buď monokrystalický křemík, nebo polykrystalický. [17]

Monokrystalický křemík je vyráběn Czochralského metodou, jedná se o řízenou krystalizaci z taveniny křemíku. Zárodek křemíku je z této taveniny pomalu vytahován za pomalého otáčení, až vznikne monokrystalický ingot zobrazený na obrázku 1.8. Tyto

ingoty jsou posléze nařezány na destičky o tloušťce 100 mikrometrů a dále opracovány (texturování, antireflexní fólie ...). Výhodami monokrystalickému křemíku jsou vyšší účinnost při vyšších intenzitách záření, která se pohybuje do 20 %, dlouhá životnost vzhledem k vysoké čistotě křemíku a nejvyšší účinnost mezi běžnými jednovrstvými solárními panely. Mezi nevýhody patří jejich vysoká cena, která je dána náročností výroby, a při pokrytí nečistotami je postížen celý systém. [18]

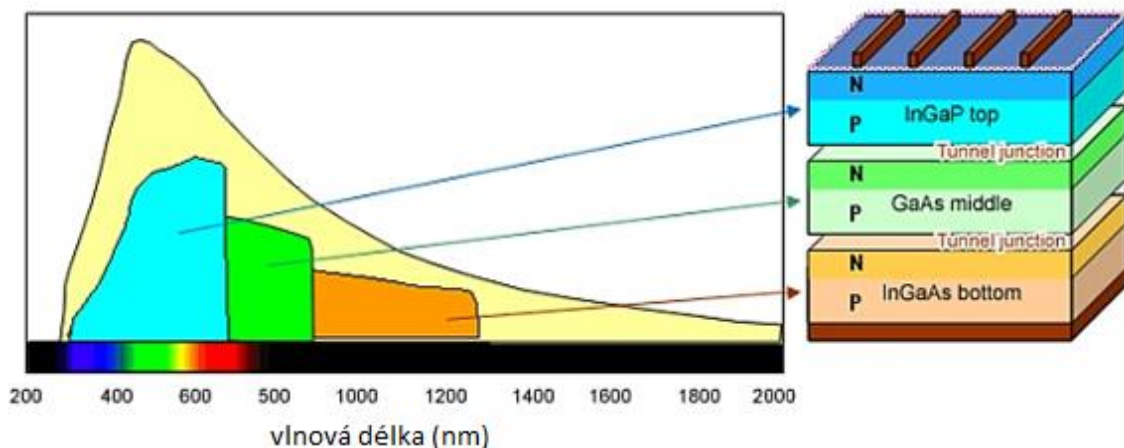


Obr. 1.8 Monokrystalické křemíkové ingoty a článek z nich vyrobený [19]

Oproti tomu polykrystalický křemík je vyráběn chemickou metodou, granule křemíku se roztaví, nalijí do formy a nechají chladnout za určitých podmínek (musí být pomalé, aby vznikly krystaly s co nejméně poruchami mřížky). Vzniklý odlitek je rozřezán a povrchově upraven podobně jako monokrystalický křemík. Jeho výroba je méně nákladná a dosahuje lepší účinnosti pro záření ze strany (vhodné pro statické instalace), přesto je však jeho účinnost pouze okolo 16 %. Vzhledově vypadají obdobně jako polykrystalické, avšak při pohledu z blízka je vidět jejich nehomogenita. [18], [19]

Posledním typem základních jednovrstvých článků jsou články amorfní. Jedná se o slabou vrstvu nanosenou na sklo (či jiný podklad), která je beztvárá. Nevýhodou amorfního křemíku je podstatně nižší účinnost a to kolem 8 %, velkou výhodou je však schopnost absorbovat i difúzní záření, což ani polykrystalické ani monokrystalické články neumí, v důsledku toho může být jejich účinnost v regionech s převládajícím difúzním zářením větší než u dalších dvou variant. Další výhodou je úspora materiálu, hmotnosti a možnost aplikace tenkých vrstev i na ohebné materiály. [19]

Teoretická maximální účinnost jednovrstevných článků je přibližně 34 % (Shockley-Queisser limit). Pro zvýšení účinnosti byla vyvinuta technologie vícevrstevných panelů, ve kterých je na sebe nanášeno několik vrstev o různých materiálech, kde každá vrstva pohlcuje určitou část světelného spektra viz. obrázek 1.9. Pomocí vícevrstevných technologií lze dosáhnout mnohem vyšších účinností (na příkladu z obrázku 1.9 je dosaženo účinnosti 36,9 %), nevýhodou je technologická náročnost výroby a velmi vysoká cena, proto je jejich využití spíše pro vesmírné aplikace. [20]



Obr. 1.9 Příklad absorpce různých vlnových délek vícevrstevným článkem [20]

## 1.4 Solární kolektory

Jak již samotný název napovídá, solární kolektory sbírají sluneční paprsky. Ty dopadají v kolektoru na absorbér, kde jsou přeměněny na teplo. Teplo je předáno teplotněmu médiu, kterým může být voda, teplotněná kapalina či olej. Takto získané teplo pak může být použito k vytápění, k ohřevu bazénů, či ohřev užitkové vody. [21]

Podle konstrukce rozdělujeme kolektory na několik typů a to na:

- bazénové kolektory
- ploché kolektory
- vakuové kolektory

### Bazénové kolektory

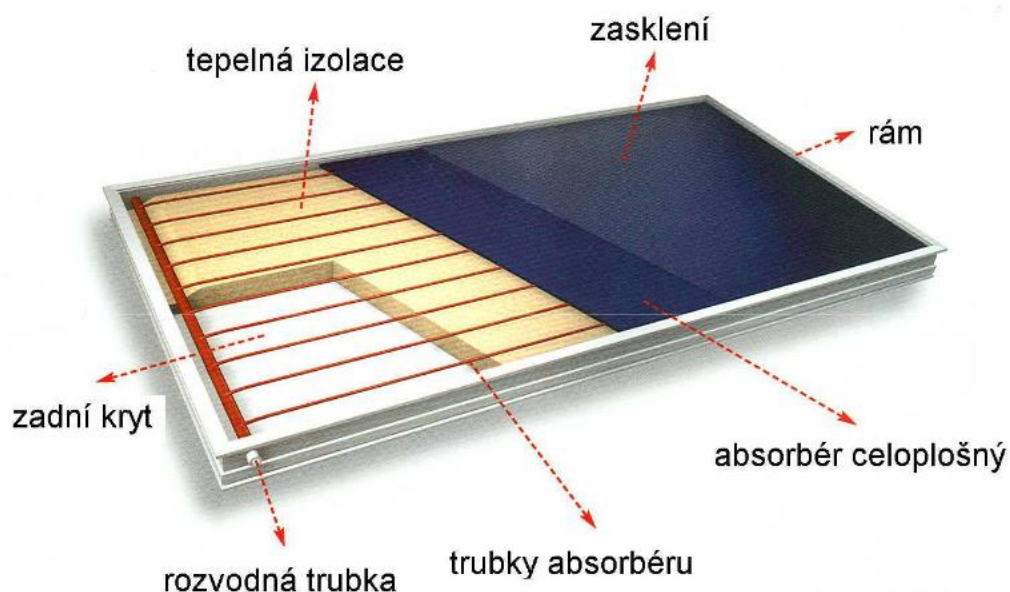
Jedná se o nejjednodušší typ solárních kolektorů, kolektor je tvořen pouze absorbérem pohlcujícím záření, bez skříně bránící úniku tepla a bez skla. Bazénové kolektory mají využití především pro vyhřívání vody v bazénech a pro menší teplotní rozdíly, při kterých dosahují lepší účinnosti než ostatní typy. Výhodou kolektoru je absence skla, díky které odpadají ztráty odrazem a transmisí, navíc mají mnohem nižší cenu. Nevýhodou je horší účinnost při rozdílu teplot mezi absorbérem a okolím nad 10 °C. [21]

### Ploché solární kolektory

Sluneční záření je v plochých kolektorech zachyceno absorbérem, kde se přímo přemění na tepelnou energii. Tato energie je pomocí teplotněné kapaliny přivedena do výměníku, ze kterého může být kapalina použita na ohřev, vytápění atp. Absorbér je umístěn

v takzvané skříní, která je prosklená, aby nedocházelo k úniku tepla ze zařízení. Teplonosnou kapalinou bývá většinou voda, jelikož má velmi vysokou měrnou tepelnou kapacitu a je levná a snadno dostupná. Do vody je přidávána nemrznoucí směs, aby nedošlo k zamrznutí v zimním období. V posledních letech bývají absorbery vybaveny selektivní absorpční vrstvou, která dokáže pohlcovat i difúzní záření.

Při používání solárních termických systémů lze v České republice ušetřit až 75 % nákladů na ohřev teplé užitkové vody. Termické solární systémy mohou pracovat s účinností až 80 % a mají deklarovanou životnost přibližně 30 let. Jejich výhodou je i nižší pořizovací cena než u vakuových kolektorů. [21], [22]



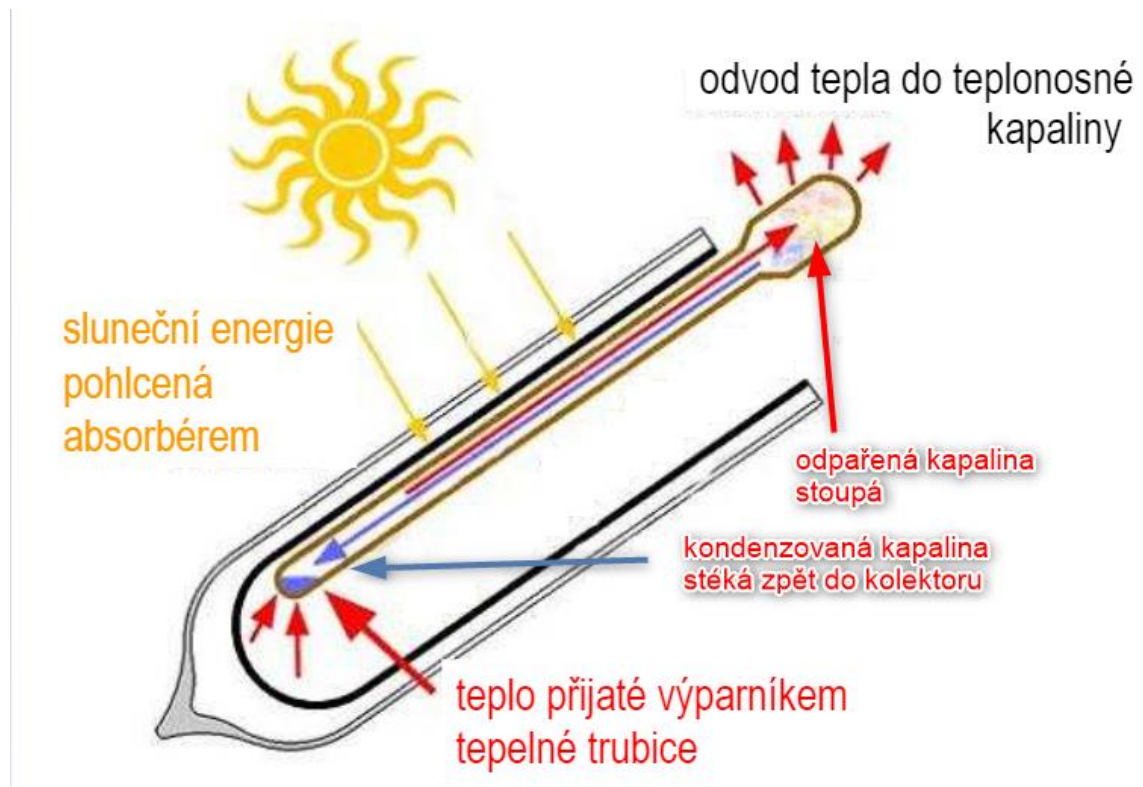
Obr. 1.10 Schéma deskového kolektoru [22]

## Vakuové kolektory

Jedná se o vylepšení kapalinového kolektoru. Vakuové kolektory vykazují lepší účinnost díky nižším ztrátám, těch bylo docíleno odsátím vzduchu z kolektoru. Uvnitř skleněné trubice jsou kovové absorbery, které jsou spojeny s vnitřní kovovou trubicí, které předávají teplo. Trubice obsahuje teplonosné médium. Médium bývá voda o sníženém tlaku, či různé směsi methanolu. Médium se v trubici odpaří a putuje do kondenzátoru, kde předá své teplo přes potrubí vodě, kterou chceme ohřívat (např. TUV). Po ochlazení médium kondenzuje a vrací se zpátky do kolektoru.

Vakuové kolektory mají nejlepší účinnost, avšak patří mezi cenově nejnáročnější vzhledem k náročnosti konstrukce. Mezi další nevýhody patří například špatné odtávání

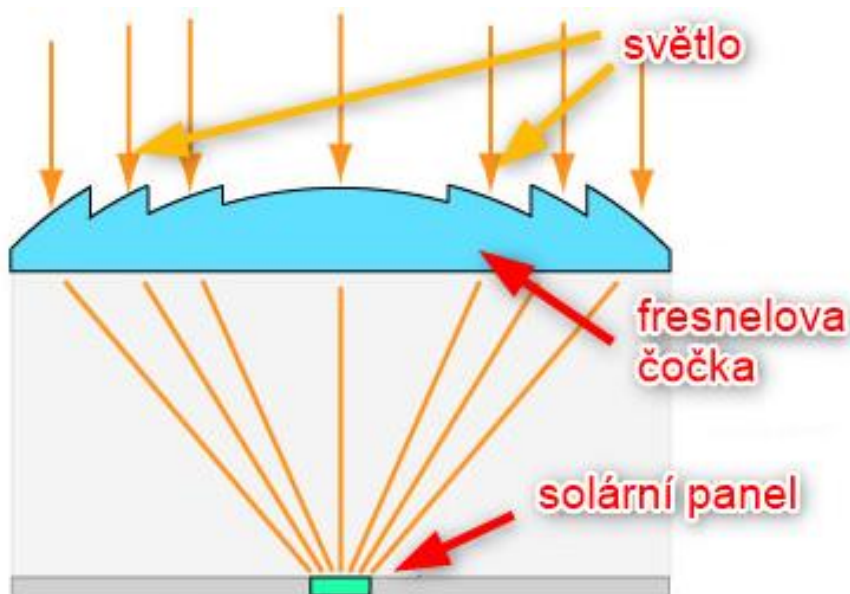
sněhu, jelikož vakuová izolace trubice nezahřívá. Zjednodušené schéma vakuové trubice je na obrázku 1.11. [21], [22]



Obr. 1.11 Schéma vakuové solární trubice [22]

## 1.5 Solární koncentrátoary

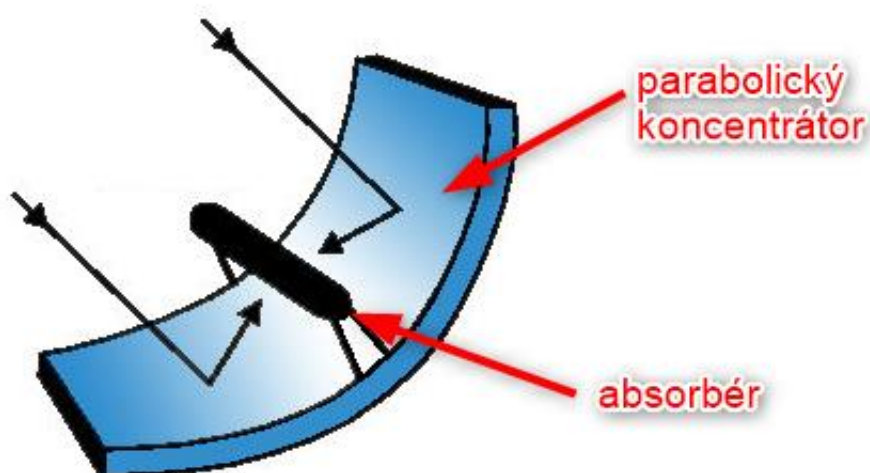
Solární koncentrátoary mají za cíl koncentrovat sluneční záření do na menší plochu, tím docílit větší intenzity záření a zvýšit tak efektivitu navazujících aplikací. Koncentrace slunečních paprsků je docíleno zrcadly nebo čočkami. Hlavním důvodem pro použití pro fotovoltaiku či pro termické kolektory je relativně nízká cena odrazivého materiálu. Příklad je uveden na obrázku 1.13, kde je světlo z několikanásobně větší plochy koncentrováno na fotovoltaický panel o menších rozměrech. Pokud by měl panel zachycovat světlo ze stejně velké plochy, byla by instalace mnohem nákladnější, než při použití Fresnelovy čočky. To může přinášet samozřejmě negativní jevy jako je například přehřívání a tím snižování účinnosti panelu, proto se na tyto druhy aplikací soustředí specializované firmy, které tyto systémy navrhují a optimalizují. [23]



Obr. 1.12 Koncentrace světla Fresnelovou čočkou [23]

### Parabolický žlab

Parabolický žlab je složen z lineárního parabolického reflektoru, který koncentruje světlo do trubice s teplotním médiem umístěné v ohniskové linii parabolického žlabu. Médiem bývá zpravidla tavenina soli, která je ohřata na 150-350 °C, sůl je pak použita jako zdroj tepla pro výrobu páry a následnou výrobu elektrické energie. Část parabolického žlabu je na obrázku 1.14, žlab může být dlouhý desítky metrů. [24]



Obr. 1.13 Část parabolického žlabu [24]

## Solární věž

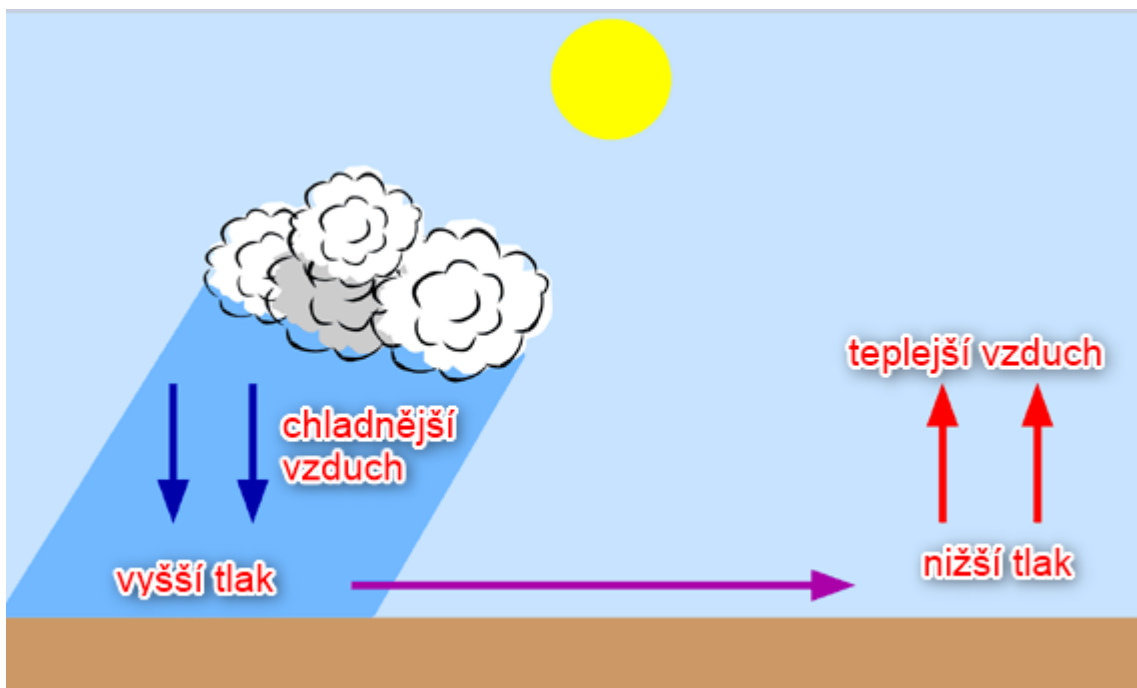
Solární věžové elektrárny jsou systémy otáčejících se zrcadel (heliostatů), které sledují pohyb slunce a odrážejí jeho paprsky do předem určené oblasti. Tou oblastí bývá vrchní část věže se zásobou soli, která je ohřata na 500-1000 °C a je dále použita pro parní generátory, případně může být roztavená sůl uskladněna v tepelně izolovaných tancích a použita pro výrobu elektřiny v případě potřeby. Nevýhodou je vysoká investice a případná údržba a čištění zrcadel. Navíc je nutné najít lokalitu s vysokou intenzitou slunečního záření a levnou půdou, k takovýmto lokalitám je většinou potřeba vybudovat infrastrukturu. Dalším negativním jevem doprovázejícím solární koncentrátory obecně je zvýšený úhyn ptactva v jejich blízkosti, hmyz je lákán světlem a ptactvo jej následuje, pokud vletí do koncentrovaných paprsků může dojít k náhlému vznícení peří. Výhodou bývá možnost skladování tepla a tvorba energie pro stabilizaci sítí a při jejím nedostatku. [24]



Obr. 1.14 Solární věž PS10 ve Španělsku, výkon 11 MW [24]

## 1.6 Větrná energie

Větrná energie je jedním z produktů sluneční energie. Pohyb vzduchu neboli vítr je způsoben rozdílem tlaku na různých místech. Tento rozdíl tlaku je obecně způsoben rozdílnou teplotou vzduchu, chladnější vzduch má větší hustotu a tím je v daném místě vyšší tlak než v oblasti s teplejším vzduchem a tím pádem s nižší hustotou a tlakem. Příčinami různých teplot vzduchu mohou být atmosférické podmínky, jak je znázorněno na obrázku 1.16. Dalšími důvody jsou pak různou topografií povrchu a dalším velmi důležitým faktorem je rozdílný ohřev vzduchu nad vodními plochami a nad souší. Nad souší se zpravidla tvoří tlakové níže a nad vodou tlakové výše, tím dochází k větrům vanoucím od moří na souše.



Obr. 1.15 Vznik tlakových výší a níží [25]

Vítr může být definován rychlostí a směrem. Směr větru je definován jako směr odkud vítr vane kam a může být určen více způsoby jako je například větrná korouhvička, či jakýkoliv předmět, který je ve větru otočen v jeho směru (praporek, punčocha atd.). Rychlost větru je pak měřena anemometry různých konstrukcí, či může být určena podle přírodních projevů a odhadnuta pomocí Beaufortovi stupnice. [25]

## **Energetické využití větrné energie**

Větrná energie je člověkem využívána už od nepaměti. Nejstarším druhem využití bylo bezesporu mořeplavectví, později sloužila větrná energie jako náhrada mechanické práce ve větrných mlýnech. Mechanismus přeměňující kinetickou energii větru na rotační pohyb, který je následně transformován v generátoru na elektrickou energii se nazývá turbína. Maximální účinnost turbíny byla odvozena německým fyzikem Albertem Betzem, ten dokázal, že maximální účinnost větrného stroje je 59 %.

Turbína je obecně mechanický rotační stroj, který se skládá z různého počtu lopatek dle konstrukce, které jsou umístěny na společné hřídeli a mezi nimiž aktivně prochází kapalina nebo plyn. Průchodem přes lopatky je otáčeno hřídelí a generována elektřina, případně při opačném chodu pumpována daným směrem. Nejpoužívanějším typem větrné turbíny je vrtule, existuje však více typů pro různé aplikace. Účinnost vrtule se pohybuje okolo 45 %. Vrtule bývají umístěny ve větších výškách z důvodu vyšší rychlosti větru a větší stability.

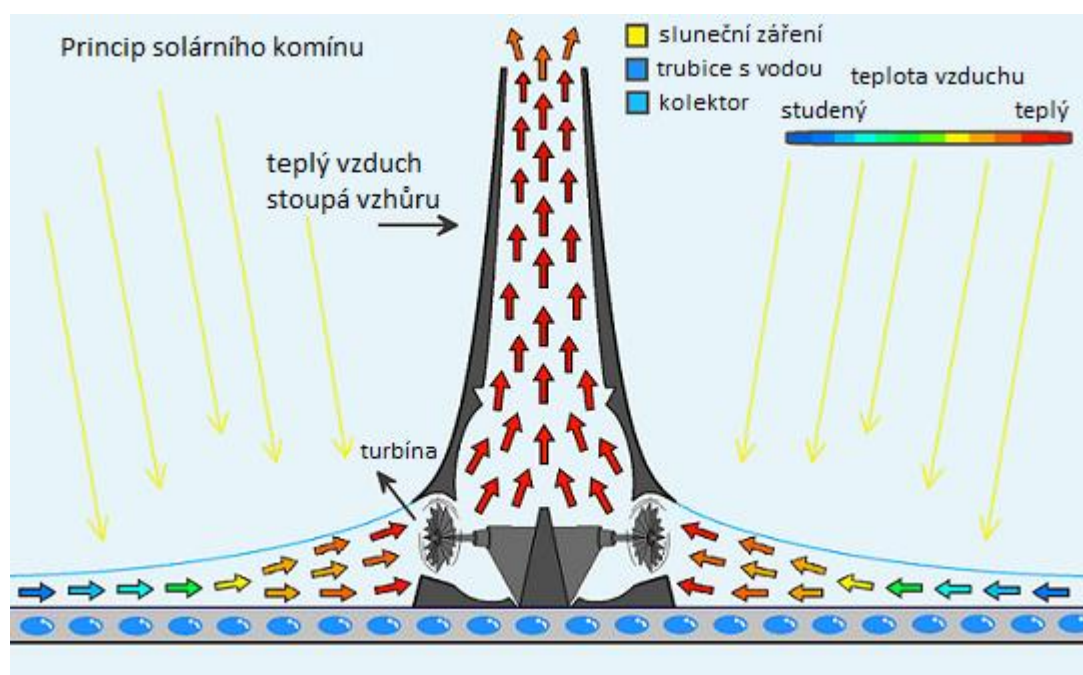
Větrné elektrárny jsou zpravidla shlukovány do větrných parků, musí mít dostatečné rozestupy, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování. Výška, ve které se nachází se pohybuje okolo 50-100 metrů s délkami lopatek do 40 metrů. Elektrárny bývají vybaveny servomotory, které je otáčejí ve směru větru. Veškeré větrné elektrárny musí být vybaveny bezpečnostními prvky, které zabraňují saturaci a havárii, může se jednat o sklopení lopatek, či brzdy. V poslední době jsou instalovány takzvané offshore elektrárny, které jsou budovány v moři, kde jsou obecně vyšší rychlosti větru. [26]

Mezi výhody větrných elektráren patří:

- jedná se o obnovitelný zdroj energie
- nízké náklady na údržbu a provoz
- tvorba pracovních míst
- Mezi nevýhody naopak patří:
- proměnlivost výkonu i během dne
- nákladná investice
- hrozba pro ptáky a netopýry
- tvorba nadměrného hluku
- neestetičnost

## 2 SOLÁRNÍ KOMÍNOVÁ ELEKTRÁRNA

Solární komínová elektrárna (solar chimney power plant, solar updraft tower) jejíž schéma je vyobrazeno na obr. 2.1 níže, pracuje na principu ohřevu vzduchu v průsvitném kolektoru. Tento vzduch má díky ohřevu vyšší teplotu a tím nižší hustotu, než vzduch za výstupem z komínu, proto stoupá vzhůru. U základny komínu jsou umístěny turbíny, které převádí kinetickou energii vzduchu na energii elektrickou. Pro větší efektivitu mohou být pod plochou kolektoru umístěny zásobníky vody, které se přes den nahřejí a v noci uvolňují teplo, takže může elektrárna pracovat téměř nepřetržitě. Komín je jednou z nejdůležitější a nejnákladnější částí celého zařízení. Tah vzduchu je způsoben rozdílem teplot v kolektoru a na výstupu z komínu, čím výše stoupá komín tím nižší je okolní teplota vzduchu (přibližně 1 °C na každých 100 výškových metrů) a tím většího teplotního rozdílu je dosaženo. V dalších kapitolách budou jednotlivé komponenty důkladněji popsány a specifikovány.



Obr. 2.1 Základní schéma solárního komínu [27]

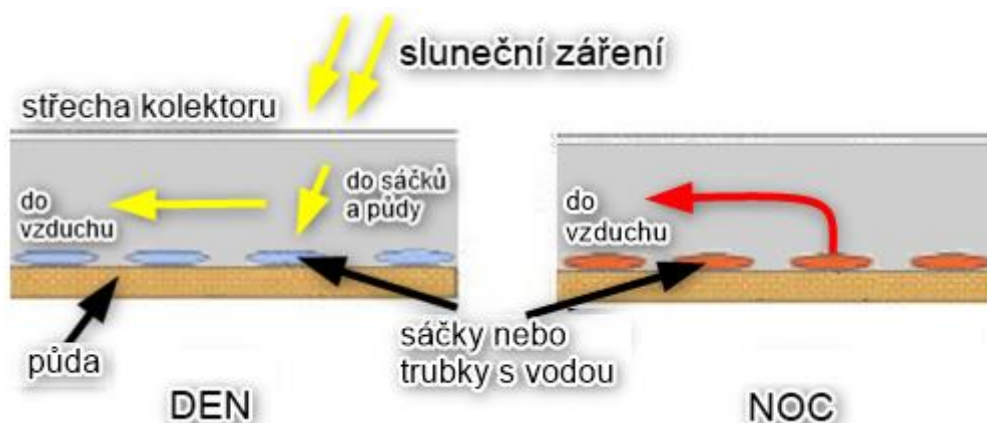
## 2.1 Kolektor

Kolektorem je nazývána celá oblast okolo solárního komínu (viz obr 1.2). Jedná se o několik metrů vysokou konstrukci mírně se zvyšující směrem do centra, aby byl teplejší vzduch odváděn do komína a zároveň se zmenšovaly ztráty působené třením vzduchu postupným přechodem z horizontální roviny do vertikální. Po obvodu kolektoru jsou u země zhotoveny vzduchové mezery, které vpustí potřebný vzduch do kolektoru kde je ohříván. Velikost mezer musí být dopředu propočítána, případně experimentálně ozkoušena. Při malých mezerách dochází ke zpomalování fluktuace vzduchu do kolektoru a snižování účinnosti celé elektrárny. Na druhou stranu při velkých vzduchových mezerách může docházet ke zpětnému unikání vzduchu z kolektoru do okolí nebo turbulentním jevům, které by rovněž zpomalovaly proudění vzduchu.



Obr. 2.2 Solární komín s kolektorem (Manzanares, Španělsko, 1982) [28]

Střecha bývá zhotovena ze skla či jiného průhledného nebo průsvitného materiálu. Vzniká zde skleníkový jev, kdy světlo je propouštěno dovnitř a je dopadem na zem přeměněno na teplo, které nemůže přes sklo unikat. Tento jev může být podpořen polopropustnými skly, či zvýšením světelné absorpce povrchu. Vzduch je ohříván jednak přímo slunečním zářením a jednak od země, která je zahřívána. Pro výrazné zvýšení efektivity je možné umístit na zem černě natřené trubky, vaky či jiné zásobníky vody (viz. obr. 2.3). Tyto zásobníky jsou přes den nahřáty a v noci uskladněné teplo uvolňují, díky čemuž může elektrárna pracovat i v noci. Dalším využitím plochy pod kolektorem, která bývá rozsáhlá, je pěstování plodin.



Obr. 2.3 Znárodnění skladování tepla pod kolektorem [29]

Původně se mělo zato, že pod kolektorem nic neporoste, jelikož zde budou vysoké teploty a zastřešení od srážek. Navíc je předpokládáno umístění těchto elektráren do pouštních a polopouštních oblastí, kde je vody nedostatek. První realizovaná experimentální elektrárna pracující na principu solárního komínu (Manzanares, 150 km jižně od Madridu, Španělsko, 1982) ukázala, že přes noc dochází ke kondenzaci vlhkosti ze vzduchu, která se vysráží v kolektoru a vznikají zde vhodné podmínky pro pěstování plodin. [30]

## 2.2 Turbíny a generátor

Turbíny slouží k transformaci kinetické energie vzduchu na rotační energii turbíny a následně na energii elektrickou. Jsou umístěny u úpatí elektrárny a jsou zpravidla jediným výrobně složitějším prvkem v celé elektrárně. Turbíny pro solární komín musí využívat relativně pomalu proudícího vzduchu, proto jsou užívány uzavřené turbíny, které lépe dokáží využít tlaku na rotorové listy. Pro optimální funkci je nutno regulovat sklon listů a regulovat tak odpor, který listy kladou vzduchu. Tímto způsobem lze udržovat konstantní rotaci rotoru pro široký rozsah rychlostí vzduchu s takřka nezměněnou účinností. Turbíny a jejich počet dimenzujeme a umísťujeme podle potřeby a rozměrů celé elektrárny. U menších rozměrů může stačit jedna v horizontální poloze, u větších zvolíme více turbín ve vertikální poloze u paty komína. Ovládání sklonu listů turbíny je možné realizovat hydraulicky nebo elektricky, je však třeba vložit prvek zajišťující zastavení turbín, aby nedošlo k havárii. [30]

Generátor či generátory jsou podle návrhu konstrukce umístěny taktéž u paty komína poblíž turbín. K elektrické přeměně mohou posloužit 3- fázové synchronní či asynchronní generátory. Lze zde využít i pomaluběžné synchronní generátory s vysokým počtem vyniklých pólů, vždy navržených pro danou elektrárnu, kdy lze rychlost otáček turbíny

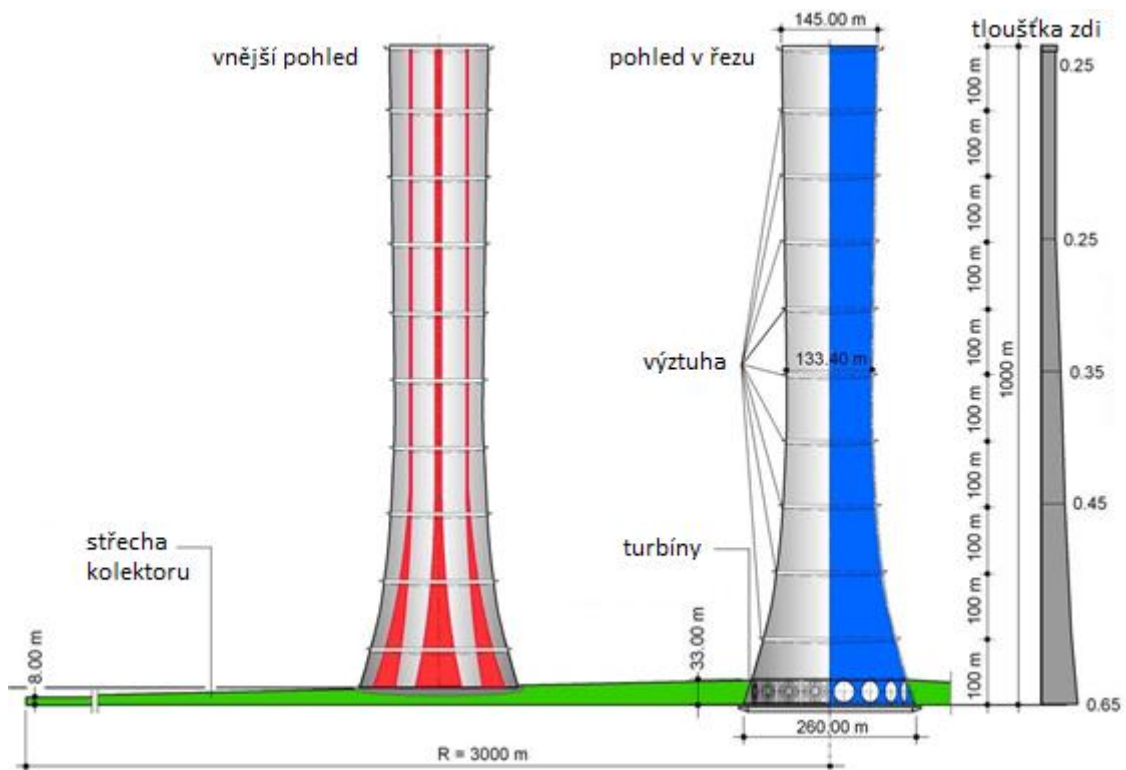
nastavit způsobem popsaným výše a snadno skloubit s alternátorem a tím se vyhnout dodatečným ztrátám ve frekvenčních měničích.

## 2.3 Komín

Komíny těchto elektráren jsou profilově podobné chladicím věžím v kombinaci s vysokým komínem. Jak již bylo nastíněno výše, výška komínu slouží ke zvýšení rozdílu teplot v kolektoru a na výstupu komínu. Výška komínu určuje i jeho poloměr přibližným optimalizačním vztahem popsaným následující rovnicí:

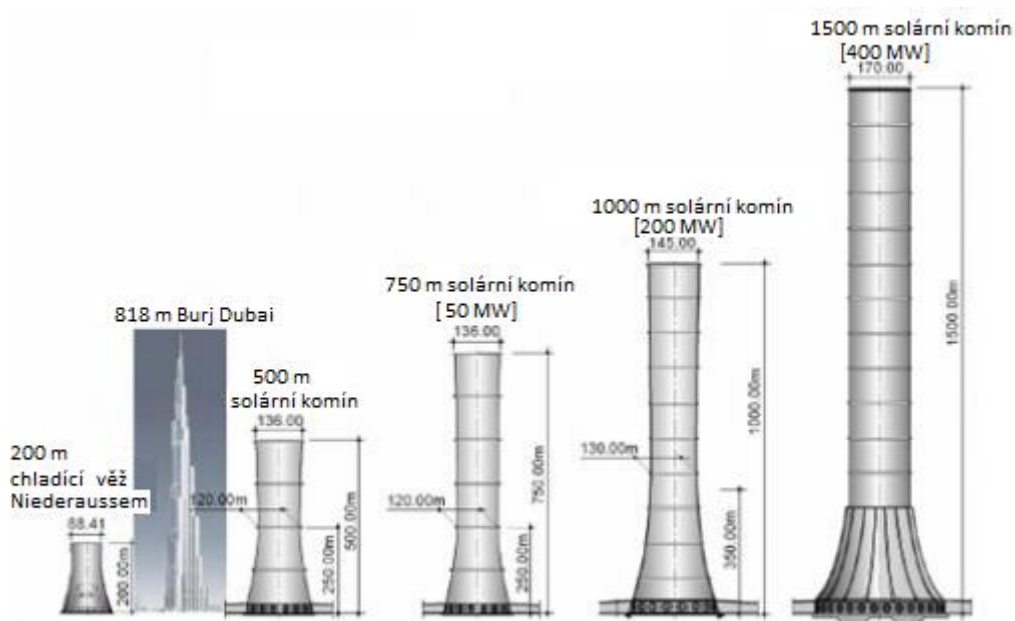
$$\frac{H}{R^2} \cong 0,08 \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (2.1)$$

kde  $H$  je výška komínu a  $R$  jeho poloměr. U vyšších komínů jsou navrhovány železobetonové konstrukce, u základny rozšířené a s rostoucí výškou se zeslabuje se tloušťka zdi (viz. obr. 2.4). U menších komínů je možné použít kombinaci plastů a kovů, jediná kritéria kladená na komín jsou: tepelná izolace, neprodyšnost, hladké stěny pro snížení tření, mechanická pevnost, nízká hmotnost. [31]



Obr. 2.4 Řez konstrukce solárního komínu [31]

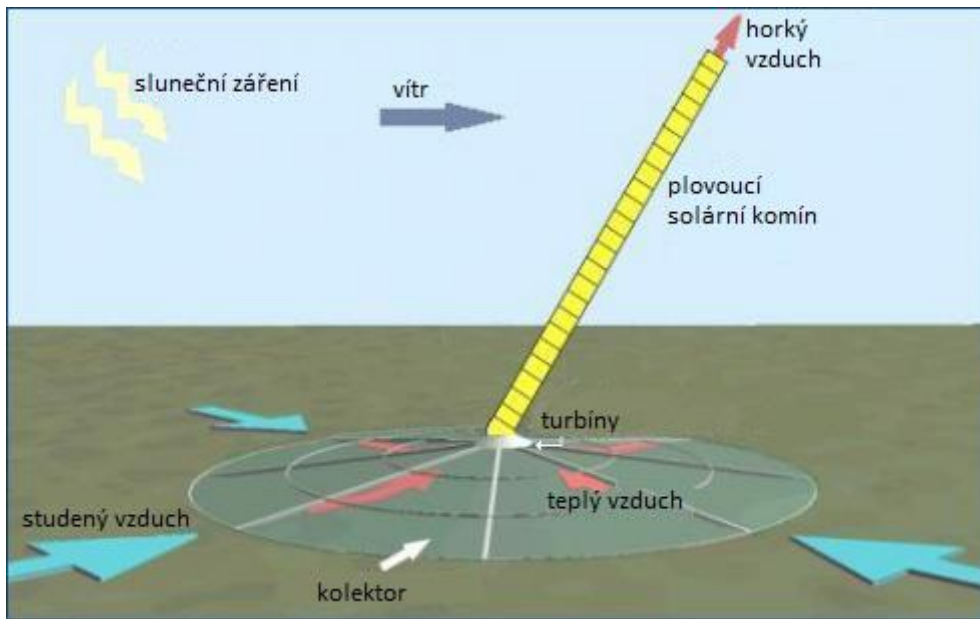
U plánovaných elektráren o vysokých výkonech se předpokládají výšky komínů až 1500 m, taková elektrárna by měla teoreticky dosahovat špičkového výkonu okolo 400 MW (viz obr. 2.5).



Obr. 2.5 Vysoko výkonové solární komíny, teoretické výšky a výkony [32]

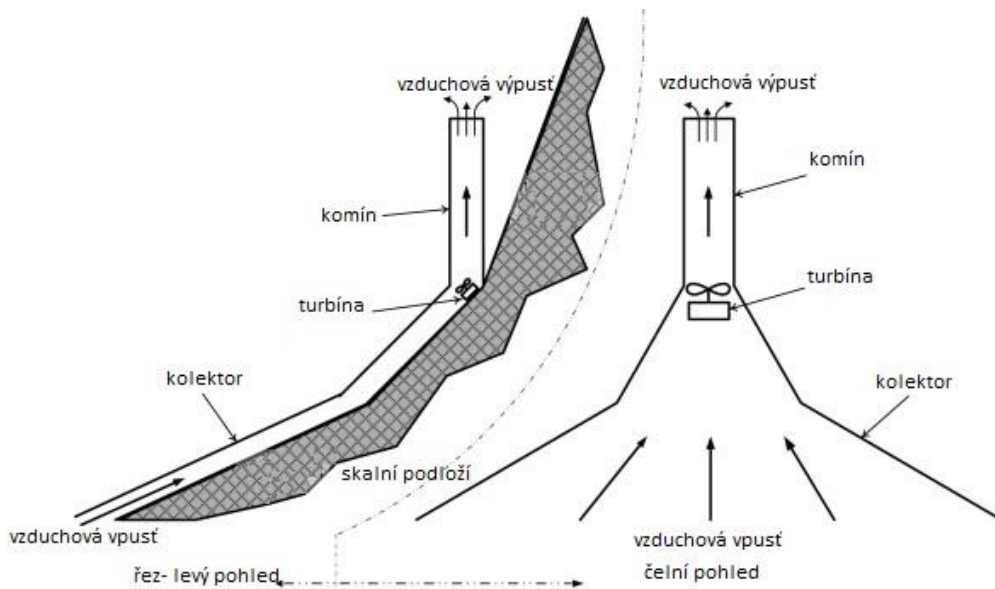
Výška komínu přímo ovlivňuje celkovou účinnost celé elektrárny, při dosažení výšky komínu 1500 m je teoreticky rozdíl teplot u země a u konce komínu 15 °C a proto by docházelo k proudění vzduchu i bez jakéhokoliv slunečního záření. Samozřejmě s výškou komínu roste technologická náročnost, požadavky na kvalitu a množství materiálu a s tím spojené náklady.

Způsobem, jak dosáhnout vysoké výšky při snížených nákladech, může být koncept tzv. plovoucího komínu. Jedná se o koncept, kdy je plášť komínu tvořen lehkým materiálem a podél komínu jsou umístěny kružnice naplněné plynem lehčím než vzduch, tím by měla vzniknout samonosná konstrukce. Komín se naklání směrem po větru, jak je naznačeno na obrázku 2.6, tím se snižují turbulentní ztráty vznikající u vyústění komínu, jelikož vzduch vychází v podobném směru jako okolní vítr. Touto technologií by se měla radikálně snížit cena celé konstrukce, patrně však za cenu snížené životnosti. [33]



Obr. 2.6 Naklání plovoucího komínu ve větru [33]

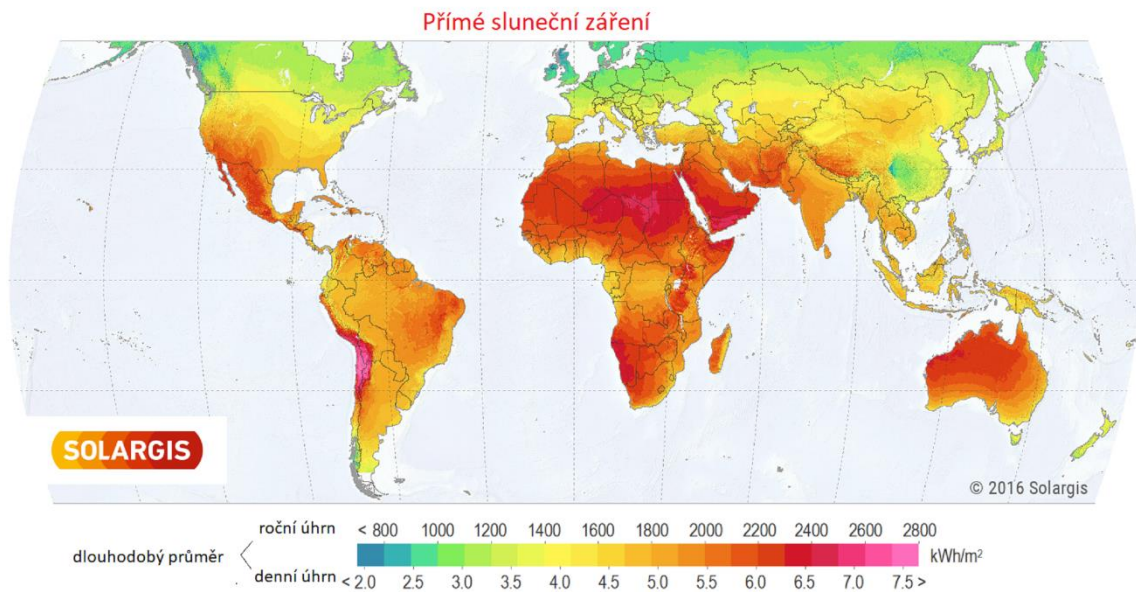
Další možností, jak umístit solární komín je položit jej na skalnaté podloží hory. Pro různé zeměpisné šířky se liší ideální úhel pro sklon kolektoru tak, aby co největší část roku dopadalo záření nejefektivněji (kolmo). Vhodným regionem pro takovou konfiguraci je Čína, s mnoha odlehlými horskými oblastmi s různými sklony svahů, ale i jinde ve světě. Další výhodou je možnost vedení samotného komínu po úbočí hory, která by tak celou konstrukci podporovala libovolně vysoko [32].



Obr. 2.7 Solární komín umístěný na svahu skály, řez z boku a přímý pohled [34]

## 2.4 Lokace a údržba

Vzhledem na enormní rozlohy kolektoru je jedním z prvotních nároků na solární komínovou elektrárnu nízká cena pozemků a jejich rovinatost. Dále pak geologicky a podnebně stabilní lokalita, kde nehrozí výskyt zemětřesení, hurikánů, tornád, písečných bouří apod. V neposlední řadě je pak třeba volit lokalitu s vysokou průměrnou hustotou ozáření (viz obr. 2.8). Lokality splňující tato kritéria se nacházejí v neobydlených částech Austrálie, na Blízkém východě, v Africe a Číně.



Obr. 2.8 Mapa solárního vyzařování [35]

Při dodržení správné volby lokace elektrárny jsou předpokládáné náklady na údržbu minimální. Předpokládá se, že konstrukce je bezúdržbová a transparentní vrstva kolektoru by se také neměla příliš zanášet. Jednalo by se teda prakticky jen o kontrolu a údržbu turbín, generátorů a vedení. Elektrárna samotná nepotřebuje žádné další materiály, a proto veškeré náklady vznikají při výstavbě.

## 2.5 Výpočet účinnosti systému

Pro zhodnocení úlohy bude proveden výpočet účinnosti systému, který bude zahrnovat několik pod výpočtů. Zde jsou uvedeny všechny potřebné vztahy, které pro dané výpočty bude potřeba, jedná se o výpočty pro skutečnou sluneční komínovou elektrárnu. Modifikované výpočty budou uvedeny v praktické části ke konkrétní situaci. Vztahy převzaty z [36].

Množství energie dodávané do systému sluncem může být jednoduše charakterizován následující rovnicí.:

$$Q_s = E \cdot S_{kol} \text{ (W)} . \quad (2.2)$$

kde

$Q_s$  – celkový výkon dopadající na kolektor ve formě záření (W)

E - intenzita záření ( $W \cdot m^{-2}$ )

$S_{kol}$  – plocha kolektoru pohlcující světlo ( $m^2$ )

Pak lze výkon elektrárny popsat rovnicí 2.3 jako:

$$P = Q_s \cdot \eta_{kol} \cdot \eta_{tur} \cdot \eta_{kom} = Q_s \cdot \eta_{cel} \cdot \text{(W)} \quad (2.3)$$

P – výkon elektrárny (W)

$\eta_{kol}, \eta_{tur}, \eta_{kom}$  – účinnosti kolektoru, turbíny a komínu (-)

$\eta_{cel}$  - celková účinnost systému (-)

A pro výkon obsažený ve vzduchu můžeme použít rovnici číslo 2.4

$$P_{vz} = \Delta p \cdot v \cdot S_{kol} \text{ (W)} \quad (2.4)$$

$P_{vz}$  – je výkon teplého vzduchu proudícího rychlostí v (W)

$\Delta p$  – rozdíl tlaku na turbíně a na vstupu vzduchu (Pa)

v - rychlost proudění vzduchu komínem ( $m \cdot s^{-1}$ )

Pro komíny bez turbíny je veškerá energie charakterizována výkonem odvozeným z kinetické energie vzduchu dle rovnice 2.4b.

$$P_{vz} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2 \text{ (W)} \quad (2.4b)$$

Rozdíl tlaků vypočteme z rovnice číslo 2.5 následovně:

$$\Delta p = g \cdot (\rho_o - \rho_k) \cdot H \text{ (Pa)}. \quad (2.5)$$

$g$  – gravitační zrychlení ( $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

$\rho_o$  – hustota venkovního vzduchu ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$\rho_k$  – hustota vzduchu u paty komínu ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$H$  – výška komínu (m)

Potom pomocí rovnic 2.6

$$\eta_{kol} \cdot E \cdot S_{kol} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_k - T_o) \quad (2.6)$$

$\dot{m}$  - hmotnostní průtok vzduchu ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$c_p$  – měrná tepelná kapacita vzduchu ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

$T_k$  – teplota uvnitř kolektoru u paty komínu (K)

$T_o$  – teplota okolního vzduchu (teplota v místnosti) (K)

Z rovnice 2.6 lze vyjádřit výkon kolektoru.

$$P_{kol} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_k - T_o) \quad (2.7)$$

$P_{kol}$  – výkon kolektoru (W)

a 2.8

$$\dot{m} = S_{kom} \cdot \rho_k \cdot v \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}. \quad (2.8)$$

$S_{kom}$  – plocha průřezu komínu ( $\text{m}^2$ )

Můžeme změřit rychlost vzduchu, teplotu a dopočítat měrnou tepelnou kapacitu a hustotu vzduchu pomocí rovnic 2.9 a 2.10, a dopočítat účinnost systému při použití rovnice 2.11 pro účinnost komínu a určení účinnosti turbíny.

$$\rho_k = 1,1614 - 0,00353 \cdot (T_k - 300) \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)} \quad (2.9)$$

$$c_p = [1,007 + 0,00004 \cdot (T_k - 300)] \cdot 10^3 \text{ (J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)} \quad (2.10)$$

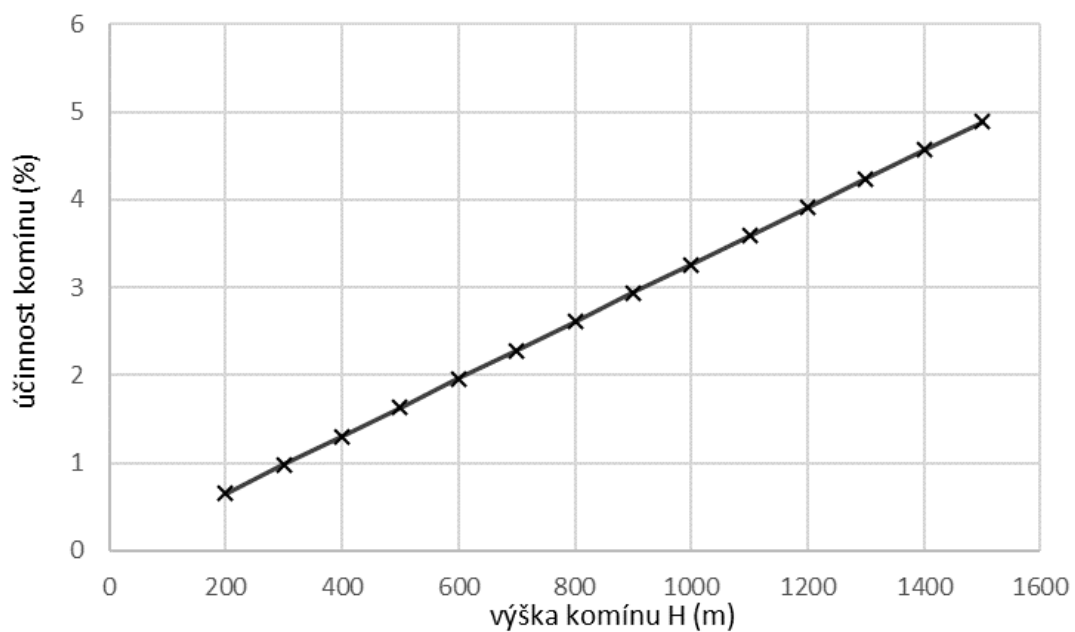
Vztahy 2.8 a 2.9 jsou převzaty z [37].

$$\eta_{\text{kom}} = \frac{g \cdot H}{c_p \cdot T_o} \quad (2.11)$$

Rovnice 2.11 je platná pro elektrárny větších rozměrů. Z této rovnice je zřejmá závislost zmíněná již v kapitole 2.3, že účinnost komínu je přímo úměrná jeho výšce. Tím pádem vyšší komín přímo zvyšuje účinnost celé elektrárny. Účinnost turbíny se pohybuje okolo 80 % a účinnost kolektoru je závislá na rozdílu teplot okolního vzduchu a vzduchu uvnitř kolektoru, který neovlivníme. Proto je zvyšování komínu jedinou variantou pro zvyšování účinnosti systému, jak je znázorněno v tabulce 2.1 a obrázku 2.9 pro venkovní teplotu 25 °C a rozdíl teplot 50 °C. [37]

Tabulka 2.1 Vliv výšky komínu na jeho účinnost

H (m)	$\eta_{\text{kom}}$ (%)
200	0,652
300	0,978
400	1,304
500	1,631
600	1,957
700	2,283
800	2,609
900	2,935
1000	3,261
1100	3,587
1200	3,913
1300	4,24
1400	4,566
1500	4,892



Obr. 2.9 Graf závislosti účinnosti komínu na jeho výšce

Odhadovaná rychlost proudění vzduchu komínem je popsána rovnicí 2.12:

$$v = \sqrt{\left[2g \cdot H \cdot \frac{(T_k - T_o)}{T_o}\right]} \quad (m \cdot s^{-1}). \quad (2.12)$$

## 3 VYUŽITÍ SOLÁRNÍCH KOMÍNŮ

Existuje více způsobů použití principu solárních komínů, v této práci je nejvíce probíráno využití pro výrobu elektrické energie. Existuje však mnoho způsobů kombinace pro alternativního použití, jedním z nich je použití jako pasivní ventilace popsané v kapitole 3.3, dalšími způsoby použití jsou různé hybridní systémy umožňující výrobu vodíku, či odsolování vody. Tyto způsoby použití budou nastíněny v dalších pár odstavcích, stejně tak o realizovaných a plánovaných projektech s tematikou solárního komínu.

### 3.1 Příklady solárních komínových elektráren

Bohužel od experimentu v Manzanares popsaném blíže v kapitole 3.2 nebyla stavba žádné větší komínové elektrárny realizována, a to především kvůli vysokým nákladům bez jakýchkoliv záruk na úspěch (v případě například pádu komínu by byl zisk z celého projektu nulový). V dnešní době existuje několik subjektů zabývajících se vývojem a návrhy solárních komínů, a systémů založených na jejich principu. Mezi nejvýznamnější patří bezpochyby australská společnost sídlící v USA EnviroMission Inc., zaměřuje se především na trhy Severní Ameriky, Indie, Austrálie, severní Afriky a státy blízkého východu. V USA jsou vytipovány dvě příhodné lokality. [38]

První lokalita se nachází v Arizoně v kraji La Paz přibližně 130 km západně od Phoenixu, její a činí 2225 hektarů na které by mohla být postavena elektrárna se špičkovým výkonem 200 MW. S výškou dosahující okolo 800 m by se jednalo o nejvyšší stavbu v Severní Americe a druhou nejvyšší stavbu na světě. V dané lokalitě je až 300 slunných dní v roce, za kterých se venkovní teplota pohybuje okolo 40 °C. V kolektoru je předpokládána dosažená teplota okolo 80–90 °C a teplota na výstupu z komínu 32 °C, což nám způsobí teplotní rozdíl 50-60°C. Dosažený rozdíl teplot způsobí nasávání vzduchu komínem, který by měl při těchto podmínkách dosahovat okolo  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Celá konstrukce by měla stát přibližně 750 milionů dolarů. Vše je však již několik let pozastaveno, důvodem bylo provádění předběžných dohod o výkupu pozemků, zajištění povolení se stavbou a získávání investorů. [38] [39]

Dalším ambiciózním projektem je 1500 m vysoká komínová elektrárna v Austrálii, série menších elektráren v Indii či v Namibii (společnost GreenTower Ltd) a to s kogeneračním využitím pro pěstování plodin. Jelikož se však předpokládá, že bude Arizonská elektrárna postavena první, ostatní zatím vyčkávají na výsledky úspěchu tohoto projektu, protože se jedná o nákladnou investici se zatím nejistým úspěchem. Pro menší státy by měl případný neúspěch kruciólní následky, proto se není čemu divit.

## 3.2 Výsledky projektu v Manzanares

Již jsem se zmínil v kapitole 2.1, že první solární komínová elektrárna větších rozměrů byla postavena ve Španělsku u města Manzanares v roce 1982 (na obrázku 2.2), jednalo se o experiment placený německým ministerstvem pro výzkum technologií spolu se španělskou firmou UNION ELECTRICA S.A. Plánovaná doba fungování projektu byla 3 roky, nakonec však trval projekt let 7, až do zřícení konstrukce, která nebyla na tak dlouhou dobu navržena. Cílem experimentu bylo ověření teoretických principů a dlouhodobé sledování veškerých aspektů, které mohli býti v teorii opomenuty.

### Parametry

Špičkový výkon elektrárny byl odhadnut na 50 kW, k tomuto výkonu byly teoreticky dopočítány následující hodnoty pro jednotlivé komponenty. S ohledem na plánovanou délku života byly na stavbu celé konstrukce použity levnější materiály. Komín byl 194,6 m vysoký a byl zhotoven z 10 m dlouhých plechových rour (pouze přes 1 mm tlustý plech), které byly naskládány na sebe a spojeny vyztužovacími prstenci a jeho průměr byl 5 m. Základnu komínu tvořila 10 m vysoká železobetonová základna, ve které byla horizontálně umístěna turbína s nastavitelnými lopatkami. Turbína dosahovala účinnosti až 83 % a rychlost proudění vzduchu dosahovala okolo  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . [30], [40]

Celý komín byl sestaven na zemi a poté zdvižen a ukotven 3 skupinami kotvících lan a vážil 194 tun. Kolektor nebyl kulatý a jeho plocha byla cca  $46\,000 \text{ m}^2$  (což by přibližně odpovídalo kruhu o poloměru 122 m). Průměrná výška kolektoru 1,9 m s teplotním diferencíalem 17 K, účinnost kolektoru však činila pouhých 32 %. Jako krycí materiál kolektoru bylo zvoleno více materiálů pro prozkoumání vhodnosti jejich užití. Nejdražším ale ve výsledku nejlepším materiálem se díky své odolnosti a malému znečišťování osvědčilo sklo. Dalším materiálem byly tvrzené PVC fólie, které se v podmínkách polopouštního podnebí trhaly ve větru a bylo nutné je měnit. Na většinu práce postačovalo proškolení místní pracovníky, což podpořilo tamní lokální ekonomiku. [42]



Obr. 3.1 Komínová elektrárna v Manzanares [43]

### **Vyhodnocení projektu**

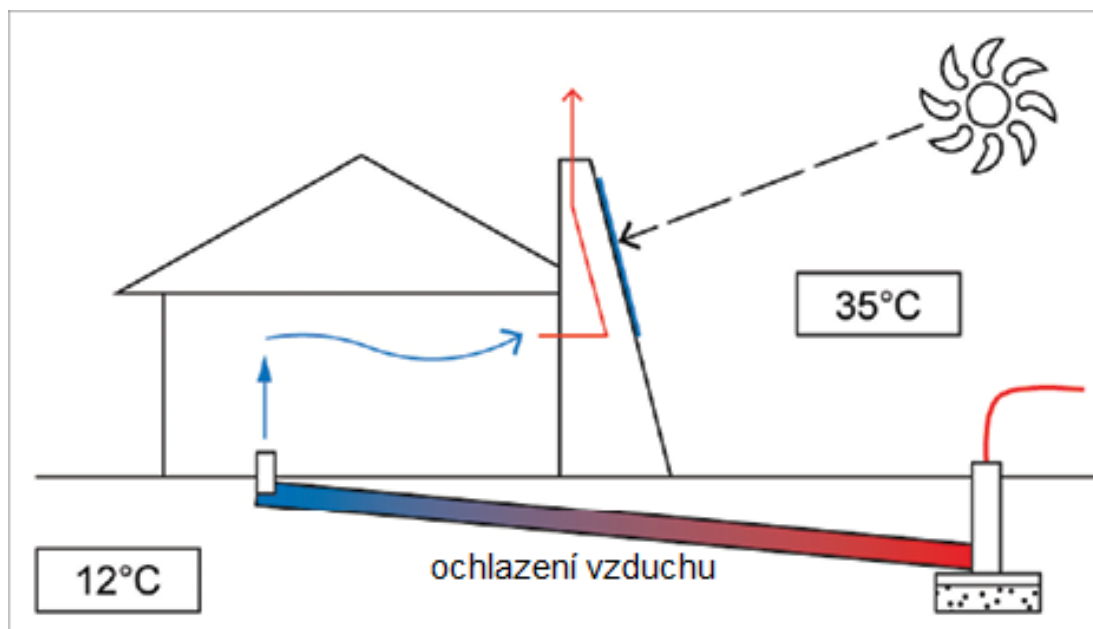
Celý projekt se nacházel ve velmi větrné a prašné oblasti, což do značné míry ovlivňovalo intenzitu dopadajícího záření, která se kvůli tomu pohybovala nejčastěji do  $900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . V průběhu projektu byla snížena odrazivost kolektoru aplikací vrstvy bitumenu. V kolektoru nebyl vložen žádný přídavný absorbér, a to způsobovalo časté kolísání výkonu i v průběhu dne, tento nedostatek by však přídavný absorbér vyřešil. Teplota půdy pod kolektorem dosahovala až  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , proto byl největším překvapením hojný výskyt rostlin pod kolektorem, což dalo za vznik nápadu s využitím této plochy pro pěstování plodin v pouštních podmínkách, navíc zlepšily rostliny postupně tepelnou kapacitu půdy.

Výsledky projektu byly velmi slibné, ukázala se nízká poruchovost jednotlivých komponent a shoda s teoretickými výpočty, které měli dát za vznik elektrárnám většího

měřítka. Navíc po vstupních nákladech jsou provozní náklady prakticky nulové a není potřeba lidského dohledu, projekt v Manzanares byl poslední 3 roky svého života plně automatizován a to mezi lety 1986 – 1989, kdy nebyla automatizace na takové úrovni jako dnes. [40]

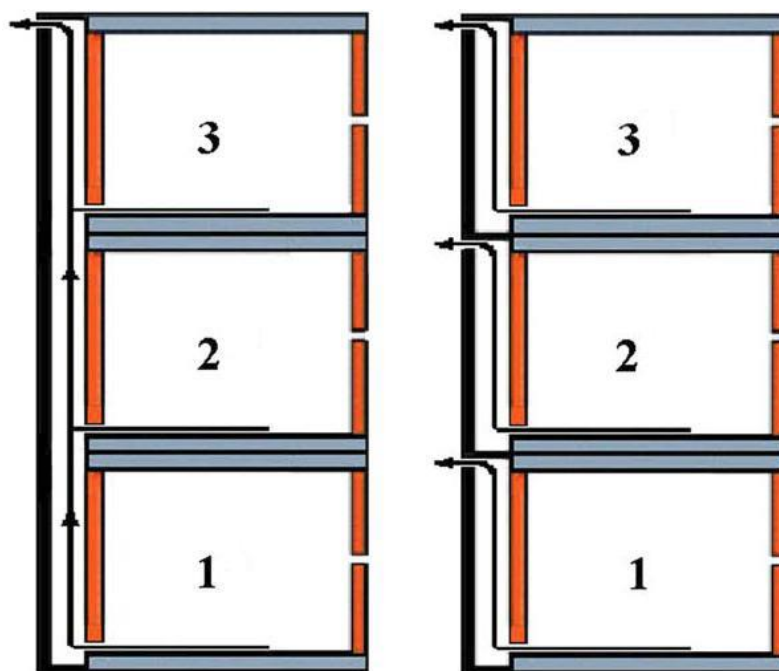
### 3.3 Ventilace

Dalším významným způsobem použití solárního komínu je pro pasivní ventilaci, je zde využito slunečního záření na vytvoření rozdílu teplot okolního vzduchu a vzduchu uvnitř kolektoru komínu. Konstrukce bývá umístěna na střeše či na vnější části budovy se sáním procházejícím místností, ve kterých vyžadujeme cirkulaci vzduchu. Příklad využití solárního komínu pro ventilaci rodinného domu je znázorněn na obrázku 3.2. Za teplých letních dní je teplý venkovní vzduch nasáván skrze trubici vedoucí pod zemí, v této trubici je vzduch ochlazen a přiveden do solárního komínu umístěného na střeše přes místnosti domu, které jsou tímto větrány chladnějším vzduchem, než je venkovní. Tah této ventilace je způsoben rozdílem z pod zemí ochlazeného vzduchu a ohřátého vzduchu v komíně. Využití mají tyto systémy především v lokalitách jako je Arizona, Austrálie či Střední východ, a to s ohledem na finanční a energetickou náročnost klimatizací v letním období a následným přetěžováním sítí a růstem ceny elektřiny. [44]



Obr. 3.2 Schéma solárního komínu pro ventilaci rodinného domu [44]

Na podobném principu lze ventilovat i vícepatrové budovy, kde není komín umístěn na střeše, nýbrž na zdi domu orientované na nejvíce slunečnou stranu pro danou zeměpisnou šířku a na opačné straně umístěn průduch. Celá situace je znázorněna na obrázku 3.3 pro dvě různé konfigurace. V první konfiguraci je komín veden podél celé výšky budovy s otvory v každém patře, kde je vzduch nasáván a v druhé konfiguraci je komín rozdělen pro každé patro zvlášť. Experimentálně měla první varianta lepší výsledky. Nesmí být opomenuta důkladná izolace mezi dnem kolektoru a stěnou budovy, jinak by docházelo přestupem tepla přes zeď k ohřívání místností. Další samozřejmostí je možnost vzduchovou vpusť uzavřít a zamezit tak ventilaci. V roce 2007 dostal František Havránek cenu Jiřího Skuly (cena za přínos do oblasti úspory energie) a to za projekt Využití solárního komínu pro přirozené větrání. Projekt se zabýval teoretickou úsporou energie na vzduchotechnice fiktivního gymnázia aplikací 3 solárních komínů. Z výsledků analýzy vyplývá až 53 % roční úspora energie na vzduchotechnice, což dokazuje možnou rentabilitu tohoto typu větrání i na území České republiky. Velkou nevýhodou se však ukázaly velké výkyvy proudění v letním období, kdy k proudění docházelo pouze při osvětlení komínu, při zatažené obloze k proudění téměř nedocházelo a muselo být kompenzováno zapnutím ventilátorů. [45], [46]



Obr. 3.3 Ventilace vícepatrových budov. [45]

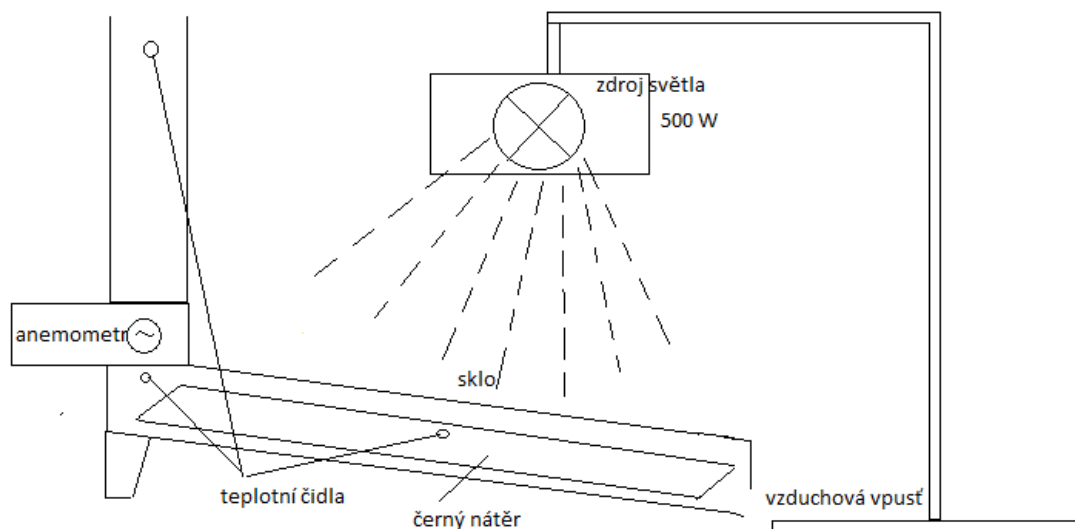
## 4 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem úlohy je seznámit se teoreticky s principem funkce solárního komínu a následně naměřit závislost proudu vzduchu opouštějícího komín na rostoucí v čase. Měření započne na pokojové teplotě (která bude zaznamenána) a po zapnutí lampy bude studenty zaznamenávána rychlost proudícího vzduchu anemometru a zároveň měřena teplota teplotního čidla během stanovené doby. Měření bude probíhat až do ustáleného stavu (přibližně 30 minut), případně bude dopředu určena poslední teplota. Jako poslední bod bude studenty vypnuto svítidlo a bude provedeno měření klesání teplot a otáček anemometru (přibližně také 30 minut).

Naměřené hodnoty budou vyneseny do grafů jako závislost rychlosti a teploty vzduchu na čase. Na konci úlohy proběhne výpočet efektivity modelu solárního komínu a následná diskuze.

### 4.1 Zkušební model

Praktická část diplomové práce se zabývá návrhem laboratorní úlohy do předmětu obnovitelné zdroje energie na téma solárního komínu. Na obrázku 4.1 je znázorněno zkušební schéma pracoviště.



Obr. 4.1 Schéma pracoviště zkušebního modelu

Jednalo se pouze o zkoušku funkčnosti systému s malými rozměry. Podle tohoto hrubého návrhu byl vyroben model z kartonového papíru a sklo nahrazeno igelitovou fólií, pouze aby byla potvrzena funkčnost takového laboratorního modelu.



Obr. 4.2 Provizorní verze pro test funkčnosti v laboratoři

Při výrobě této zkušební verze se vyskytlo několik problémů, které nám přinesly drahocenné informace o nedostatcích konceptu. Jedním z největších problémů byl způsob napojení komínu na kolektor. V kartonové verzi byl vyřešen utěsněním spojů lepicí páskou jako dočasné řešení, které je ovšem pro dřevěné provedení naprosto nevhodné. Výhodou kartonové verze bylo, že mohl být karton ohýbán, což u finálního konstrukturu vyrobeného ze dřeva nepůjde. Závažným problémem byla také nepřesnost vyřezávání jednotlivých modulů, kvůli čemuž vznikly vzduchové mezery, které musely být utěsněny pomocí potravinářské fólie a izolepy.

Dalším zjištěním byla detekce vysokých teplot, které po delším záření roztavily plastové části, po tomto zjištění je jisté, že musí být použity teplotně odolné komponenty, a to včetně případných lepidel. Přesto však bezpochyby docházelo k úniku tepla, kvůli nedostatečné vzduchotěsnosti. Navíc docházelo k velkému úniku tepla vedením přes dno krabice, které se nahřálo a sálalo teplo pod sebe.

Přesto však zhruba po minutě pod 500 W halogenovou lampou docházelo k senzorické detekci toku teplého vzduchu a po několika minutách byl již tento pohyb výrazný. Tato verze napomohla predikovat případné nesnáze do budoucí práce, které musejí být promyšleny. Proto byl model shledán jako přínosné poučení.

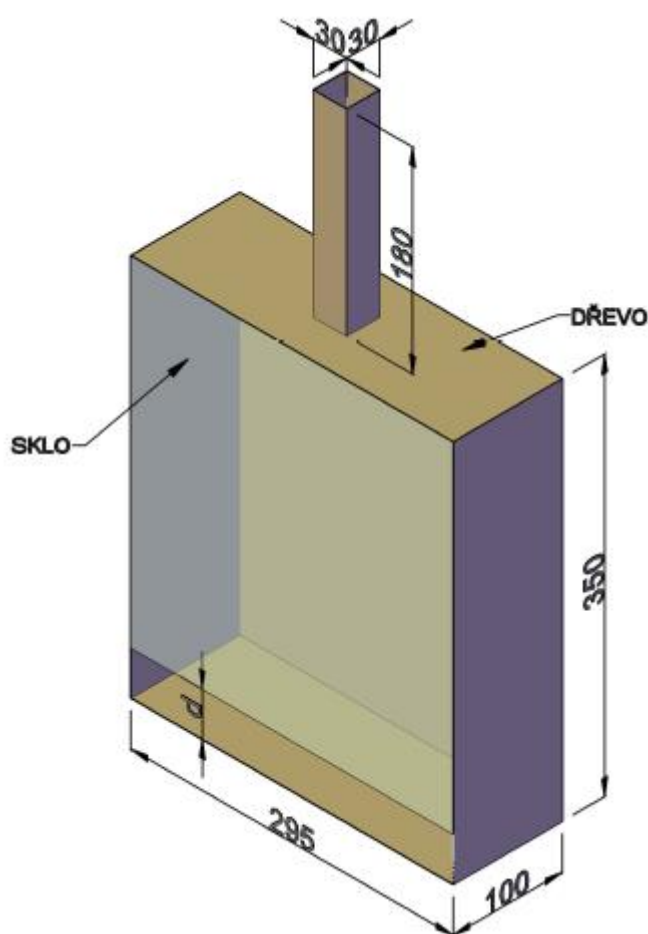
## 4.2 Skutečný model



Obr. 4.3 Model experimentálního solárního komínu

Obecně musí být kryt celého modelu vyroben z tepelně izolačního materiálu, aby nedocházelo k velkým tepelným ztrátám zařízení. Zkušební model byl zhotoven z kartonového papíru, který byl shledán hrubě nedostatečný. Proto byl finální model zhotoven ze dřeva s důrazem na tlustší vrstvu dřeva na dně kolektoru, do kterého dopadá největší množství záření. Za transparentní teplotně odolný materiál bylo zvoleno bezpečnostní sklo se zaoblenými okraji. To z důvodů větší bezpečnosti při manipulaci s tímto sklem a lepší odolnosti proti nárazům. K maximalizaci absorpce povrchu uvnitř kolektoru slouží černá barva na dně a bocích kolektoru.

Zařízení mělo původně být ve vodorovné poloze s mírným stoupajícím náklonem směrem ke komínu, aby docházelo k navádění stoupajícího vzduchu ke komín. Po zkušenostech se zkušební verzí jsme se rozhodli celý koncept změnit, komín postavit vertikálně s lampou umístěnou kolmo ke středu kolektoru. Tím je lépe docíleno usměrnění vzduchu a zabráněno unikání vzduchovou vpusť. Všechny části byly důkladně spojeny a ošetřeny proti unikání horkého vzduchu lepidlem a lepicí páskou.



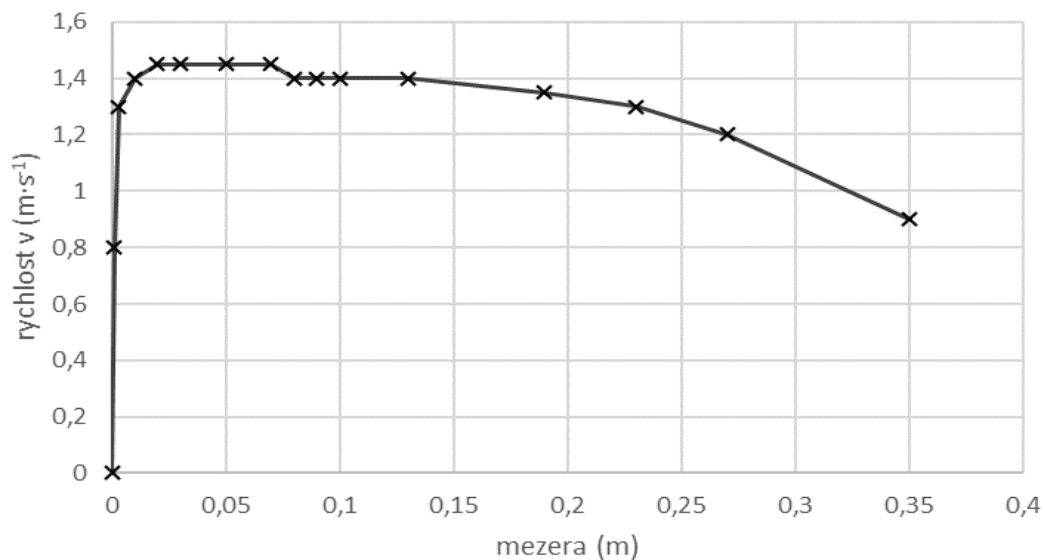
Obr. 4.4 Rozměry modelu v mm

### 4.3 Vzduchová vpust' a zdroj záření

Velikost vzduchové vpusti je těžké dopředu určit pro takovéto zařízení. Náš model je jedinečný svojí konstrukcí, pro kterou nelze využít některé vztahy užívané pro skutečné konstrukce aplikovat. Výhodou naší konstrukce je výsuvná transparentní část absorberu při zachování těsnosti.

Velikost mezery vzduchové vpusti musela být experimentálně určena měřením. Měření probíhalo za extrémních podmínek s lampou vzdálenou pouhých 12 cm, což je nejkratší vzdálenost, jaké lze s danou lampou vzhledem k ochranným mřížkám dosáhnout. Dosažená teplota byla 115 °C a teplota místnosti 29,3 °C. Tento postup byl zvolen pro dosažení co nejvyšší rychlosti vzduchu a získání tak prostoru pro potřebná měření.

Naměřená závislost je zobrazena na obrázku 4.5.



Obr. 4.5 Závislost rychlosti vzduchu na velikosti vzduchové mezery při  $T_k = 388,15\text{ K}$  a  $T_o = 302,45\text{ K}$

Lze zde vidět nulovou rychlost vzduchu (neměřitelnou naším anemometrem), což dokazuje relativně dobrou těsnost celého zařízení. Již při milimetrové vzduchové mezeře dochází k prudkému zrychlení a nasávání vzduchu, mezera je však stále nedostatečná a vzduch je tímto brzděn. Plná rychlost proudění je dosažena při pouhých dvou centimetrech vzduchové mezery, stále však kolísá a je stabilní až od tří centimetrů.

Maximální rychlost větru dosahuje do sedmi centimetrové mezery a poté velmi pomalu rychlost klesá, to je zapříčiněno únikem teplého vzduchu přes moc širokou vzduchovou mezeru, kde dochází k mísení a zpomalování vstupujícího vzduchu a tím výsledná nižší rychlost. K proudění vzduchu komínem dochází dokonce při úplném otevření kolektoru, při delším otevření však docházelo k dalšímu zpomalování vzduchu v důsledku rychlého chladnutí.

Optimální velikost vzduchové vpusti je odhadnuta na 5 centimetrů. Již 90 % maximální rychlosti je dosaženo již při 3 mm mezeře, což odpovídá ploše  $8,85\text{ cm}^2$ , to je blízko ploše komínu  $9\text{ cm}^2$ .

Zdrojem záření je halogenová lampa 500 W s patičí R7s a rozměry 180x255x135 mm (šířka x výška x hloubka) se zabudovaným reflektorem, v laboratoři je umístěna na výsuvném stojanu. Osazena žárovkou J-118 délka žárovky je 118 mm a má světelný tok 9 500 lm, teplotou chromatičnosti 3050 K a životností 2000 h.

## 4.4 Komín, anemometr a měření teploty

Další částí konstrukce je komín samotný. V reálných konstrukcích by měli komíny dosahovat výšek 200–1500 m pro dosažení potřebného rozdílu teplot. V našem případě výška komínu nehraje velkou roli, jelikož teplota bude v rámci místnosti přibližně stejná. Komín byl volen vzhledem ke konstrukci čtvercového půdorysu a k němu výška byla vypočítána na 0,18 metrů (dle vztahu 2.1).

Největší potíže se vyskytly v případě anemometru. Byl objednáán anemometr UNI-T model UT 363 zobrazen na obrázku 4.6.



Obr. 4.6 Anemometr UNI-T UT 363

Deklarované rozlišení bylo  $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  s rozsahem  $0\text{--}30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . První hodnoty, které však anemometr ukázal byly  $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a poté již po  $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Byl vyzkoušen další anemometr GM 816, měl však problém se samotným roztočením při tak malých rychlostech vzduchu a tak bez postrčení nezačalo prakticky žádné měření. Takto hrubé měření je samozřejmě nedostatečné, bohužel přesnější příruční verze se nevyrábějí. Problém měření rychlosti vzduchu je částečně vyřešen postupem měření, který je popsán v návodu.

Anemometr je podepřen na pevno instalovanou podpěrou, díky které jej lze vždy umístit na stejné místo uprostřed komínu, je vybaven i měřením teploty, avšak pouze do  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  a navíc se teplotní čidlo nachází mimo komín (po usazení anemometru).

## Měření teploty

Pro měření teploty bylo zakoupeno teplotní čidlo PT100 s třídou tolerance A, rozsahem – 50 °C až 350 °C. Čidlo bylo připájeno na kabel a opatřeno konektory. Měření probíhá pomocí přístroje Agilent 3410A v módu měření teploty. Měření teploty je automatizováno pomocí softwaru Agilent VEE Pro. Program se nazývá komín2.vee. Modře jsou v obrázku 4.7 znázorněny parametry excel souboru. Zeleně jsou definovány globální proměnné souboru. Dále je definován timer, podle kterého je časováno měření každou vteřinu, počítadlo počtu měření(counter).

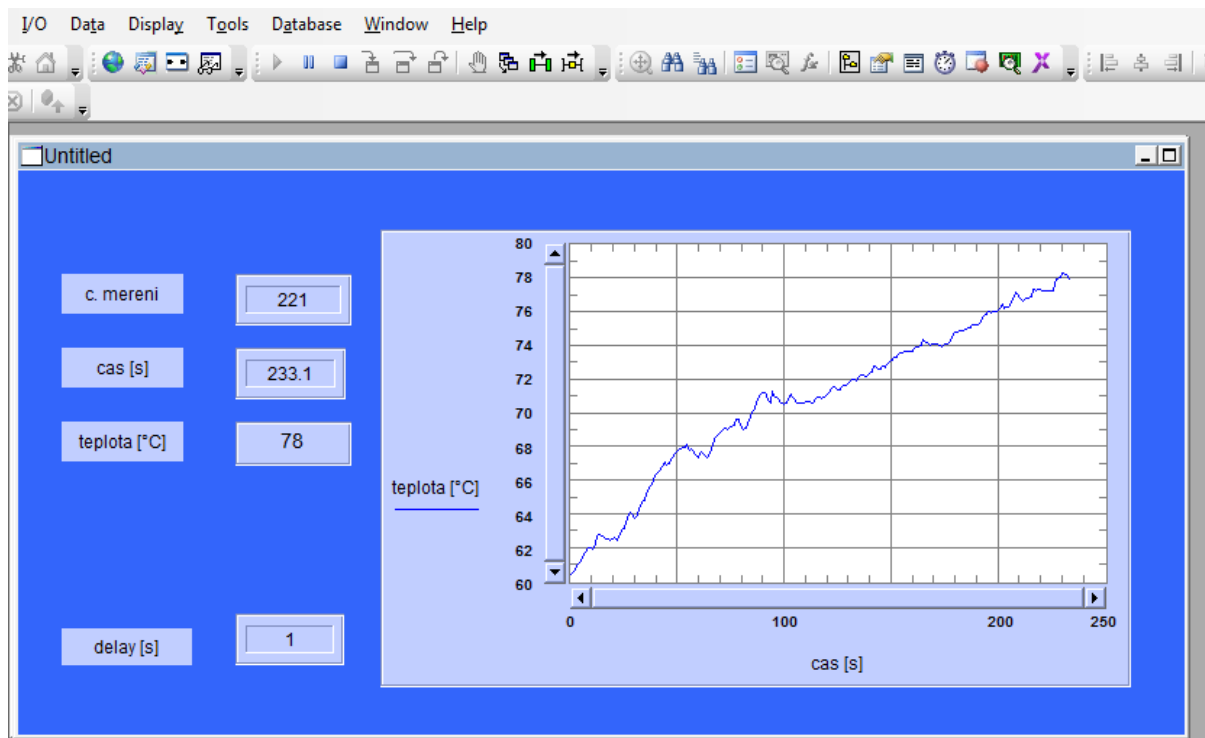
Nejdůležitější položkou je čtení dat teplot z multimetru měřícím příkazem v bílém rámečku. Příkaz realizuje měření teploty teplotního čidla PT100. Data jsou exportována do excelu pomocí modulu fill in cells a také do grafu zobrazeném v uživatelském panelu. Delay značí prodlevu mezi jednotlivými měřeními v sekundách.

```
graph TD
    Start[Start] --> Decl1[Declare xlsFileName]
    Decl1 --> Decl2[Declare xlsFileSpec]
    Decl2 --> Decl3[Declare range]
    Decl3 --> Decl4[Declare sheet]
    Decl4 --> Decl5[Declare ExcelWkwb]
    Decl5 --> Decl6[Declare ExcelApp]
    Decl6 --> Set1[Set xlsFileName]
    Set1 --> Set2[Set xlsFileSpec]
    Set2 --> StartExcel[Start Excel and Load Spreadsheet]
    StartExcel --> GetObj[Get Object reference to Worksheet and Create a Range Object]
    GetObj --> Timer[Timer]
    Timer --> Counter[Counter]
    Counter --> Fill[Fill in Cells]
    Fill --> StartExcel
    StartExcel --> Delay[Delay]
    Delay --> Instrument[instrument3]
    Instrument --> Counter
    Instrument --> Fill
    Instrument --> UntilBreak[Until Break]
    UntilBreak --> Start
```

Obr. 4.7 Program automatického odečítání teploty komín2.vee

48

V programu byl vytvořen uživatelský panel, ve kterém je možnost nastavení delay (prodleva mezi měřeními) a dále je zde číslo měření, čas od počátku měření, aktuální teplota a graf závislosti teploty na čase.



Obr. 4.8 Uživatelského panel programu komín2.vee

Teplotní čidlo s kabelem je připevněno na tenkou dřevěnou tyč, která je vyvedena do spodní části komínu (nesmí však být přímo vystavena záření lampy) a vycentrována. V předchozích zkušenostech s měřením teploty bez patřičného umístění ve středu komínu docházelo k vychylování pozice čidla a tím ke změnám teploty. V případě dotyku se stěnou komínu docházelo ke skokovým poklesům až o 10 °C během vteřin.

Dalším problémem při měření teploty bylo snížení rychlosti vzduchu vzhledem k narušení jeho proudu umístěnou tyčí s kabelem. Bez čidla byla rychlost vyšší až o 0,15 m·s<sup>-1</sup>. Jinou možností umístění čidla by bylo provrtání komínu, vsunutí čidla s vodičem a následné utěsnění a připevnění například lepidlem. Nevýhodou takového řešení je jeho nevratnost a trvalá instalace čidla bez možnosti vyjmutí. Navíc v případě poruchy čidla, po případně pájeného spoje by nejspíše došlo ke zničení komínu.

## 4.5 Možnost vložení absorberu tepla

Možným zlepšením celého měření byl návrh zásuvného absorberu, který by byl realizován hadičkou obsahující vodu a připevněné na nosné mřížce. Takovýto modul by mohl být buď zasunut, případně by se jednalo o trvalou instalaci, lépe by byly simulovány reálné podmínky, kde jsou přítomny také absorbery tepla (i zem je absorbér tepla). Při takovéto konfiguraci by mělo měření, jak ohřívání, tak chladnutí, pomalejší průběh.

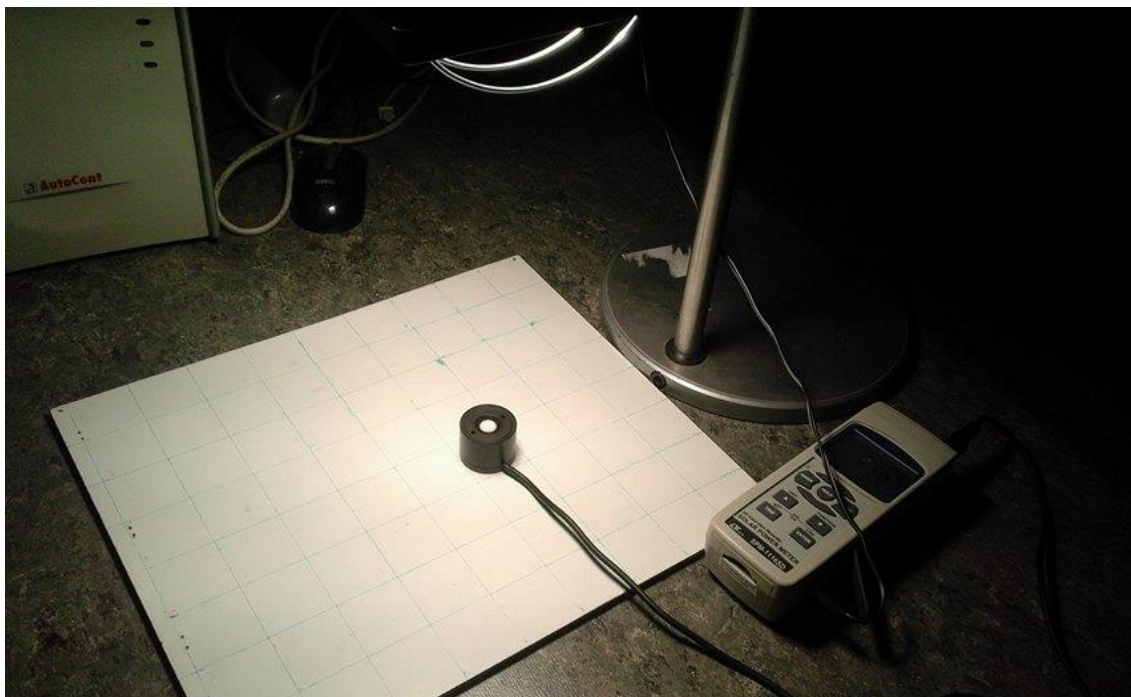
## 4.6 Výpočet účinnosti a parametrů systému

Rovnice zmíněné v kapitole 2.5 poskytují všechny potřebné vztahy pro výpočty, stačí změřit teplotu u paty komínu, okolní teplotu a rychlost proudícího vzduchu a lze dopočítat zbytek. Studenti budou mít za úkol porovnat rychlost naměřenou a rychlost dopočítanou podle vztahu 2.12.

### Určení průměrné intenzity záření

Jedním z hlavních parametrů je intenzita záření, jelikož halogenová zářivka svými rozměry nemůže být považována za bodový zdroj záření a zároveň nemusí vyzařovat ve všech směrech stejně, bylo nutno proměřit mapu intenzity záření. Deska o stejných rozměrech jako stěna kolektoru zařízení byla rozdělena na 72 stejně velkých dílů a ve všech místech proměřena intenzita záření. Měřicí přístroj nebyl však schopen naměřit intenzitu větší, než  $1887 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , proto bylo nutné provést měření z větších vzdáleností, než plánovaných 0,15 m pro měření.

Způsob měření je zachycen na obrázku 4.3, měření bylo provedeno zařízením Lutron solar power meter SPM 1116SD. Lampa byla nastavena vodorovně se zemí, čidlo umístěno do místa pod středem lampy a postupně byla měněna výška lampy nad čidlem.



Obr. 4.9 Měření závislosti intenzity záření na vzdálenosti lampy

V tabulce 4.1 jsou naměřeny maximální hodnoty intenzity záření se sklem a bez skla, z této tabulky vyplývá procento záření, jež není sklem propuštěno. Jedná se o téměř čtvrtinu (23,52 %) a to především kvůli volbě odolného bezpečnostního skla, které není ideálně propustné.

Tabulka 4.1 Tabulka hodnot intenzity záření v závislosti na vzdálenosti

h(m)	E(W·m <sup>-2</sup> )	E <sub>sklo</sub> (W·m <sup>-2</sup> )	E/E <sub>sklo</sub>
0,15	x	x	
0,18	x	1800	
0,24	1685	1287	0,7638
0,28	1353	1060	0,7834
0,33	1094	825	0,7541
0,375	960	716	0,7458
0,43	748	562	0,7513
0,48	614	470	0,7655
0,53	524	402	0,7672
0,59	435	338	0,777
0,66	357	273	0,7647
0,73	295	229	0,7763
0,835	233	178	0,7639

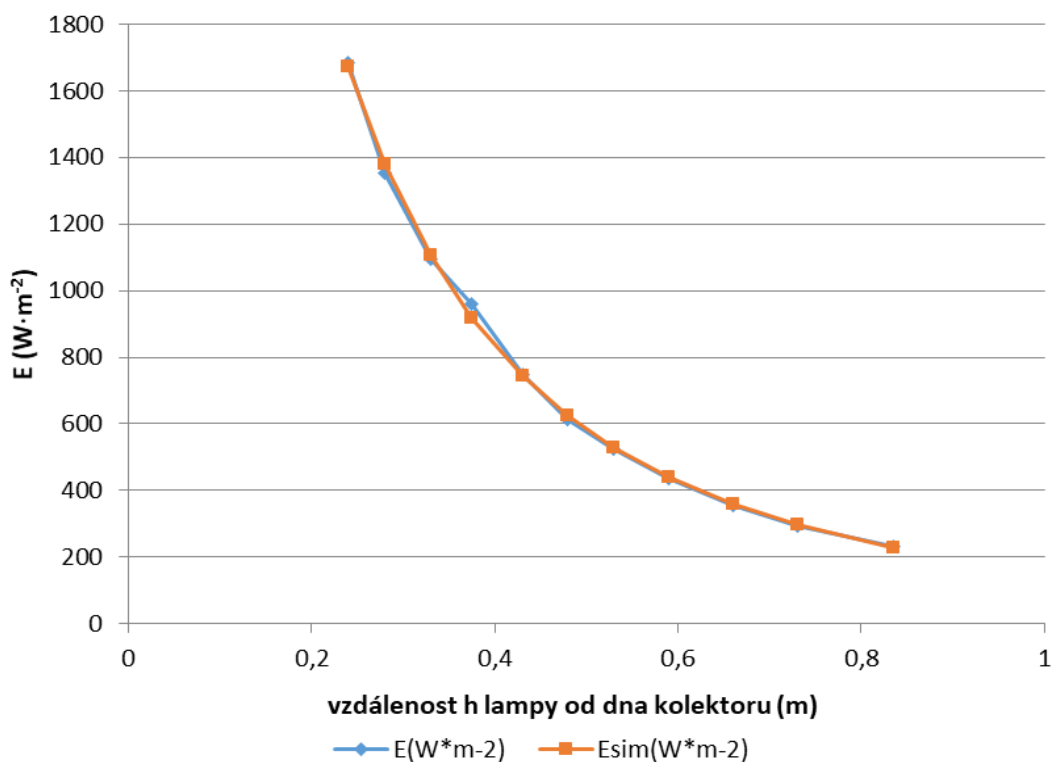
Na obrázku 4.10 je vidět výsledná závislost a aproximační funkce pro určení intenzity záření pro různé vzdálenosti (bez skla) a na obrázku 4.11 rovnice a funkce se sklem (díky ztrátám při průchodu sklem bylo možno změřit u něj intenzity i při větší blízkosti než bez skla).

Aproximační rovnice byla stanovena v programu DataFit jako:

$$E = x \cdot (y + h)^z \quad (4.1)$$

$x, y, z$  – koeficienty aproximační rovnice

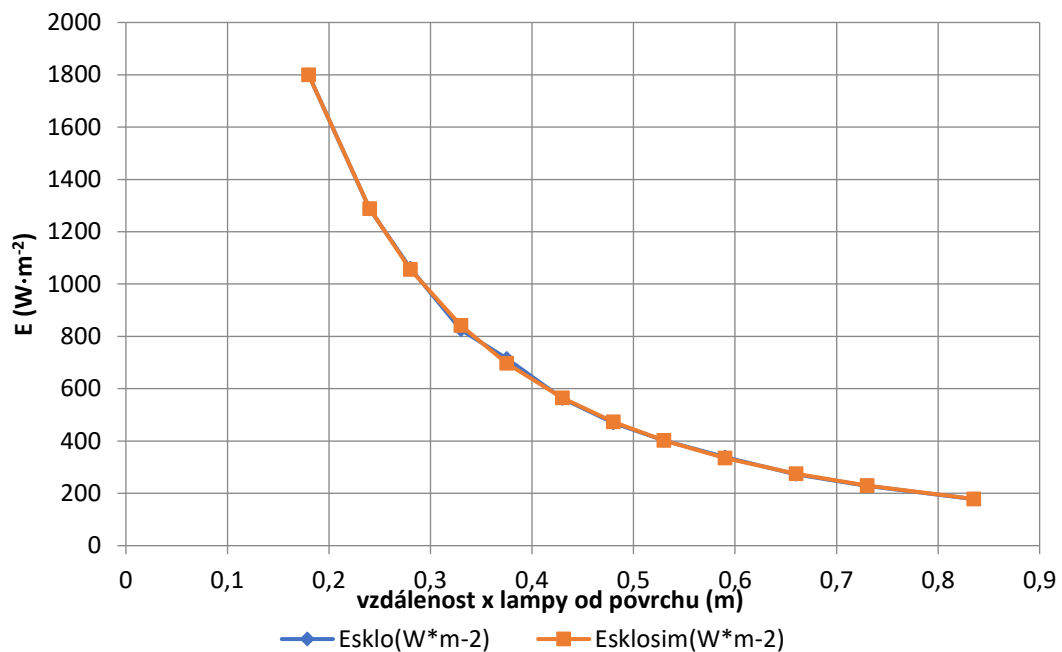
$h$  – vzdálenost lampy od dna kolektoru



Obr. 4.10 Závislost intenzity záření na vzdálenosti lampy bez skla

Po dosazení koeficientů do rovnice 4.1 je výsledná aproximační rovnice pro závislost vzdálenosti lampy od dna kolektoru bez skla jako:

$$E = 320,03 \cdot (0,29875 + h)^{-2,67268} \quad (4.2)$$



Obr. 4.11 Závislost intenzity záření na vzdálenosti lampy se sklem

Po dosazení koeficientů do rovnice 4.1 je výsledná aproximační rovnice pro závislost vzdálenosti lampy od dna kolektoru se sklem jako:

$$E = 200,285 \cdot (0,21435 + h)^{-2,35951} \quad (4.3)$$

Po dosazení do rovnice 4.2 bez skla zjistíme hodnotu intenzity záření pro lampu vzdálenou 0,15 m jako:

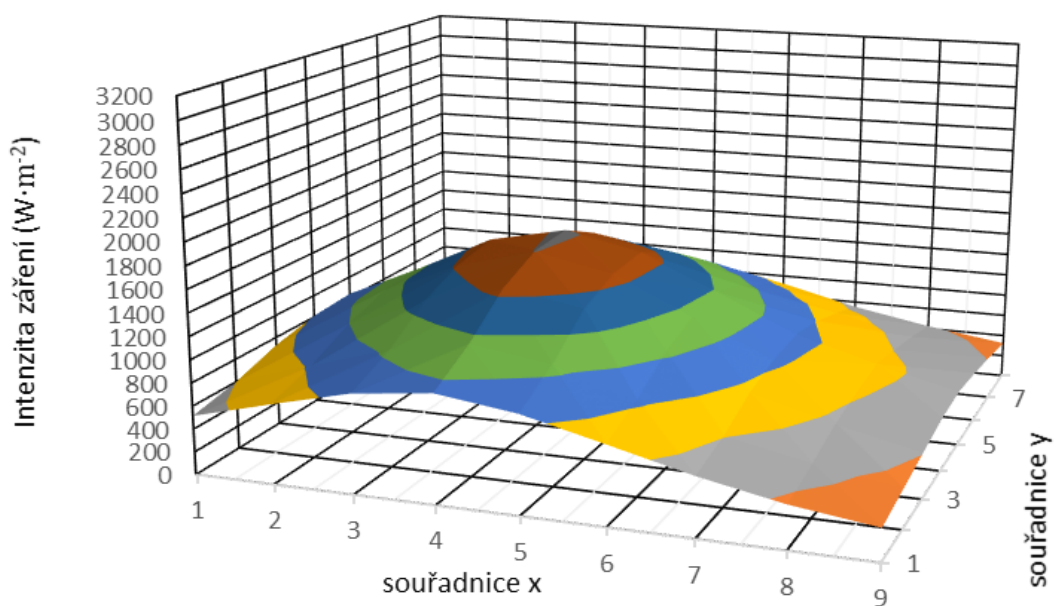
$$E = 320,03 \cdot (0,29875 + 0,15)^{-2,67268} = 2724 \text{ W}$$

Poté byla proměřena celá mapa intenzity záření ze vzdálenosti 0,27 m znázorněna na obrázku 4.3 a přepočítána na vzdálenost 0,15 m pod sklem, jak ukazují následující tabulky s vysvětlivkami.

Tabulka 4.2 Naměřené hodnoty intenzity záření ze vzdálenosti 0,27 m bez skla ve  $W \cdot m^{-2}$

516	600	730	810	838	762	652	530
695	818	1001	1123	1148	1034	867	703
865	1028	1277	1423	1485	1306	1088	851
945	1157	1447	1605	1630	1445	1190	943
854	1055	1333	1466	1489	1325	1108	877
685	829	1030	1142	1182	1065	894	722
512	606	755	833	863	791	678	552
373	459	563	620	662	592	515	424
280	342	406	466	488	445	389	324

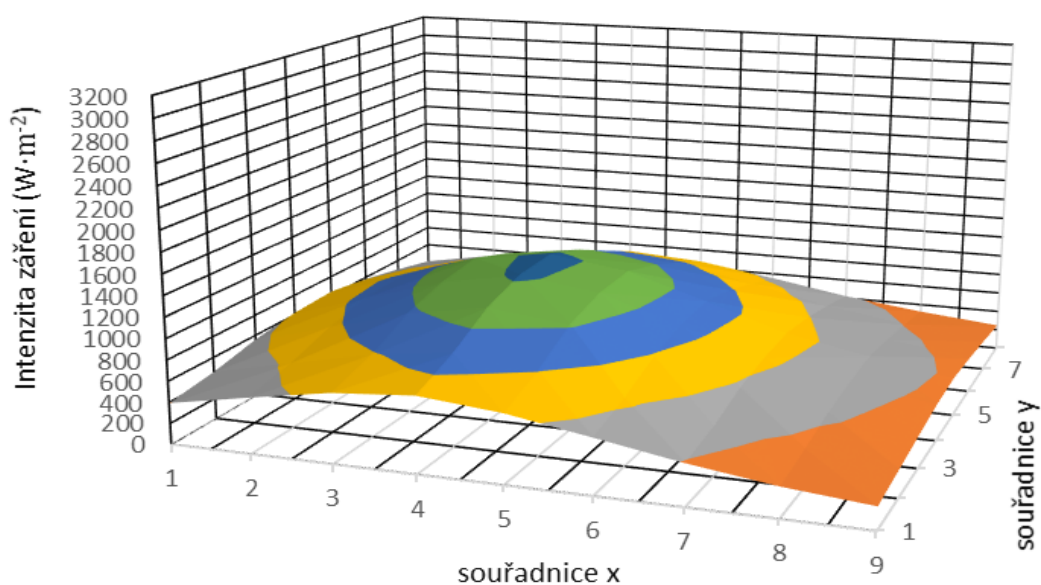
V dalším kroku byla tabulka transformována pomocí korekčního koeficientu 0,7648, který charakterizuje průměrný útlum záření způsobený sklem.



Obr. 4.12 Rozložení intenzity záření na ploše pro 27 cm vzdálenost, bez skla

Tabulka 4.3 Naměřené hodnoty intenzity záření ze vzdálenosti 0,27 m pod sklem ve  $W \cdot m^{-2}$

395	459	558	619	641	583	499	405
532	626	766	859	878	791	663	538
662	786	977	1088	1136	999	832	651
723	885	1107	1228	1247	1105	910	721
653	807	1019	1121	1139	1013	847	671
524	634	788	873	904	815	684	552
392	463	577	637	660	605	519	422
285	351	431	474	506	453	394	324
214	262	311	356	373	340	298	248



Obr. 4.13 Rozložení intenzity záření na ploše pro 27 cm vzdálenost se sklem

Nakonec bylo nutné zjistit hodnoty intenzity záření pro měření požadovanou vzdálenost 0,15 m bez skla. To bylo provedeno podílem hodnoty záření dpočítané vztahem 4.1 bez skla pro vzdálenost 0,15 m a 0,27 m.

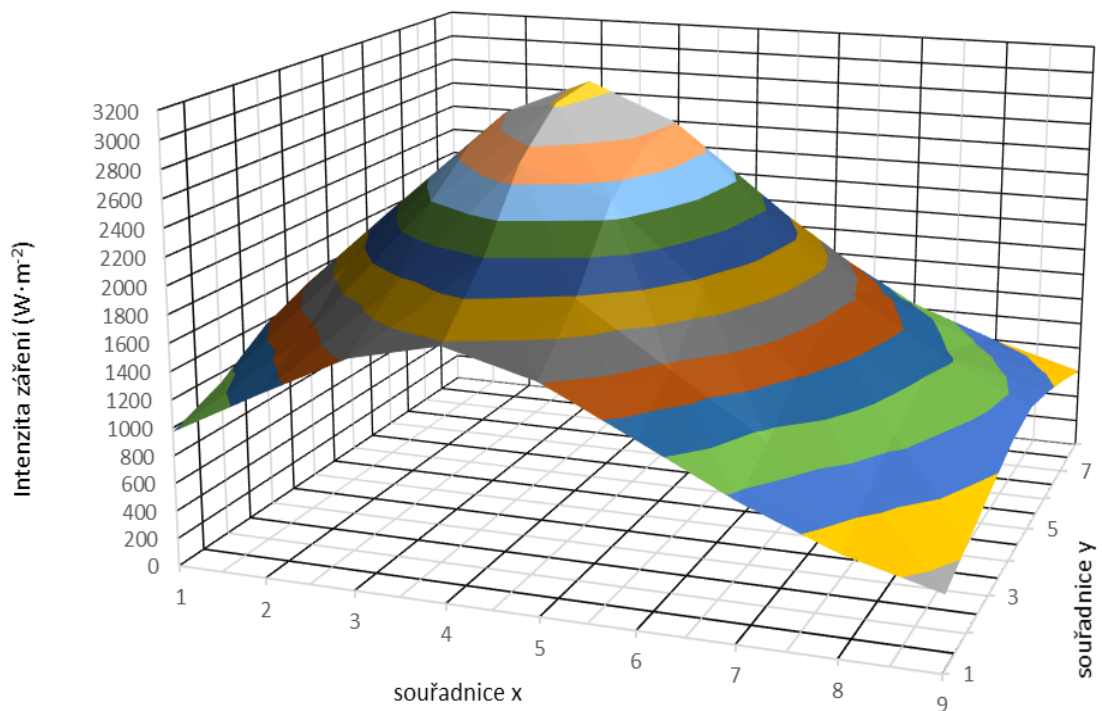
$$\frac{2724}{1447} = 1,883 (-)$$

Tento koeficient byl použit pro přepočítání tabulky 4.3 na tabulku 4.5, která aproximuje vzdálenost 0,15 m bez skla.

Tabulka 4.4 Aproximace hodnot intenzity záření bez skla ve vzdálenosti 0,15 m ve  $W \cdot m^{-2}$

971	1130	1374	1525	1578	1434	1227	998
1308	1540	1884	2114	2161	1947	1632	1323
1628	1935	2404	2679	2796	2459	2048	1602
1779	2178	2724	3021	3069	2720	2240	1775
1608	1986	2509	2760	2803	2494	2086	1651
1290	1561	1939	2150	2225	2005	1683	1359
964	1141	1421	1568	1625	1489	1276	1039
702	864	1060	1167	1246	1114	969	798
527	644	764	877	919	838	732	610

Na základě těchto hodnot byl vytvořen 3D graf zobrazený na obrázku 4.14, který ukazuje rozložení intenzity záření na ploše kolektoru. Z něj je patrné, že není vzhledem k ose x intenzita záření souměrná podle středu, to bylo způsobeno nemožností umístění lampy nad střed desky, jelikož to její rozměry v kombinaci se stojanem lampy nedovolovaly. Na obrázku 4.4 je však patrná symetrie ve směru osy y, to dokazuje dobrou symetrii zdroje záření (mírné odchylky mohou být způsobeny i nepřesným nastavením lampy).



Obr. 4.14 Rozložení intenzity záření na ploše pro 15 cm vzdálenost, bez skla

Z tabulky 4.5 je zjištěna průměrná intenzita záření, jako součet všech hodnot dělený počtem políček (72 políček).

Průměrná intenzita záření  $E=1634 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

### Další parametry potřebné pro výpočet

Níže jsou uvedeny další parametry potřebné pro výpočty.

- délka kolektoru  $s= 0,1 \text{ m}$
- výška kolektoru  $a= 0,35 \text{ m}$
- šířka kolektoru  $b= 0,295 \text{ m}$
- vzdálenost lampy od skla kolektoru  $h= 0,15 \text{ m}$
- okolní teplota v místnosti  $T_o=302,46 \text{ K}$
- výška komínu pro náš model  $H=0,56 \text{ m}$
- šířka a délka komínu je  $p=0,03 \text{ m}$

Pak již může být vypočítána plocha kolektoru jako:

$$S_{kol} = a \cdot b = 0,35 \cdot 0,295 = 0,1033 \text{ m}^2$$

a plocha komínu

$$S_{kom} = p \cdot p = 0,0009 \text{ m}^2$$

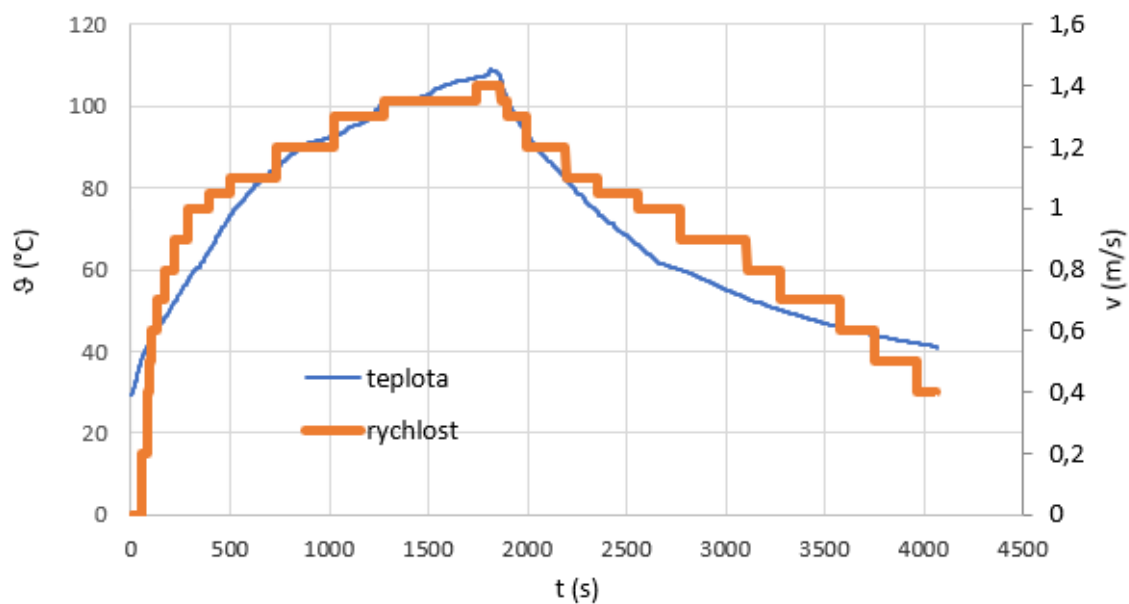
Podle vztahu 2.2 lze vypočítat výkon, který dopadá na kolektor.

$$Q_s = E \cdot S_{kol} = 1634 \cdot 0,1033 = 168,8 \text{ W}$$

Za této konfigurace byla proměřena závislost teploty a rychlosti vzduchu na čase vypsána tabulce 4.6 vzestupná (ohřívání) a po vypnutí zdroje záření sestupná (chladnoucí závislost).

Tab. 4.5 Naměřená závislost teploty a rychlosti proudění vzduchu při zapnuté a vypnuté lampě

ohřívání			chladnutí		
t (s)	ϑ(°C)	v (m·s <sup>-1</sup> )	t (s)	ϑ (°C)	v (m·s <sup>-1</sup> )
1,1	29,32	0	1815,5	109,23	1,4
53,5	38,04	0,2	1864,2	106,85	1,35
80	40,87	0,4	1898	101,73	1,3
90,6	41,95	0,5	1991,2	93,99	1,2
104,4	43,17	0,6	2194,5	82,07	1,1
127,8	45,14	0,7	2354,4	74,03	1,05
171,2	48,08	0,8	2556,8	66,06	1
219	52,13	0,9	2772,9	60,02	0,9
285,8	57,14	1	3106,1	53,04	0,8
394,9	64,82	1,05	3273,5	50	0,7
502	73,25	1,1	3575	46,07	0,6
729,8	85,33	1,2	3751,5	44,01	0,5
1025,4	93,17	1,3	3965,4	42	0,4
1277,4	101,38	1,35	4064,3	40,91	0,2
1741,4	107,01	1,4	4080	40,5	0



Obr. 4.15 Průběh teploty a rychlosti větru v závislosti na čase

Z grafu na obrázku 4.15 je patrný rychlý nárůst teploty i otáček během prvních 3 minut, u teploty lze růst odhadnout na logaritmický, poté se nárůst zpomaluje až dochází téměř k ustálení.

Dochází zde k postupnému ohřevu stěn kolektoru, které mají určitou tepelnou kapacitu. Po vyhřátí dochází ke zpomalení růstu teploty vzduchu z důvodu vyrovnávání vnějšího ochlazování a dalšího vnitřního vyhřívání až na teplotu okolo 110 °C. Po přibližně 30 minutách byla lampa vypnuta a začalo měření sestupné charakteristiky, teplo obsažené ve stěnách kolektoru je postupně uvolňováno a dochází k exponenciálnímu klesání teploty.

Měření otáček bylo komplikovanější, jak již bylo zmíněno v kapitole 4.5. Výrobce anemometru deklaroval rozlišení  $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  avšak při rychlostech pod  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  takto přesně neměřil. Proto je graf pro rychlost složen z diskrétních hodnot pro rychlost vzduchu, které dokázal anemometr změřit (některé mezi hodnoty byly odhadnuty podle frekvence přeskokování hodnot). Z počátku však rychlost roste velmi rychle, dokonce strměji než teplota, prvních pár minut je proto kritických pro změření těchto rychlostí. Po několika minutách růst rychlosti vzduchu zpomaluje a po vypnutí lampy s poklesem teploty klesá i rychlost proudícího vzduchu.

## Výpočet efektivity a účinnosti

Výkon komínu jako celku je nutno rozdělit do dvou výkonů. První výkon je výkon, který je schopen do sebe komín jako celek schopen akumulovat  $P_{kol}$  a je dán vztahem 2.7. Druhý výkon je aktuální výkon vzduchu proudícího z komínu a je dán vztahem 2.4b.

Níže bude proveden vzorový výpočet pro jednu hodnotu teploty a poté umístěna tabulka s i pro jiné hodnoty. Teploty jsou stanoveny na 25 °C a 75 °C, rozdíl výšky mezi vzduchovou vpusť a ústím komínu činí 0,56 m a naměřená rychlost pro daný teplotní rozdíl  $1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

$$S_{kol} = a \cdot b = 0,35 \cdot 0,295 = 0,1033 \text{ m}^2$$

$$Q_s = E \cdot S_{kol} = 1634 \cdot 0,1033 = 168,8 \text{ W}$$

$$H=0,56 \text{ m}$$

$$T_o=298,15 \text{ K}$$

$$T_k=348,15 \text{ K}$$

$$E= 1634 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$v = 1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Účinnost kolektoru je stanovena z výpočtů odvozením z rovnice 2.6 jako:

$$\eta_{kol} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_k - T_o)}{E \cdot S_{kol}} \quad (\%)$$

kde se  $\dot{m}$  dle 2.8 rovná:

$$\dot{m} = S_{kom} \cdot \rho_k \cdot v \quad (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$$

a dle 2.9

$$\rho_k = 1,1614 - 0,00353 \cdot (T_k - 300) = 1,1614 - 0,1699 = 0,9916 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

a dle 2.10

$$c_p = [1,007 + 0,00004 \cdot (T_k - 300)] \cdot 10^3 = (1,007 + 0,001926) \cdot 10^3 = 1008,926 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Vypočítaná rychlost pro  $T_k = 348,15 \text{ K}$  je dle rovnice 2.12.:

$$v = \sqrt{\left[ 2g \cdot H \cdot \frac{(T_k - T_o)}{T_o} \right]} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,56 \cdot \frac{(348,15 - 298,15)}{298,15}}$$
$$= 1,36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Potom } \dot{m} = 0,06 \cdot 0,06 \cdot 0,9916 \cdot 1,36 = 0,001213 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

a

$$\eta_{kol} = \frac{0,001213 \cdot 1008,926 \cdot (348,15 - 298,15)}{1634 \cdot 0,1033} \cdot 100 = 36,25 \%$$

Pro určení celkové účinnosti musí být uveden podíl výstupního výkonu ku vstupnímu.

Tlak byl informativně počítán podle rovnice 2.5 jako:

$$\Delta p = g \cdot (\rho_o - \rho_k) \cdot H = 9,813 \cdot (1,168 - 0,991) \cdot 0,56 = 0,973 \text{ Pa}$$

$$P_{vz} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 = 0,5 \cdot 0,001213 \cdot 1,21 = 0,734 \text{ mW}$$

Celkovou účinnost systému lze vyjádřit z rovnice 2.3 jako:

$$\eta_{cel} = \frac{P_{vz}}{Q_s} = \frac{0,734 \cdot 10^{-3}}{168,8} \cdot 100 = 0,000434 \%$$

Z výsledku celkové účinnosti je vidět velmi neuspokojivá účinnost, která je nízká především důsledkem malých rozměrů komínu a důsledkem tepelných ztrát celého zařízení. Vznikají zde velké ztráty na stěnách kolektoru přes rozehráté stěny komínu a přes krycí sklo. Vzhledem k teplotám dřeva na spodu kolektoru dosahujících i přes 100 °C je však izolace obtížná.

Účinnost našeho modelu by mohlo zlepšit vyspádování stropu a omezení případných tepelných ztrát. V neposlední řadě by bylo dobré lépe umístit teplotní čidlo, aby jeho instalace nerozrážela usměrněný vzduch a nebrzdila jeho již tak nízkou rychlost. Jediným důvodem, proč je vůbec měřitelná rychlost vzduchu je předimenzování zdroje záření.

V tabulce 4.7 je vidět růst účinnosti kolektoru a s tím i růst celkové účinnosti, jedná se však o tabulku s vypočítanou rychlostí vzduchu, pro porovnání je níže vložena tabulka 4.8 s naměřenými rychlostmi vzduchu.

Tab. 4.6 Přehled účinnosti a dalších parametrů při rostoucí teplotě s vypočítanou rychlostí vzduchu

$T_k(K)$	$v(m \cdot s^{-1})$	$\Delta p(Pa)$	$\dot{m}(kg \cdot m^{-1})$	$\eta_{kol}(\%)$	$c_p(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$P_{vz}(W)$	$\eta_{cel}(\%)$
308,15	0,607	0,194	6,19E-04	3,7	1007,326	0,114	6,80E-05
313,15	0,743	0,291	7,46E-04	6,68	1007,526	0,206	1,22E-04
318,15	0,859	0,388	8,48E-04	10,13	1007,726	0,313	1,85E-04
323,15	0,96	0,485	9,33E-04	13,94	1007,926	0,43	2,55E-04
328,15	1,051	0,582	1,01E-03	18,02	1008,126	0,555	3,29E-04
333,15	1,136	0,679	1,07E-03	22,34	1008,326	0,689	4,08E-04
338,15	1,214	0,776	1,12E-03	26,83	1008,526	0,827	4,90E-04
343,15	1,288	0,873	1,17E-03	31,48	1008,726	0,97	5,75E-04
348,15	1,357	0,97	1,21E-03	36,21	1008,926	1,115	6,61E-04
353,15	1,424	1,067	1,25E-03	41,06	1009,126	1,265	7,49E-04
358,15	1,487	1,164	1,28E-03	45,95	1009,326	1,415	8,38E-04
363,15	1,548	1,261	1,31E-03	50,84	1009,526	1,566	9,28E-04
368,15	1,606	1,357	1,33E-03	55,76	1009,726	1,716	1,02E-03
373,15	1,662	1,454	1,35E-03	60,65	1009,926	1,866	1,11E-03
378,15	1,717	1,551	1,37E-03	65,53	1010,126	2,016	1,19E-03

Tab. 4.7 Přehled účinnosti a dalších parametrů při rostoucí teplotě s naměřenou rychlostí vzduchu

$T_k(K)$	$v(m \cdot s^{-1})$	$\Delta p(Pa)$	$\dot{m}(kg \cdot m^{-1})$	$\eta_{kol}(\%)$	$c_p(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$P_{vz}(mW)$	$\eta_{cel}(\%)$
308,15	0,2	0,194	2,00E-04	1,194	1007,326	0,004	2,00E-06
313,15	0,4	0,291	4,00E-04	3,583	1007,526	0,032	1,90E-05
318,15	0,7	0,388	7,00E-04	8,362	1007,726	0,172	1,02E-04
323,15	0,9	0,485	9,00E-04	13,442	1007,926	0,365	2,16E-04
328,15	1	0,582	1,00E-03	17,926	1008,126	0,5	2,96E-04
333,15	1	0,679	9,00E-04	18,826	1008,326	0,45	2,67E-04
338,15	1,05	0,776	1,00E-03	23,911	1008,526	0,551	3,26E-04
343,15	1,05	0,873	1,00E-03	26,906	1008,726	0,551	3,26E-04
348,15	1,1	0,97	1,00E-03	29,901	1008,926	0,605	3,58E-04
353,15	1,1	1,067	1,00E-03	32,898	1009,126	0,605	3,58E-04
358,15	1,2	1,164	1,00E-03	35,896	1009,326	0,72	4,27E-04
363,15	1,2	1,261	1,00E-03	38,895	1009,526	0,72	4,27E-04
368,15	1,3	1,357	1,10E-03	46,084	1009,726	0,93	5,51E-04
373,15	1,35	1,454	1,10E-03	49,386	1009,926	1,002	5,94E-04
378,15	1,4	1,551	1,10E-03	52,689	1010,126	1,078	6,39E-04

Je zde patrná nesrovnalost mezi rychlostí vypočítanou a rychlostí naměřenou, to je zapříčiněno ztrátami zmíněnými výše v kapitole měření rychlosti větru a teploty.

# 5 LABORATORNÍ NÁVOD

## 5.1 Měření účinnosti solárního komínu

### Cíl úlohy

Cílem laboratorní úlohy je seznámit studenty s principem solárních komínů, který bude demonstrován na zmenšeném modelu v laboratoři.

### Zadání

Změřte závislost rychlosti vzduchu na teplotě při zapnuté a vypnuté halogenové lampě v čase. Měřte na modelu solárního komínu. Prvních 30 min měřte se zapnutou lampou, poté lampu vypněte a měřte dalších 30 minut.

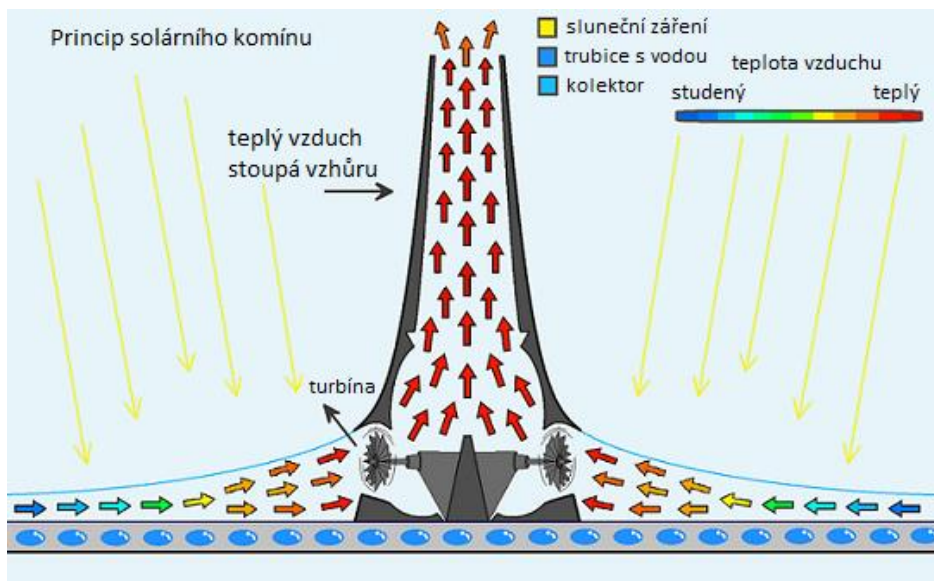
### Rozměry systému potřebné pro výpočet

- délka kolektoru  $s=0,1$  m
- výška kolektoru  $a=0,35$  m
- šířka kolektoru  $b=0,295$  m
- vzdálenost lampy od skla kolektoru  $l=0,15$  m
- okolní teplota v místnosti  $T_o=302,46$  K
- výška komínu pro náš model  $H=0,56$  m
- šířka a délka komínu je  $p=0,03$  m
- 

### 5.1.1 Teoretický rozbor

Solární komíny pracují na principu ohřevu vzduchu v prostoru pod solárním sklem. Zde se dopadající záření změní na teplo, které ohřívá podklad a vzduch. Uprostřed kolektoru je vyveden komín, kterým stoupá ohřátý vzduch, který má menší hustotu než vzduch chladnější, který je nasáván vzduchovou vpustí ve spodní části zařízení.

Pro elektrárny na tomto principu je stěžejní výška komínu a rozloha kolektoru. Předpokládané výšky komínu jsou v řádech 1000–1500 m s plochou kolektoru dosahující rozměrů přes 20 kilometrů čtverečních. Výška komínu způsobuje rozdíl teplot mezi vstupním vzduchem a vzduchem na výstupu z komínu (100 m odpovídá přibližně 1 °C), rozlohou kolektoru zase získáváme co největší množství vstupní energie. Princip solárního komínu je zobrazen na obrázku 5.1.



Obr. 5.1 Princip funkce solárního komínu

## Výkon

Celkový výkon záření dopadajícího do prostoru kolektoru je dán rovnicí 5.1 jako:

$$Q_s = E \cdot S_{kol} \text{ (W)}. \quad (5.1)$$

$Q_s$  - celkový výkon dopadající na kolektor ve formě záření (W)

$E$  - intenzita záření ( $W \cdot m^{-2}$ )

$S_{kol}$  – plocha kolektoru pohlcující světlo ( $m^2$ )

$$S_{kol} = a \cdot b \quad (5.2)$$

Výkon solárního komínu je popsán rovnicí 5.3, jedná se o součin celkového dodaného výkonu a účinností jednotlivých komponentů.

$$P = Q_s \cdot \eta_{kol} \cdot \eta_{kom} = Q_s \cdot \eta_{cel} \text{ (W)} \quad (5.3)$$

$P$  – výkon komínu odpovídá výkonu vzduchu opouštějícího solární komín  $P_{vz}$  (W)

$\eta_{kol}, \eta_{kom}$  – účinnosti kolektoru a komínu (-)

$\eta_{cel}$  - celková účinnost systému (-)

Výkon vzduchu opouštějícího komín lze vypočítat ze vzorce:

$$P_{vz} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2 \quad (5.4)$$

$P_{vz}$  – je výkon vzduchu proudícího rychlostí  $v$  (W)

$v$  - rychlost proudění vzduchu komínem ( $m \cdot s^{-1}$ )

$\dot{m}$  – hmotnostní průtok vzduchu ( $kg \cdot s^{-1}$ )

Hmotnostní průtok vzduchu vypočítáme pomocí rovnice 5.5 jako:

$$\dot{m} = S_{kom} \cdot \rho_k \cdot v \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.5)$$

$S_{kom}$  – plocha komínu

$\rho_k$  – hustota vzduchu u paty komínu ( $kg \cdot m^{-3}$ )

kde

$$\rho_k = 1,1614 - 0,00353 \cdot (T_k - 300) \quad (kg \cdot m^{-3}). \quad (5.6)$$

$T_k$  – teplota uvnitř kolektoru u paty komínu (K)

Rychlost proudícího vzduchu vypočítáme dle vztahu 5.7.

$$v = \sqrt{\left[ 2g \cdot H \cdot \frac{(T_k - T_o)}{T_o} \right]} \quad (m \cdot s^{-1}). \quad (5.7)$$

Výkon akumulovaný v kolektoru lze vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$P_{kol} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_k - T_o) \quad (5.8)$$

$P_{kol}$  – výkon kolektoru (W)

$\dot{m}$  - hmotnostní průtok vzduchu ( $kg \cdot m^{-1}$ )

$c_p$  – měrná tepelná kapacita vzduchu ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$T_o$  – teplota okolního vzduchu (teplota v místnosti) (K)

Pro výpočet měrné tepelné kapacity lze použít vztahu 5.9.

$$c_p = [1,007 + 0,00004 \cdot (T_k - 300)] \cdot 10^3 \quad (J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}) \quad (5.9)$$

Pro výpočet  $\Delta p$  je nutno vypočítat rozdíl hustoty vnějšího vzduchu a vzduchu uvnitř kolektoru, k tomu použijeme aproximační vztah 5.5 a poté dosadíme do vztahu 5.10.

$$\Delta p = g \cdot (\rho_o - \rho_k) \cdot H \text{ (Pa)}. \quad (5.10)$$

$g$  – gravitační zrychlení ( $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

$\rho_o$  – hustota venkovního vzduchu ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$H$  – výška komínu (m)

## Účinnost

Účinnost kolektoru lze spočítat ze vztahu 5.10.

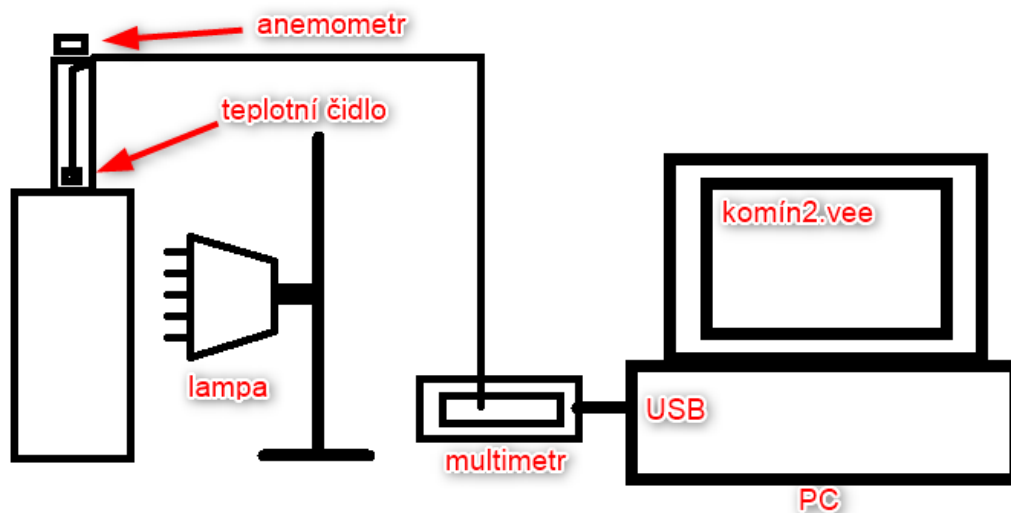
$$\eta_{kol} = \frac{P_{kol}}{Q_s} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_k - T_o)}{E \cdot S_{kol}} \quad (5.11)$$

Celková účinnost je:

$$\eta_{cel} = \frac{P_{vz}}{Q_s} = \frac{\frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2}{E \cdot S_{kol}} \quad (5.12)$$

$$\eta_{kom} = \frac{P_{vz}}{Q_s \cdot \eta_{kol}} = \frac{\frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2}{E \cdot S_{kol} \cdot \eta_{kol}} \quad (5.13)$$

### 5.1.2 Schéma pracoviště



Obr. 5.2 Schéma zapojení úlohy

### 5.1.3 Pracovní postup

- 1) Nastavte lampu doprostřed skla v horizontální poloze, spodní okraj lampy 15 cm nad deskou stolu. Přední část lampy nastavte na 15 cm mezi přední hranou lampy a dnem kolektoru, pro tuto vzdálenost je průměrná intenzita záření  $1634 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .
- 2) Vzduchovou vpusť nastavte na 5 cm.
- 3) Zkontroluje umístění teplotního čidla v komíně a jeho zapojení do multimetru. Multimetr nastavte na měření teploty a propojte s PC USB kabelem.
- 4) Anemometr umístěte střed komínu a zapněte jej.
- 5) V počítači zapněte program komín2.vee a první minutu měřte teplotu a seznamte se s programem. Tuto teplotu zprůměrujte, bude považována za  $T_o$ .
- 6) Program restartujte a zapněte, zároveň s tím zapněte lampu anemometru.
- 7) Sledujte anemometr, při teplotě vzduchu nad  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  by mělo docházet k roztočení a naměření prvních hodnot. Zpočátku rychlost roste velmi rychle, spolupracujte pro zachycení všech změn, zaznamenávejte rychlost větru a k ní odpovídající teplotu z multimetru. Kvůli hrubému rozlišení je nutné některé hodnoty odhadovat. Pokud dochází ke změně hodnot anemometru například mezi  $0,4$  a  $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  se stejnou četností, je možné odhadovat hodnotu jako  $0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Pokud je zobrazena hodnota  $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  většinu času a občas dojde k přeskoku na  $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  může být hodnota odhadnuta na  $0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  apod.
- 8) Po 30 minutách lampu vypněte a dalších 30 min zaznamenávejte rychlost vzduchu a teplotu.
- 9) Vytvořte graf rychlosti vzduchu a teploty na čase. Pro každé měření vypočítejte a vynesete do grafu: celkový výkon dopadající na kolektor, výkon akumulovaný kolektorem, výkon proudícího vzduchu komínem, hmotnostní průtok vzduchu, tepelnou kapacitu vzduchu, hustotu vzduchu, změnu tlaku, rychlost vzduchu, účinnost kolektoru, celkovou účinnost a účinnost komínu. Naměřenou a vypočítanou rychlost vzduchu porovnejte a odůvodněte případný rozdíl v hodnotách.

## 6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo v teoretické části provedení rešerše využívání a konstrukce solárních komínů a v praktické části vytvoření laboratorní úlohy do předmětu Obnovitelné zdroje energie demonstrující princip fungování komínových elektráren. Nejprve byla věnována kapitola rozdělení alternativních zdrojů energie a jejich pozice v energetice.

Další kapitoly byly již věnovány funkčnímu principu solárních komínových elektráren, jejich jednotlivým komponentům a jednotlivým aspektům a jejich využití. Zatím ve světě žádná komínová elektrárna velkých výkonů nestojí, v Arizoně však dochází ke skupování pozemků a posledním přípravám ke stavbě 800 metrů vysoké elektrárny. V rámci teoretické části byla provedena teoretická příprava pro výpočty výkonů, efektivit a dalších údajů pro laboratorní úlohu.

V praktické části byl nejdříve vyroben zkušební model pro zjištění, zda bude takto malá verze komínu fungovat. Díky zkušebnímu modelu byl změněn návrh konstrukce a konstruován model ze dřeva. Pro tento model byla proměřena závislost teploty vzduchu opouštějícího komín na jeho rychlosti, poté byly provedeny potřebné výpočty z teoretické části a vypočítány jednotlivé účinnosti a vyneseny do tabulek a grafů. Účinnost se s časem záření lampy zvyšovala díky prohřátí konstrukce, po určité době docházelo k ustálení stavu ohřevu a chladnutí zařízení. Celková účinnost systému byla velmi nízká, a to konkrétně v řádu deseti tisícín procent, jedná se ovšem o trochu zavádějící údaj, jelikož respektuje pouze aktuální výkon vycházejícího vzduchu. Nerespektuje tak teplo akumulované v zařízení, díky kterému dokáže komín fungovat ještě dlouho po vypnutí lampy. I přes nízkou účinnost je proudění vzduchu z komínu měřitelné a jako demonstrace a laboratorní úloha je dostačující. Na konci praktické části byl vytvořen návod k laboratorní úloze, kde bude studenty měřena závislost rychlosti vzduchu vzhledem k jeho ohřátí v kolektoru.

Možným pokračováním této práce by byl model většího měřítko, nejlépe venkovní konstrukce. Dalším možným pokračováním by byl lepší výpočet intenzity záření na ploše kolektoru, jelikož se nejedná o bodový zdroj, ale naopak zdroj velikostí srovnatelný s kolektorem bylo by potřeba vymyslet postup pro přesnější výpočet.

# LITERATURA

- [1] Nonrenewable and Renewable Energy Resources | QUEST | KQED Science. [online]. Copyright © 2018 KQED Inc. All Rights Reserved. [cit. 12.04.2018]. Dostupné z: <https://ww2.kqed.org/quest/2014/02/13/nonrenewable-and-renewable-energy-resources-2/>
- [2] Biomass - Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy - Energy Information Administration. *U.S. Energy Information Administration (EIA)* [online]. Dostupné z: [https://www.eia.gov/energyexplained/?page=biomass\\_home](https://www.eia.gov/energyexplained/?page=biomass_home)
- [3] Vodní elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR. *OEnergetice.cz* [online]. Copyright © 2018 [cit. 12.04.2018]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni/>
- [4] SIGURDSSON, Haraldur. *Encyclopedia of volcanoes*. San Diego: Academic Press, c2000. ISBN isbn978-0-12-643140-7.
- [5] Renewable Energy Supplied Nearly 25% of Global Electricity Needs in 2015 > ENGINEERING.com. *ENGINEERING.com | Information & Inspiration for Engineers* [online]. Copyright © 2018 engineering.com, Inc. [cit. 12.04.2018]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/ElectronicsDesign/ElectronicsDesignArticles/ArticleID/12372/Renewable-Energy-Supplied-Nearly-25-of-Global-Electricity-Needs-in-2015.aspx>
- [6] Eurostat. *Renewable energy in the EU, Share of renewables in energy consumption in the EU reached 17 % in 2016, eleven member states already achieves their 2020 targets* [online]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/8612324/8-25012018-AP-EN.pdf/9d28caef-1961-4dd1-a901-af18f121fb2d>
- [7] Struktura Slunce | Slunce | Pozorování Slunce / Pozorovanie Slnka . *Pozorování Slunce / Pozorovanie Slnka* [online]. Dostupné z: <http://pozorovanislunce.eu/slunce/struktura-slunce.html>
- [8] Slunce. *Aldebaran homepage* [online]. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz/astrofyzika/sunsystem/slunce.php>
- [9] 1 Energy from the Sun. *Encyklopedia klimatologiczna* [online]. Copyright © [cit. 26.04.2018]. Dostupné z: [http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/Climate\\_Change\\_classes\\_ss/ss\\_Energy\\_from\\_the\\_Sun\\_6ev.html](http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/Climate_Change_classes_ss/ss_Energy_from_the_Sun_6ev.html)
- [10] Assignment on Solar Radiation - Assignment Point. *Assignment Point - Solution for Best Assignment Paper* [online]. Copyright © 2018 [cit. 26.04.2018]. Dostupné z: <http://www.assignmentpoint.com/other/assignment-on-solar-radiation.html>

- [11] Solar Radiation. *Atmospheric* [online]. Dostupné z: <https://atmospheres.gsfc.nasa.gov/climate/index.php?section=136>
- [12] Teorie fotovoltaiky. *Isofen Energy - titulní stránka* [online]. Copyright © 2009 Isofen Energy s.r.o. [cit. 26.04.2018]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/fotovoltaika.aspx>
- [13] Charakteristika - Elektrárny - Svět energie.cz. *Svět Energie - Svět energie.cz* [online]. Copyright © 2016, Všechna práva vyhrazena [cit. 26.04.2018]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/slunecni-elektrarny/charakteristika>
- [14] *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. Copyright © u [cit. 11.04.2018]. Dostupné z: [https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/18\\_Zaklady-ekologie\\_48-49/48\\_IUT/110\\_Alternativni-zdroje-energie---Schandl---P0-.pdf](https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/18_Zaklady-ekologie_48-49/48_IUT/110_Alternativni-zdroje-energie---Schandl---P0-.pdf)
- [15] Fotovoltaické elektrárny – princip funkce a součásti, elektrárny v ČR. *OEnergetice.cz* [online]. Copyright © 2018 [cit. 26.04.2018]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/fotovoltaicka-elektrarna-princip-funkce-a-soucasti/>
- [16] How Photovoltaic Cells Generate Electricity. *Digital Geiger Counter GCA-07* [online]. Dostupné z: <https://www.imagesco.com/articles/photovoltaic/photovoltaic-pg4.html>
- [17] Přeměna sluneční energie v energii elektrickou | Fyzikální ústav Akademie věd ČR. *Vítejte na stránkách FZÚ | Fyzikální ústav Akademie věd ČR* [online]. Copyright © 2008 [cit. 27.04.2018]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/popularizace/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou>
- [18] Tamesol | Mono vs. Poly Solar Panels: Which One Should I Choose. *Tamesol | Solar Panels Manufacturer since 2005* [online]. Copyright © 2005 [cit. 27.04.2018]. Dostupné z: <https://www.tamesol.com/monocrystalline-vs-polycrystalline/>
- [19] Fotovoltaika - Energie živlů - W.E.B Větrná Energie spol. s r.o.. *W.E.B Větrná Energie spol. s r.o.* [online]. Copyright © 2010 W.E.B Větrná energie s.r.o. [cit. 27.04.2018]. Dostupné z: [http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/fotovoltaika\\_11](http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/fotovoltaika_11)
- [20] Solární Novinky cz. *Solární Novinky cz* [online]. Copyright © Copyright [cit. 27.04.2018]. Dostupné z: <http://www.solarninovinky.cz/?nove-produkty/produkty-mesice/2011110701/record-sharp-vyvinul-solarni-clanek-s-nejvyssi-konverzni-ucinnosti-na-svete-ve-vysi-36-9>
- [21] Termické solární kolektory (panely). *Solární-energie.info* [online]. Praha [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.solarni-energie.info/termicke-solarnipanely-kolektory.php>
- [22] 1/89 Solární kolektory - PDF. *Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací.* [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 10.05.2018]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/9871829-1-89-solarni-kolektory.html>
- [23] Concentrating Photovoltaics | Solar Power. *Renewable Energy Consulting | Strategy in*

- Clean Energy / Renewable Energy Finance / Green Rhino Energy Cunsultancy* [online]. Copyright ©2016 Green Rhino Energy Ltd. [cit. 10.05.2018]. Dostupné z: [http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv\\_concentration.php](http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_concentration.php)
- [24] SEE Information Portal - Technologies - Hightemp. [online]. Copyright © 2008 [cit. 10.05.2018]. Dostupné z: <http://www.see.murdoch.edu.au/resources/info/Tech/hightemp/index.html>
- [25] 7(n) Forces Acting to Create Wind. *Geography : Physical Geography* [online]. Copyright © 1999 [cit. 11.05.2018]. Dostupné z: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7n.html>
- [26] Větrné elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR. *OEnergetice.cz* [online]. Copyright © 2018 [cit. 11.05.2018]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>
- [27] TUSHIGJARGAL, B., *Solar updraft tower: A chimney that generates electricity* [online]. Dostupné z: <https://tunza.eco-generation.org/resourcesView.jsp?boardID=worldReport&viewID=43177>
- [28] Solaripedia | Green Architecture & Building | Projects in Green Architecture & Building. *Solaripedia | Green Architecture & Building | Solar Architecture and Green Building* [online]. Copyright ©2011 [cit. 07.12.2017]. Dostupné z: [http://www.solaripedia.com/13/371/5042/solar\\_updraft\\_tower\\_pilot\\_plant.html](http://www.solaripedia.com/13/371/5042/solar_updraft_tower_pilot_plant.html)
- [29] J. Schlaich, R. Bergermann, W. Schiel, and G. Weinrebe, —Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems—Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 127, no 1, p. 117, 2005
- [30] SCHLAICH, J., BERGERMANN, R., *Solar Chimney Pilot Plant Manzanares* Project. [online]. Copyright © Schlaich Bergermann Solar [cit. 07.12.2017]. Dostupné z: <http://www.sbp.de/en/project/solar-chimney-pilot-plant-manzanares/>
- [31] SCCN -Solar Chimney Competence Network. Solar Chimney: Project Arabia [online]. 25.4.2008 [cit. 2017-12-07]. Eng. Dostupny z WWW: <[http://www.ruhrunibochum.de/imperia/md/content/asib/sccn\\_solar\\_chimney.pdf](http://www.ruhrunibochum.de/imperia/md/content/asib/sccn_solar_chimney.pdf)>.
- [32] Large shell structures for power... (PDF Download Available). *ResearchGate | Share and discover research* [online]. Copyright © ResearchGate [cit. 16.05.2018]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/228538536\\_Large\\_shell\\_structures\\_for\\_power\\_generation\\_technologies](https://www.researchgate.net/publication/228538536_Large_shell_structures_for_power_generation_technologies)
- [33] Floating Solar Chimney Technology (PDF Download Available). *ResearchGate | Share and discover research* [online]. Copyright © ResearchGate [cit. 10.04.2018]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/221907400\\_Floating\\_Solar\\_Chimney\\_Tech\\_nology](https://www.researchgate.net/publication/221907400_Floating_Solar_Chimney_Tech_nology)

- [34] Performance analysis of conventional and sloped solar chimney power plants in China - ScienceDirect. *ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books*. [online]. Copyright © 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved. [cit. 07.12.2017]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431112004590#fig2>
- [35] Download free solar resource maps | Solargis. *Bankable solar data for better decisions | Solargis* [online]. Copyright © 2017 Solargis. All rights reserved [cit. 07.12.2017]. Dostupné z: <https://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/world>
- [36] TAKMIL, S., BAIZID, KHAN, P., SHAMIM, A., *Design, Construction and Performance Test of a Small Solar Chimney Power Plant*. Rajshashi University of Engineering & Technology, Bangladesh, Online ISSN: 2249-4596
- [37] BERGMAN, T. L. a Frank P. INCROPERA. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 7th ed. / . Hoboken, NJ: Wiley, c2011. ISBN 978-0-470-50197-9.
- [38] Markets | EnviroMission Limited . *Object moved* [online]. Copyright © [cit. 23.04.2018]. Dostupné z: <http://www.enviromission.com.au/IRM/content/markets-overview.aspx?RID=324>
- [39] Can hot air be the free fuel of the future? - CNN. *CNN International - Breaking News, US News, World News and Video* [online]. Copyright © [cit. 10.05.2018]. Dostupné z: <https://edition.cnn.com/2011/10/02/tech/innovation/solar-tower-arizona/index.html>
- [40] W. HAAF (2007) Solar Chimneys, *International Journal of Solar Energy*, 2:2, 141-161, DOI: [10.1080/01425918408909921](https://doi.org/10.1080/01425918408909921)
- [41] Prototype Manzanares. [online]. Dostupné z: <https://www.solar-updraft-tower.com/concept/prototype-manzanares/>
- [42] W. HAAF, K. FRIEDRICH, G. MAYR & J. SCHLAICH (2007) Solar Chimneys Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares, *International Journal of Solar Energy*, 2:1, 3-20, DOI: [10.1080/01425918308909911](https://doi.org/10.1080/01425918308909911)
- [43] . [online]. Copyright © [cit. 24.04.2018]. Dostupné z: <http://www.solar-tower.org.uk/>
- [44] Passive cooling | YourHome. *YourHome | Australia's guide to designing, building and living in environmentally sustainable homes*. [online]. Dostupné z: <http://www.yourhome.gov.au/passive-design/passive-cooling>
- [45] S. Punyasompun, et al., Investigation on the application of solar chimney for multi-storey buildings, *Renewable Energy* 34 (12) (2009) 2545–2561.
- [46] Solární komín - využití solárního komínu pro přirozené větrání budov | 3 pól - Magazín plný pozitivní energie. *Úvod | 3 pól - Magazín plný pozitivní energie* [online]. Copyright © Třípól [cit. 21.04.2018]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/obnovitelne-zdroje/1049-solarni-komin-vyuziti-solarniho-kominu-pro-prirozene-vetrani-budov>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

- AM- air mass (-)
- $\Theta$  – úhel mezi zenitem a polohou Slunce ( $^{\circ}$ )
- $E_{\text{fot}}$  – energie fotonu (eV)
- $h$  – Planckova konstanta ( $4,135668 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ ) nebo ( $6,626\ 070 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )
- $c$  - rychlost světla ( $2,997\ 924 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
- $\lambda$  – vlnová délka (m)
- H – výška solárního komínu (m)
- R - poloměr solárního komínu (m)
- $Q_s$  - celkový výkon dopadající na kolektor ve formě záření (W)
- E - intenzita záření ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )
- $S_{\text{kol}}$  – plocha kolektoru pohlcující světlo ( $\text{m}^2$ )
- P – výkon elektrárny (W)
- $P_{\text{vz}}$  – je výkon teplého vzduchu proudícího rychlostí v (W)
- $\eta_{\text{kol}}, \eta_{\text{tur}}, \eta_{\text{kom}}$  – účinnosti kolektoru, turbíny a komínu (-)
- $\eta_{\text{cel}}$  - celková účinnost systému (-)
- $\dot{m}$  - hmotnostní průtok vzduchu ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )
- $c_p$  – tepelná kapacita vzduchu ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
- $T_k$  – teplota uvnitř kolektoru u paty komínu (K)
- $T_o$  – teplota okolního vzduchu (teplota v místnosti) (K)
- $\rho_k$  – hustota vzduchu u paty komínu ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
- $\rho_o$  – hustota vzduchu u paty komínu ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
- $v$  - rychlost proudění vzduchu komínem ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
- $g$  – gravitační zrychlení ( $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
- $\Delta p$  – rozdíl tlaku na turbíně a na vstupu vzduchu (Pa)
- $p$  – šířka a délka komínu(m)
- a, b, s– výška, šířka a délka kolektoru (m)
- h – vzdálenost lampy od skla kolektoru (m)

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Graf globálního zastoupení obnovitelných zdrojů energie [5] .....	11
Obr. 1.2 Řez strukturou Slunce [7] .....	12
Obr. 1.3 Spektrum slunečního záření [9] .....	13
Obr. 1.4 Znázornění výpočtu faktoru AM [10] .....	14
Obr. 1.5 Poměr složek slunečního záření dopadajícího na zemský povrch [13] .....	15
Obr. 1.6 Schéma fotovoltaického článku [16] .....	16
Obr. 1.7 Sluneční spektrum v AM 1,5 s vyznačením absorpční hrany křemíku [17] ....	17
Obr. 1.8 Monokrystalické křemíkové ingoty a článek z nich vyrobený [19] .....	18
Obr. 1.9 Příklad absorpce různých vlnových délek vícevrstevným článkem [20] .....	19
Obr. 1.10 Schéma deskového kolektoru [22] .....	20
Obr. 1.11 Schéma vakuové solární trubice [22] .....	21
Obr. 1.12 Koncentrace světla Fresnelovou čočkou [23] .....	22
Obr. 1.13 Část parabolického žlabu [24] .....	22
Obr. 1.14 Solární věž PS10 ve Španělsku, výkon 11 MW [24] .....	23
Obr. 2.1 Základní schéma solárního komínu [27] .....	26
Obr. 2.2 Solární komín s kolektorem (Manzanares, Španělsko, 1982) [28] .....	27
Obr. 2.3 Znázornění skladování tepla pod kolektorem [29] .....	28
Obr. 2.4 Řez konstrukce solárního komínu [31] .....	29
Obr. 2.5 Vysoko výkonové solární komíny, teoretické výšky a výkony [32] .....	30
Obr. 2.6 Naklánění plovoucího komínu ve větru [33] .....	31
Obr. 2.7 Solární komín umístěný na svahu skály, řez z boku a přímý pohled [34] .....	31
Obr. 2.8 Mapa solárního vyzařování [35] .....	32
Obr. 2.9 Graf závislosti účinnosti komínu na jeho výšce .....	36
Obr. 3.1 Komínová elektrárna v Manzanares [43] .....	39
Obr. 3.2 Schéma solárního komínu pro ventilaci rodinného domu [44] .....	40
Obr. 3.3 Ventilace vícepatrových budov. [45] .....	41
Obr. 4.1 Schéma pracoviště zkušebnímu modelu .....	42
Obr. 4.2 Provizorní verze pro test funkčnosti v laboratoři .....	43

Obr. 4.3 Model experimentálního solárního komínu.....	44
Obr. 4.4 Rozměry modelu v mm .....	45
Obr. 4.5 Závislost rychlosti vzduchu na velikosti vzduchové mezery při $T_k = 388,15 \text{ K}$ a $T_o = 302,45 \text{ K}$ .....	46
Obr. 4.6 Anemometr UNI-T UT 363 .....	47
Obr. 4.7 Program automatického odečítání teploty komín2.vee .....	48
Obr. 4.8 Uživatelského panel programu komín2.vee .....	49
Obr. 4.9 Měření závislosti intenzity záření na vzdálenosti lampy .....	51
Obr. 4.10 Závislost intenzity záření na vzdálenosti lampy bez skla.....	52
Obr. 4.11 Závislost intenzity záření na vzdálenosti lampy se sklem .....	53
Obr. 4.12 Rozložení intenzity záření na ploše pro 27 cm vzdálenost, bez skla.....	54
Obr. 4.13 Rozložení intenzity záření na ploše pro 27 cm vzdálenost se sklem.....	55
Obr. 4.14 Rozložení intenzity záření na ploše pro 15 cm vzdálenost, bez skla.....	57
Obr. 4.15 Průběh teploty a rychlosti větru v závislosti na čase .....	59
Obr. 5.1 Princip funkce solárního komínu.....	64
Obr. 5.2 Schéma zapojení úlohy .....	66

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Vliv výšky komínu na jeho účinnost.....	35
Tabulka 4.1 Tabulka hodnot intenzity záření v závislosti na vzdálenosti.....	50
Tabulka 4.2 Naměřené hodnoty intenzity záření ze vzdálenosti 0,27 m bez skla ve $W \cdot m^{-2}$ .....	53
Tabulka 4.3 Naměřené hodnoty intenzity záření ze vzdálenosti 0,27 m pod sklem ve $W \cdot m^{-2}$ ....	54
Tabulka 4.4 Aproximace hodnot intenzity záření bez skla ve vzdálenosti 0,15 m ve $W \cdot m^{-2}$ .....	55
Tabulka 4.5 Naměřená závislost teploty a rychlosti proudění vzduchu při zapnuté a vypnuté lampě.....	57
Tabulka 4.6 Přehled účinnosti a dalších parametrů při rostoucí teplotě s vypočítanou rychlostí vzduchu.....	61
Tabulka 4.7 Přehled účinnosti a dalších parametrů při rostoucí teplotě s naměřenou rychlostí vzduchu.....	61