



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

CHARAKTERISTIKY VENTILÁTOROVÝCH CHLADICÍCH VĚŽÍ

CHARACTERISTICS OF FAN COOLING TOWERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Joska

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Jakub Joska
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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

Charakteristiky ventilátorových chladicích věží

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na zpracování charakteristik ventilátorových chladicích věží pro široký rozsah teplotních parametrů (včetně extrémní teploty), odpovídající vlhkosti vzduchu. Dále bude realizován přepoččet na reálné průtoky chlazené vody. Vstupem bude sada křivek daných projektantem pro různé podmínky okolního prostředí a pro 2 průtoky chlazené vody. Dále budou poskytnuta naměřená data z garančního měření. Vlastní řešení bude zahrnovat zpracování výpočtového postupu a studii vlivu změny provozních parametrů. Výstupem bude sada křivek odpovídající skutečným průtočným podmínkám a požadovanému rozsahu teplot.

Cíle diplomové práce:

1. Stručně představte problematiku chlazení vody s využitím ventilátorových chladicích věží.
2. Zpracujte výpočtový postup identifikující teplotu ochlazené vody v širokém rozsahu provozních parametrů.
3. Vytvořený výpočtový postup validujte s využitím dostupných dat z realizovaných měření.
4. Realizujte studii vlivu změny provozních parametrů a vytvořte sadu křivek odpovídajících skutečným průtočným podmínkám.

Seznam doporučené literatury:

PAVELEK, M., Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.

KUPPAN, T., Heat exchanger design handbook. USA, New York: Taylor and Francis, 2000. ISBN 0-8247-9787-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o problematice ventilátorových chladicích věží. První část práce je rešeršní, zaměřuje se zejména na teorii chlazení a funkci ventilátorových chladicích věží obecně. Následuje kapitola zabývající se vodním hospodářstvím Jaderné elektrárny Dukovany a specifikací konkrétních objektů chladicích věží s nuceným tahem. Druhá část práce popisuje výpočetní model vytvořený za účelem stanovení chladicího výkonu těchto věží při daných vstupních podmínkách. V následných kapitolách práce jsou výsledky z výpočetního modelu porovnány s dostupnými daty z garančních měření a s poskytnutými charakteristikami. Závěrečné strany se zabývají studií vlivu změn vstupních parametrů na chladicí účinek a zkoumáním chování věží při extrémních povětrnostních podmínkách.

Klíčová slova

Odpařovací chlazení, chladicí věž, ventilátorová chladicí věž, jaderná energetika, Rankin-Clausiusův cyklus, výkonové charakteristiky, přenos tepla, vlhký vzduch

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the problematics of fan cooling towers. The very first part of the text is research, focusing mainly on the theory of cooling and the function of fan cooling towers in general. The following chapter deals with the water resource management of the Dukovany nuclear power plant and the specification of its objects of forced draft cooling towers. The second part describes a computational model created to determine the cooling performance of these towers under the given input conditions. In the following chapters, the results from the computational model are compared with the available data from warranty measurements and with the provided characteristics. The final pages deal with the study of the influence of changes in input parameters on the cooling performance and the research of the behavior of the cooling towers under extreme weather conditions.

Key words

Evaporative cooling, cooling tower, forced draft cooling tower, nuclear power, Rankine cycle, performance characteristics, heat transfer, humid air

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JOSKA, Jakub. *Charakteristiky ventilátorových chladicích věží*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132256>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. 69 s. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Charakteristiky ventilátorových chladicích věží** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....

Datum

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych chtěl touto cestou poděkovat své rodině a přátelům za vytrvalou podporu v průběhu celého studia. Děkuji tímto dále také vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za ochotný přístup, cenné připomínky a odborné rady. Rovněž děkuji společnosti ČEZ, a.s. za umožnění zpracování tohoto tématu a poskytnuté podklady, jmenovitě pak panu Ing. Markovi Bártů.

Obsah

Úvod	11
1 Jaderná elektrárna	12
1.1 Rankin-Clausiusův cyklus.....	13
1.2 Jaderná energetika ve světě a u nás	14
1.3 JE Dukovany	16
1.3.1 RC cyklus v JE Dukovany.....	17
2 Odvod tepla	18
2.1 Typy chlazení	18
3 Teorie chladicích věží.....	19
3.1 Chladicí věž s přirozeným tahem	20
3.2 Chladicí věž s nuceným tahem	21
3.3 Bilance chladicí věže	22
3.3.1 Ztráta odkalem a odluhem	22
3.3.2 Ztráta odparem.....	22
3.3.3 Ztráta úletem.....	23
4 Vodní hospodářství JE Dukovany	24
4.1 Chemická úpravna vody	25
4.2 Úpravna chladicí vody.....	25
4.2.1 Okruhy technické vody důležité	26
4.3 Ventilátorové věže v JE Dukovany	29
4.3.1 Fotodokumentace	33
4.3.2 Provozní režimy VCHV JE Dukovany.....	34
5 Výpočetní model	35
5.1 Vstupní data.....	35
5.2 Okolní vzduch	36
5.3 Ventilátor.....	37
5.4 Vlastnosti vody	39
5.5 Vlhčení vzduchu	40
5.6 Přenos tepla	41
5.6.1 Ohřev vzduchu.....	41
5.6.2 Přenos tepla odpařováním	44
5.6.3 Přenos tepla konvekcí a sáláním.....	44
5.7 Celkový tepelný tok – energetická bilance.....	45
5.8 Teplota ochlazené vody	45
6 Aplikace „Charakteristiky VCHV JE Dukovany“	46

7 Srovnání modelu s dostupnými daty	48
7.1 Model vs. garanční měření	48
7.2 Model vs. dodané charakteristiky	49
8 Studie vlivu změn vstupních dat na chladicí účinek.....	54
8.1 Vliv změny $t_{w,1}$	54
8.2 Vliv změny $t_{s,1}$	57
8.3 Vliv změny φ_1	59
9 Extrémní podmínky	61
Závěr.....	63
Reference	64
Seznam použitých zkratk	67
Seznam použitých symbolů.....	68
Seznam použitých indexů.....	68
Seznam příloh.....	69

Úvod

Více než kdy dřív je v současné době světem průmyslu omíláno téma různých energetických cest a možností, kterými se každý jednotlivý stát může vydat. Například v sousedním Německu jsou rušeny a rozebírány uhelné i jaderné elektrárny, přechod k plné závislosti na OZE a dovozu se zdá být otázkou času. Naproti tomu takové Polsko se i přes ekologický nátlak nehodlá od své uhelné stezky nikam odvracet. Upřeme-li pohled na náš domov, Českou republiku, můžeme snad s notnou dávkou jistoty říct, že se veškeré plánování odvíjí od chystané dostavby dukovanské jaderné elektrárny. Nelze však nijak jednoznačně určit, která varianta je nejlepší. Jak už to bývá, každý postoj má své výhody i nevýhody, vše lze nějak vyzdvihnout či shodit. Jedním z nejčastějších argumentů proti jaderné energetice je vedle ukládání vyhořelého paliva také otázka veřejné bezpečnosti, kterou dle odpůrců jádra může atomový reaktor ohrožovat.

Letos tomu bude už 35 let ode dne, kdy svět zasáhla dosud nejzávažnější havárie v oblasti jaderné energetiky. Událost, jenž svými okolnostmi právě rozvoj atomového průmyslu významně poznamenala, kupodivu ale jak ve zlém (výrazným zhoršením důležitého veřejného mínění), tak i v dobrém. Z každé chyby se lze přiučit, každý systém lze zdokonalit. Černobylská havárie vedla k mnoha novým debatám, ty pak ke zvýšení jaderné bezpečnosti i důrazu na ni kladeném. Vyčnívá nad ostatními tragédiemi svým rozsahem, nebyla však ani první ani jedinou.

V březnu roku 2011 se muselo lidstvo s hrůzou dívat na druhou havárii označenou na stupnici INES nejvyšším stupněm 7 (velmi těžká havárie). Ničivá vlna tsunami způsobená výjimečně silným zemětřesením zapříčinila zatopení a následnou katastrofu jaderné elektrárny Fukušima I. Právě tato událost vedla k dalším zpřísněním bezpečnostních opatření, z nichž jedno, technicky orientované, instalované na české jaderné elektrárně v Dukovanech, je právě předmětem této práce.

Během období po havárii v Japonsku byla zvýšena četnost a intenzita bezpečnostních



Obrázek 1: Ventilátorové věže v Jaderné elektrárně Dukovany [1]

kontrol napříč jadernými elektrárnami ve světě. Jednou z myšlenek, která tehdy v Dukovanech dostala svůj prostor, bylo, že pokud nastanou extrémní povětrnostní podmínky, může dojít ke zhroucení stávajících chladicích věží s přirozeným tahem a okruh včetně aktivní zóny reaktoru nebude možné dostatečně a účinně chladit.

V návaznosti na tento podnět byly v areálu JE Dukovany vystavěny dvě budovy ventilátorových chladicích věží s nuceným tahem.

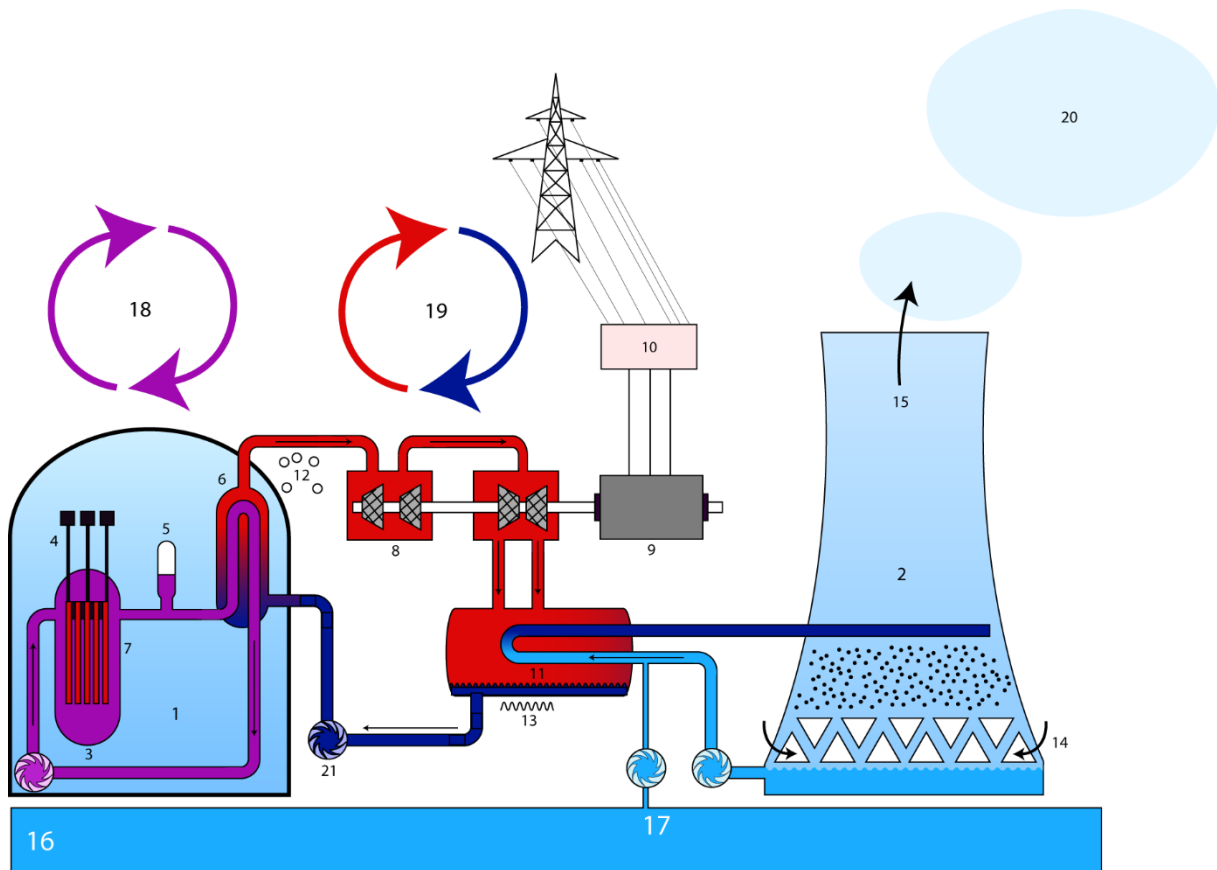
1 Jaderná elektrárna

Jaderná elektrárna je technologický celek využívající vazebnou energii jader těžkých prvků k výrobě elektrické energie. Zjednodušeně lze říct, že se jedná o běžnou tepelnou elektrárnu, která se liší v podstatě jen zdrojem tepla. Palivem je tzv. štěpný materiál, jímž bývá nejčastěji radioaktivní prvek uran, konkrétně je pak pro většinu elektráren zásadní jeho méně častý izotop U^{235} , jenž je řízeně štěpen v jaderném reaktoru, základní a určující části každé atomové elektrárny na světě.

Palivový cyklus je typicky poměrně složitý. Například u onoho uranu jsou k získání 1 kg použitelného paliva potřeba 2 až 4 tuny uranové rudy. Na druhou stranu je férové podotknout, že tímto množstvím se energeticky nahradí až 100 tun vysoce kvalitního černého uhlí. Ruda se nejprve rozemele, následně je z ní získán koncentrát U_3O_8 obsahující minimálně 65 % přírodního uranu. Z něho se rafinuje čistý kovový uran a ten je obohacován právě izotopem U^{235} z původních 0,7 % na 2,5 až 4 %. Finálním palivem jsou lisované pelety přeměněného oxidu uraničitého UO_2 vložené do palivových proutků. Svazek těchto proutků tvoří palivovou kazetu. [2]

Strukturu elektrárny s lehkovodním tlakovým reaktorem (typická varianta především pro země bývalého východního bloku včetně ČR) lze standardně rozdělit do dvou základních částí.

- ❖ **Jaderná část** – Takzvaný primární okruh. Vše začíná u reaktoru, jenž je zdrojem tepla, to je prostřednictvím chladiva odváděno do parogenerátorů a v nich předáváno vodě sekundárního okruhu. Ta je ohřáta až na teplotu varu a vzniklá pára pokračuje svůj cyklus v nejaderné části elektrárny. Nutností je zajištění patřičné jaderné bezpečnosti pomocí hermeticky uzavřené ochranné obálky. V ní krom reaktoru, parogenerátorů a potrubí nalezneme i oběhová čerpadla, bazén použitého paliva, kompenzátory objemu, barbotážní nádrže a další nezbytné armatury.
- ❖ **Nejaderná část** – Prakticky se neliší od běžné tepelné elektrárny. Zahrnuje dva okruhy, sekundární a terciální.
 - **Sekundární okruh** – Horká pára z parogenerátorů prochází parní turbínou, kde odvede práci. Přes spojku či převodovku je realizováno spojení s alternátorem. Vyrobený elektrický proud je v transformační stanici převeden na velmi vysoké napětí a výkon je vyveden mimo elektrárnu do rozvodné sítě. Využitá pára koluje dál do kondenzátoru, zde je ochlazená, zkapalněna a vrací se do parogenerátorů.
 - **Terciální/chladicí okruh** – Chlazení páry v kondenzátoru je zajišťováno vodou z bazénu pod chladicími věžemi. Po vykonání svého poslání cirkuluje tato ohřátá voda zpět do věží, kde je ochlazená proudícím vzduchem. Část vody přší do bazénu chladicí vody a část se odpařuje. Tuto ztrátu je nutno kompenzovat přítokem vody z externího zdroje.



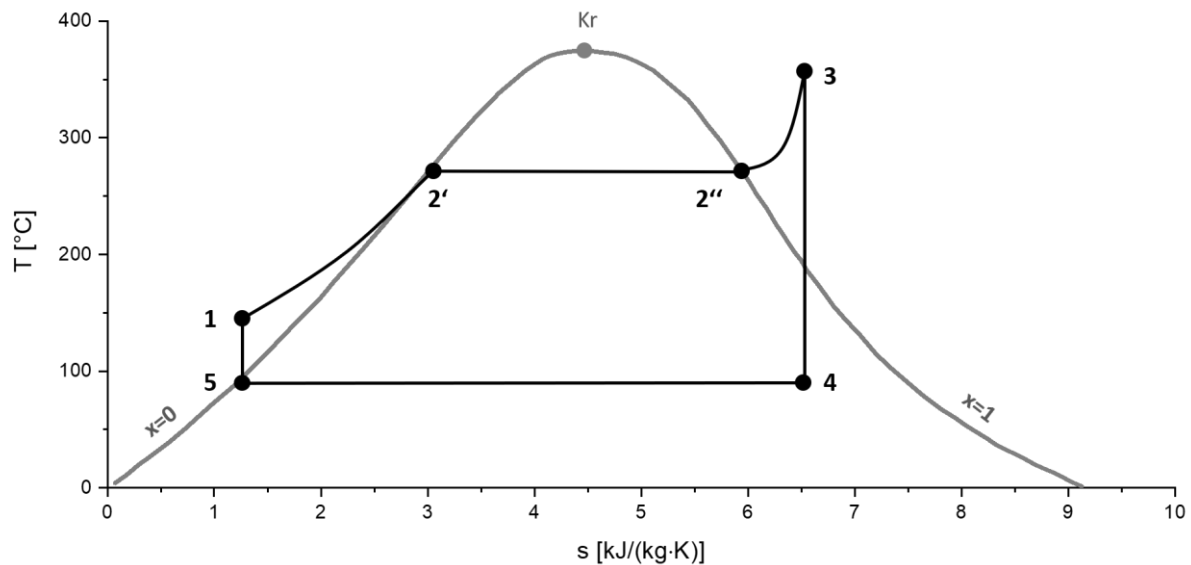
1 – reaktorová hala, 2 – chladicí věž, 3 – tlakovodní reaktor, 4 – regulační tyče, 5 – kompenzátor objemu, 6 – parogenerátor, 7 – aktivní zóna, 8 – turbína, 9 – alternátor, 10 – trafostanice, 11 – kondenzátor, 12 – pára, 13 – kondenzát, 14 – přívod vzduchu do chladicí věže, 15 – odvod teplého vzduchu a páry, 16 – zdroj vody (řeka), 17 – chladicí (terciální) okruh, 18 – primární okruh, 19 – sekundární okruh, 20 – odpar chladicí vody, 21 – čerpadlo/pumpa

Obrázek 1.1: Schéma JE s tlakovodním reaktorem [3]

1.1 Rankin-Clausiiův cyklus

Základu výše popsaného technologického principu, jenž je využíván v každé tepelné i jaderné elektrárně na světě, říkáme Rankin-Clausiiův cyklus, či zkráceně jen RC cyklus.

Jedná se o uzavřený parostrojní oběh, který má za úkol energii obsaženou ve vysoce potenciálním médiu (páře) kontinuálně přeměňovat na mechanickou práci. Ve své nejholejší a nejzákladnější formě jde o teoretický cyklus složený ze dvou izobarických a dvou izoentropických dějů. Tyto děje probíhají ve strojních komponentech elektrárny a vývoj stavu média (vody/vodní páry) zaznamenáváme pro účely vizualizace nejtypičtěji do termodynamického T-s diagramu (diagram teplota vs. specifická entropie), z nějž lze například velmi jednoduše vyčíst potřebné měrné výparné teplo při izobarickém ohřevu a mnoho dalších užitečných technických parametrů. [4]



Obrázek 1.2: Zaznačení ideálního Rankin-Clausiova oběhu do T-s diagramu vody a vodní páry [5]

- ❖ Izobarický ohřev $1 \rightarrow 3$ ve zdroji tepla (pro sekundární okruh JE jím je parogenerátor)
- ❖ Izoentropická expanze $3 \rightarrow 4$ v turbíně
- ❖ Izobarické chlazení $4 \rightarrow 5$ v kondenzátoru
- ❖ Izoentropické stlačení $5 \rightarrow 1$ pomocí čerpadla

Při uvažování reálného oběhu je nutno zohlednit tlakové ztráty ve zdroji tepla, kondenzátoru a potrubním systému, nevratnost dějů v turbíně a čerpadle a další ztráty způsobené nedokonalostí technologie.

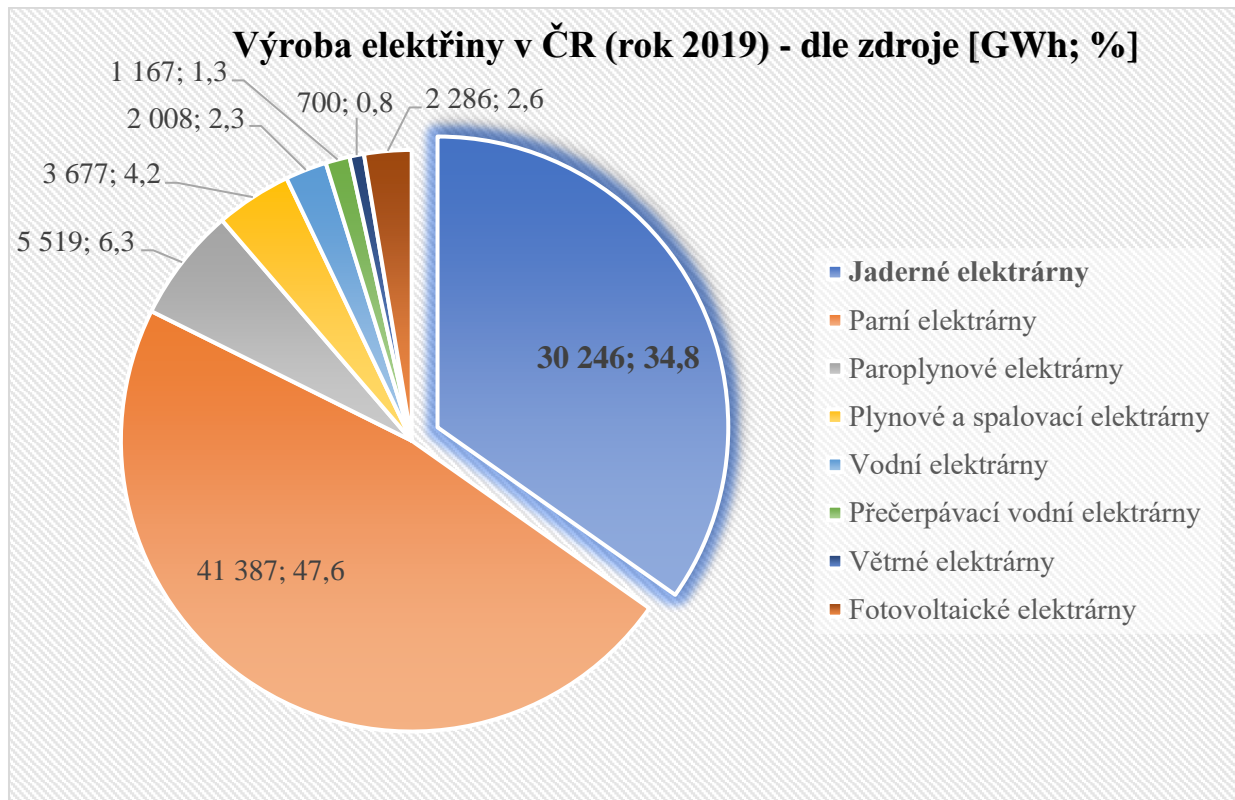
Pro jaderné elektrárny s tlakovodními reaktory je příznačný RC cyklus se sytou parou. Ten se od častěji používaného a prezentovaného cyklu s přehřátou parou (z obrázku 1.2) liší tím, že izobarický ohřev kolujícího média končí na horní mezní křivce (suchost rovna jedné). Do turbosoustrojí tedy přichází pouze pára sytá, nikoli přehřátá. Konkrétní cyklus charakterizující skutečnou realizaci v provozu je popsán dále v [podkapitole 1.3.1](#).

1.2 Jaderná energetika ve světě a u nás

Jak již bylo naznačeno v úvodu práce, postoje různých států k jaderné energetice jsou velice rozmanité, od naprostého odporu až po národní energetické koncepty na jádře závislé. S trochou cynismu by se dalo říct, že některé vlády si svým názorem ani nejsou sami zcela jisté.

Dle nejnovějších dostupných dat Světové jaderné asociace (World Nuclear Association) má jádro přímý podíl na 10 % veškeré vyrobené elektrické energie, přičemž je po celém světě v provozu 443 jaderných reaktorů o celkovém instalovaném výkonu 394 078 MWe. 54 reaktorů je přitom ve výstavbě a 96 dalších ve fázi příprav. Největšími jadernými velmocemi jsou Spojené státy americké (94 reaktorů v provozu, 96,6 MWe instalováno), Francie (56/61,4) a Čína (49/47,5). [6]

V České republice jsou v současné době provozovány dvě jaderné elektrárny – JE Dukovany (4 bloky) a JE Temelín (2 bloky), obě společností ČEZ, a.s. Tyto elektrárny mají celkový instalovaný výkon 4 290 MWe (tj. 19,5 % veškerého instalovaného výkonu v ČR) a při započítaném vytížení 80,5 % vyrobí ročně přes 30 000 GWh elektrické energie, což odpovídá zhruba 35 % veškeré vyrobené EE v ČR (konkrétní čísla za rok 2019 byla 30 246 GWh, tj. 34,8 % výroby brutto¹). 5,5 % této výroby je spotřebováno pro pokrytí vlastního napájení elektráren. [7]



Obrázek 1.3: Graf podílu jednotlivých zdrojů na výrobě elektrické energie v České republice za rok 2019 dle Energetického regulačního úřadu [7]

¹ Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy, z níž jsou tato data čerpána, bývá vydávána vždy až v polovině následujícího roku. Čísla za rok 2020 zatím (ke dni odevzdání této diplomové práce) Energetický regulační úřad nezveřejnil, proto jsou zde uvedena data za rok 2019.

1.3 JE Dukovany

První jaderná elektrárna vybudovaná na území České republiky se nachází na jižní Moravě zhruba 30 kilometrů od Třebíče. S přípravami výstavby se začalo v roce 1974, přičemž poslední blok elektrárny byl uveden do provozu o 13 let později. [8]

- ❖ 4 bloky
- ❖ Původní instalovaný výkon 4 x 440 MW
- ❖ Současný instalovaný výkon 4 x 510 MW
- ❖ Typ reaktorů: VVER 440/213 – tlakovodní reaktory moderované i chlazené vodou
- ❖ Tepelný výkon jednoho reaktoru 1 375 MW
- ❖ Maximální tlak vody v primárním okruhu 12,25 MPa
- ❖ Teplota chladicí vody reaktoru 267/297 °C
- ❖ Každý blok disponuje dvěma turbogenerátory, turbíny jsou třítělesové, jeden díl vysokotlaký, dva nízkotlaké, všechny díly dvou Proudě.
- ❖ Minutové otáčky turbogenerátorů: 3 000
- ❖ Elektrárna je chlazená mimo jiné osmi chladicími věžemi s přirozeným tahem (dvě na blok) o výšce 125 metrů, dolním průměru 90 metrů a horním průměru 60 metrů
- ❖ Délka palivové kampaně 10 až 11 měsíců.
- ❖ Součástí areálu je úložiště nízkoaktivních a středněaktivních odpadů a sklad a mezisklad vyhořelého paliva. Tyto sklady mají dostatečnou kapacitu pro zbytek životnosti elektrárny. [9]

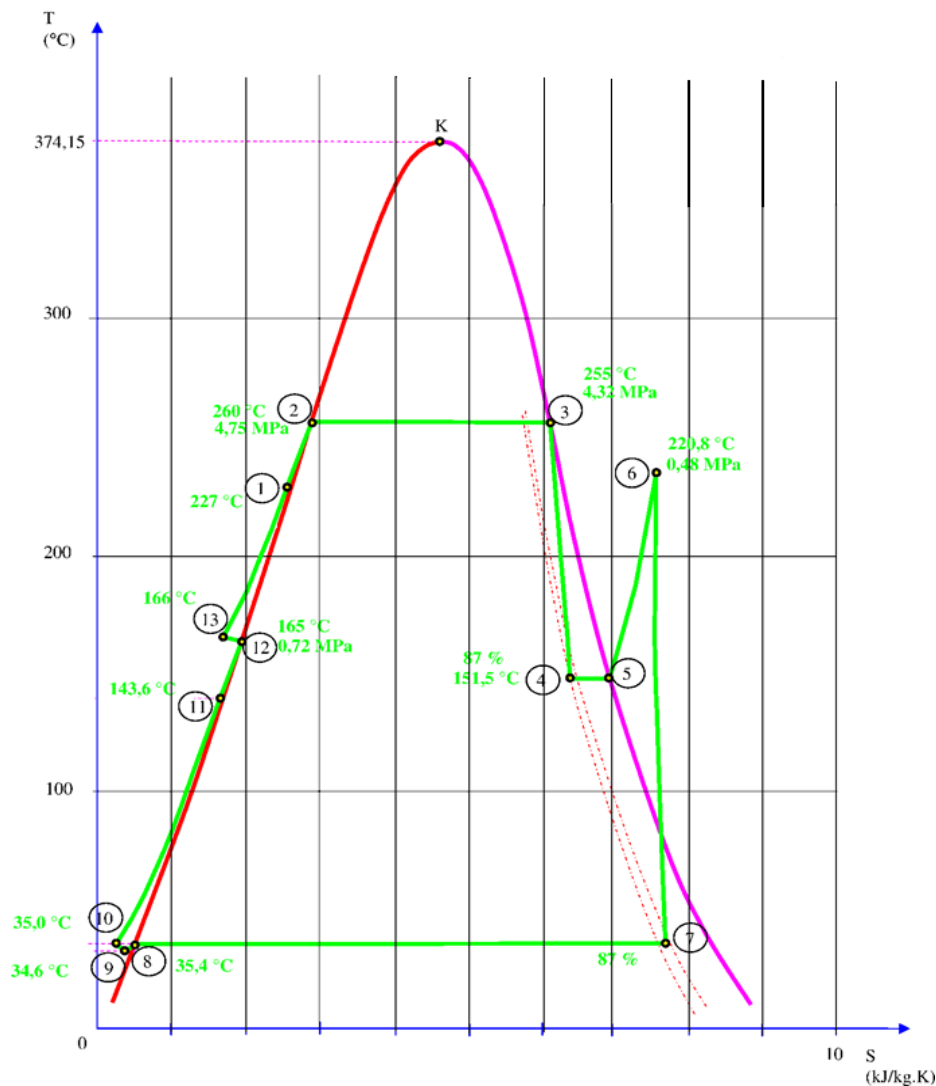
Z pohledu původního projektu je již jaderná elektrárna v Dukovanech po konci své životnosti a přestává. Díky kontinuální modernizaci technologií a bezpečnostních systémů však stále splňuje veškeré požadavky k provozu a na základě nových licencí mohou všechny 4 bloky pokračovat v chodu.

JE Dukovany je základním zdrojem naší energetické soustavy, dlouhodobě pokrývá přes 20 % celkové spotřeby a je jedním ze základních stavebních kamenů energetické bezpečnosti a soběstačnosti České republiky. Od svého spuštění vyrobila již přes 433 TWh elektrické energie, což odpovídá zhruba osmadvacetinásobku současné spotřeby všech domácností. [9]

V současné době je velkým tématem dostavba Dukovan, tj. rozšíření stávajícího komplexu o další až dva nové bloky, které by měly snad plně nahradit bloky původní, nejlépe okamžitě po jejich odstavení. Toto je však otázkou budoucnosti, dlouhého procesu licencování, projektování a politických dohod a rozhodnutí.

1.3.1 RC cyklus v JE Dukovany

Na obrázku 1.4 vidíme skutečný Rankin-Clausiovův cyklus dukovanské jaderné elektrárny. Jako zdroj tepla cyklu slouží parogenerátory, vypařování v nich probíhá při teplotě 260 °C a tlaku 4,75 MPa. Parní turbína se skládá z vysokotlakého a dvou nízkotlakých dílů. Za VT dílem turbíny je řazen separátor pro oddělení vzniklé vody od páry. Po zkondenzování a podchlazení je cirkulující voda před opětovným vstupem do PG přehřívána systémem pětistupňové nízkotlaké regenerace a dvoustupňové vysokotlaké regenerace.



Obrázek 1.4: T-s diagram Rankin-Clausiova cyklu JE Dukovany [10]

Tabulka 1.1: Popis bodů z obrázku 1.4

1→2	Ohřev vody v PG	8→9	Podchlazení kondenzátu
2→3	Vypařování vody v PG	9→10	Zvýšení tlaku kondenzátu prací KČ
3→4	Expanze páry ve VT části PT	10→11	Ohřev kondenzátu v NT regeneraci
4→5	Odloučení vody z páry v separátorech	11→12	Dohřev kondenzátu v TO TUV
5→6	Přehřívání páry v přehříváčích	12→13	Zvýšení tlaku NV prací ENČ
6→7	Expanze páry v NT části PT	13→1	Ohřev NV ve VT regeneraci
7→8	Kondenzace páry v kondenzátorech		

2 Odvod tepla

Odvádění zbytkového tepla se netýká ani zdaleka jen tepelných elektráren. Jedná se o technickou problematiku takřka většiny procesů, u nichž je využíváno přeměny forem energie. [11]

2.1 Typy chlazení

Dle fyzikálního principu a způsobu odvodu přebytečného tepla můžeme klasifikovat několik základních typů chlazení. [12]

- ❖ **Chlazení suchým ledem** – Suchým ledem označujeme pevnou fázi oxidu uhličitého CO₂, který je zajímavý svou schopností sublimace (pro atmosférický tlak je sublimační teplota rovna -78 °C). Během této změny absorbuje suchý led z chlazeného prostředí teplo rovné měrnému skupenskému teplu vypařování. V současnosti nachází tato metoda využití zejména v potravinářském průmyslu pro uchovávání letecky přepravovaných mražených potravin.
- ❖ **Odpařovací chlazení** – Využíváno mimo jiné v chladicích věžích, podrobněji rozebráno v následující [kapitole 3](#).
- ❖ **Termoelektrické chlazení** – Založeno na principu takzvaného Peltierova jevu – když prochází stejnosměrný proud obvodem se dvěma různými vodiči zapojenými v sérii, jedna z jejich styčných ploch se ochlazuje a druhá ohřívá. Ideální je použití dvou kovů s opačnou polaritou, typicky antimon a bismut. Využití termoelektrického chlazení je omezeno na malé prostory jako například chladničky v autech.
- ❖ **Paroproudé chlazení** – Základem je sestava parní trysky, ejektoru a odlučovací komory. Do parní trysky přivádíme páru z kotle. Při vysokých rychlostech páry v ejektoru jsou z odlučovací komory unášeny veškeré plyny a páry, čímž vzniká podtlak. S klesajícím tlakem klesá i teplota varu vody. Část vody v komoře se tedy za nízkých teplot odpařuje, zatímco zbytek je tímto procesem ochlazován a následně čerpán do chlazeného prostoru, přičemž teplá voda z něj přichází cyklicky zpět do odlučovací komory. Zlomek média je při každém cyklu ztracen odpařením, je tedy nutné vodu do okruhu doplňovat. Vyrobená pára a pára z odlučovací komory kondenzují v kondenzátoru a jsou následně čerpadlem přivedeny zpět do kotle.
- ❖ **Chlazení zkapalněným plynem** – Bezpečnostním předpokladem k využití kapalného plynu pro chlazení je, že není toxický. Vesměs je používáno buď dusíku nebo oxidu uhličitého. Podstata je velmi podobná variantě se suchým ledem. Plyn je naplněn v tlakové nádobě a pomocí ventilu je regulováno jeho rozstřikování do chlazeného prostoru, kde se při normálních podmínkách odpařuje, čímž odebírá teplo okolí.
- ❖ **Chlazení s vírovou trubicí** – Vírovou trubicí rozumíme jednoduchou rovnou trubicí, do níž tangenciálně vháníme stlačený vzduch, jehož proud je díky regulaci možné rozdělit na středový a obvodový, přičemž médium ve středu trubice je výrazně chladnější než teplé plyny při stěnách. Lze realizovat variantu souproudu i protiproudu.

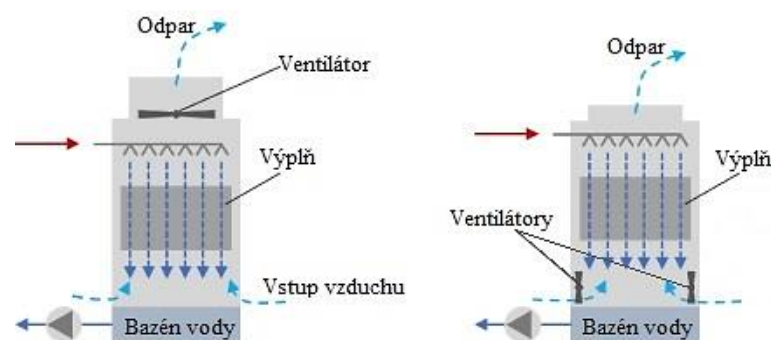
3 Teorie chladicích věží

Hlavní dominantou obou našich českých jaderných elektráren jsou bezpochyby chladicí věže. Tyto mohutné budovy tvaru rotačního hyperboloidu mají za úkol chladit vodu terciálního okruhu a odvádět zbytkové teplo pryč z elektrárny. Využívají k tomu proces odpařovacího chlazení, tedy principu založeném na tom, že během vypařování kapalina absorbuje z okolí teplo ekvivalentní svému měrnému skupenskému teplu, čímž je okolí právě o toto teplo ochuzováno a výsledkem toho ochlazováno. Uveďme zde proto první zásadní veličinu pro následný výpočet, a to měrné skupenské teplo vypařování vody, tedy právě takové množství tepla, které je třeba k vypaření jednoho kilogramu vody. Toto teplo je s klesající tendencí závislé na teplotě, při níž vypařování probíhá. Jeho přesné stanovení bude součástí výpočtového modelu, ale pro orientaci si zde nastiňme hodnoty pro 10 a 60 °C, mezní hodnoty teploty vody na vstupu do chladicí věže (hodnota l_w bude také vždy v těchto mezích).

$$l_w = f(t) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (3.1)$$
$$l_w = f(10 \text{ °C}) = 2\,477,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$
$$l_w = f(60 \text{ °C}) = 2\,357,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

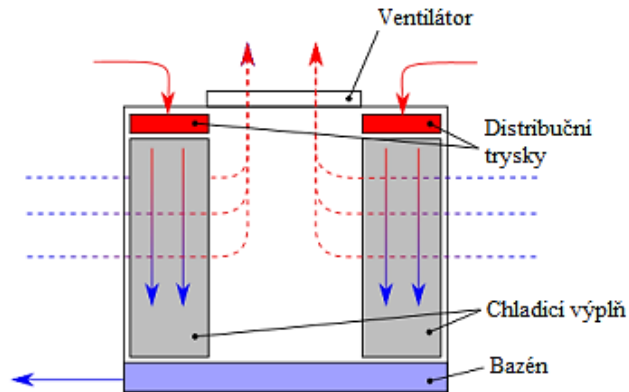
Část přivedené vody se tedy odpaří a odebere teplo zbytku, který po průchodu chladicí výplní ve formě jakéhosi deště přší dolů do bazénu chladicí vody. Vnitřní část chladicí věže lze zjednodušeně popsat jako protiproudý směšovací tepelný výměník voda/vzduch, kdy je voda rozprašovaná tryskami po teplosměnné ploše věže, tvořené technologickou chladicí výplní optimalizovanou pro přenos adekvátního a žádaného množství tepla, ochlazována kromě zmíněného odpařování i konvekcí a sáláním. [13]

Dle tahu vzduchu, respektive způsobu jeho zajištění, rozlišujeme dva až tři typy chladicích věží. Primárně jde o chladicí věže s přirozeným tahem a s tahem nuceným. Druhá skupina bývá ještě v některých literárních pramenech dále dělena, a to dle pozicování ventilátorů na tah nucený nebo indukovaný (viz obrázek 3.1). V rámci této práce zachováme základní, častěji používané dělení a tah všech ventilátorových věží budeme označovat jako nucený.



Obrázek 3.1: Indukovaný (vlevo) vs. nucený tah

V menším počtu případů se můžeme setkat i s variantou využívající křížové nebo kombinované proudění namísto klasického protiproudu, jehož hlavní výhodou, díky které bývá volen, je vysoký účinek tepelné směny. [14]



Obrázek 3.2: Schéma chladicí věže s křížovým prouděním

3.1 Chladicí věž s přirozeným tahem

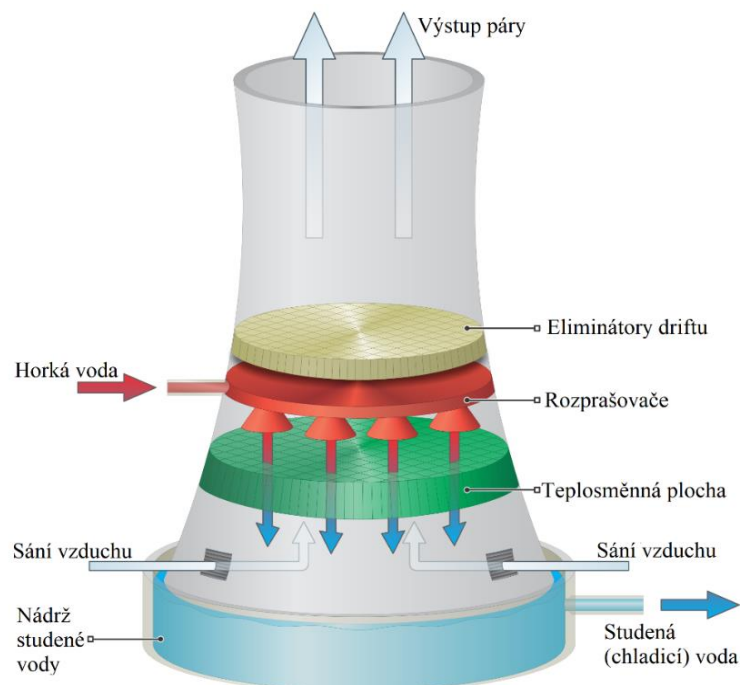
Tato varianta chladicí věže, v branži přezdívaná jako tzv. Ittersony, je právě oním dříve zmíněným monumentem tvaru rotačního hyperboloidu a je typická výhradně pro plošně a energeticky rozměrné komplexy, mezi něž se kromě jaderných a dalších tepelných elektráren řadí například ropné rafinerie, hutní provozy nebo areály chemického a petrochemického průmyslu.[15] [16]

Tah je zde vyvolán bez operačního zásahu takzvaným komínovým efektem – fyzikálním jevem proudění (stoupání) teplého vzduchu dutinou, způsobeným rozdílnou teplotou na obou koncích dutiny.

Objekt lze rozdělit na tři základní části. První je samotný tahový komín, uvnitř něj chladicí soustava a pod ním sběrná nádrž studené chladicí vody.

Tahový komín je v současných realizacích tvořen železobetonovou tenkostěnnou skořepinou, jejíž tloušťka je proměnlivá po výšce věže. Tato výška se pohybuje v mezích od 30 do 200 m. [17]

Ve spodní části bývá z důvodu snadného proudění chladicího vzduchu skořepina otevřená, nesena je skupinou sloupů (viz obrázek 3.4).



Obrázek 3.3: Schéma chladicí věže s přirozeným tahem [18]

Ve vnitřním prostoru věže je umístěna samotná chladicí výplň a nad ní přívod a rozstřík horké vody. Dle uspořádání trubek, z nichž je voda do systému přiváděna, rozlišujeme soustavu buď kapkovou (vodorovně zavěšená), blánovou (svisle zavěšená) nebo jejich kombinaci. [19]

Dále zde také nalezneme soustavu bezpečnostních prvků pro údržbáře nebo nezbytné eliminátory driftu, což jsou soustavy lišt zabraňující nežádoucímu únosu kapiček vody pryč z objektu. Tyto eliminátory jsou v dnešní době vyráběny téměř výhradně z plastu a jejich účinnost je velice vysoká (minimální efektivita 95 %).



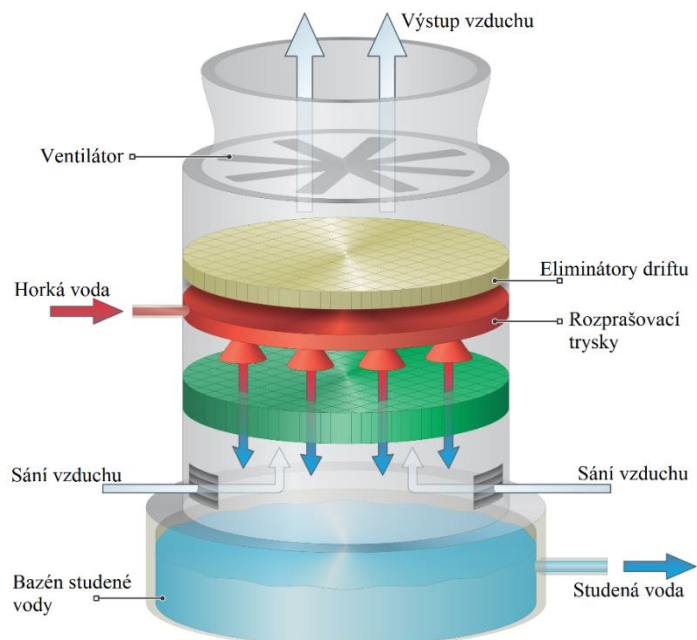
Obrázek 3.4: Spodní část chladicí věže [20]

3.2 Chladicí věž s nuceným tahem

První, na pohled zřejmou a zásadní výhodou chladicích věží s nuceným tahem oproti těm s tahem přirozeným jsou podstatně menší rozměry a s tím spojené nižší investiční náklady. Díky prostorové ekonomičnosti není problém v zařazení několika věží do sekcí na poměrně malé rozloze, čímž dosáhneme násobného chladicího výkonu oproti jedné samostatné buňce. Hlavní předností je pak schopnost zajištění potřebné účinnosti chlazení i za nepříznivých povětrnostních podmínek. Proudění vzduchu je zde zajištěno pomocí ventilátorů, jejichž pohon pro průmyslový areál představuje energetickou zátěž. I přesto lze využitím tohoto typu chladicí věže docílit vyšší účinnosti celého cyklu. V porovnání s Ittersony jsou ventilátorové věže schopny docílit podstatně nižší teploty ochlazené vody. [17]

Vnitřní vestavba se svou skladbou oproti věži s přirozeným tahem příliš neliší. Opět zde nalezneme přívod a rozvod horké vody, chladicí výplň, eliminátory driftu a pod věží sběrný bazén.

Ventilátorové soustrojí má více variant umístění. Buď se nachází v dolní části věže, na vstupu chladicího vzduchu do systému a protlačuje tento vzduch věží směrem vzhůru. Častěji se však setkáme s ventilátorem sacím, který je usazen v horní části věže (viz obrázek 3.5) a přisává vzduch ze spodní části, čímž vytváří tzv. indukovaný tah. Jedná se zpravidla o axiální, nízkotlaké, pomaluběžné ventilátory s relativně nízkou vlastní spotřebou. Za soustrojím ventilátoru se nachází nezbytný difuzor usměrňující proud vzduchu do okolí. [13]



Obrázek 3.5: Schéma chladicí věže s nuceným tahem [21]

3.3 Bilance chladicí věže

Už z principu funkce chladicí věže je zřejmé, že vznikajícím odparem dochází k určité ztrátě cirkulující vody. Tato ztráta není jedinou, přidává se k ní ještě ztráta odkalem a odluhem, který bývá řízen automaticky a zajišťuje patřičnou kvalitu a čistotu média. Další je ztráta úletem, jenž je krajně nežádoucí a snažíme se jí v co nejvyšší možné míře vyhnout. Výsledkem těchto procesů je nutnost vodu do okruhu kontinuálně doplňovat z externího zdroje.

$$\dot{m}_{\text{doplň}} = \dot{m}_{\text{odkal}} + \dot{m}_{\text{odluh}} + \dot{m}_{\text{odpar}} + \dot{m}_{\text{uleť}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (3.2)$$

3.3.1 Ztráta odkalem a odluhem

Každé médium využívané energetickým oběhem, vodu nevyjímaje, je zpravidla nutno udržovat v co nejlepší možné kvalitě, tak aby nedocházelo ke snížení účinnosti cyklu nežádoucím vlivem nečistot nebo dokonce k mechanickému poškození potrubních cest a armatur. K těmto účelům nám slouží procesy odluhu a odkalu, tedy způsoby řízeného odvodu nečistot ze systému prováděné buď průběžně nebo jednorázově.

Bavíme-li se o chladicí věži, nejčastěji narazíme na nečistoty ve formě sedimentu usazujícího se na dně sběrného bazénu pod věží. Tento kal je nutné pravidelně odstraňovat a jeho množství je pro různé aplikace velmi odlišné a specifické.

Pro naši konkrétní ventilátorovou chladicí věž lze důvodně předpokládat, že množství vzniklých usazenin bude velmi malé. Důvodem je jak nízké hydraulické zatížení věže v normálním provozu, tak hlavně velmi dobrá kvalita chladicí vody na jaderných elektrárnách a malá úroveň celkového znečištění okolí chladicí věže. Dle předložených podkladů je předpokládaná doba mezi jednotlivými odkalovacími procesy 5 až 10 let, přičemž se za tu dobu vytvoří méně než 5 m³ kalu. [22]

3.3.2 Ztráta odparem

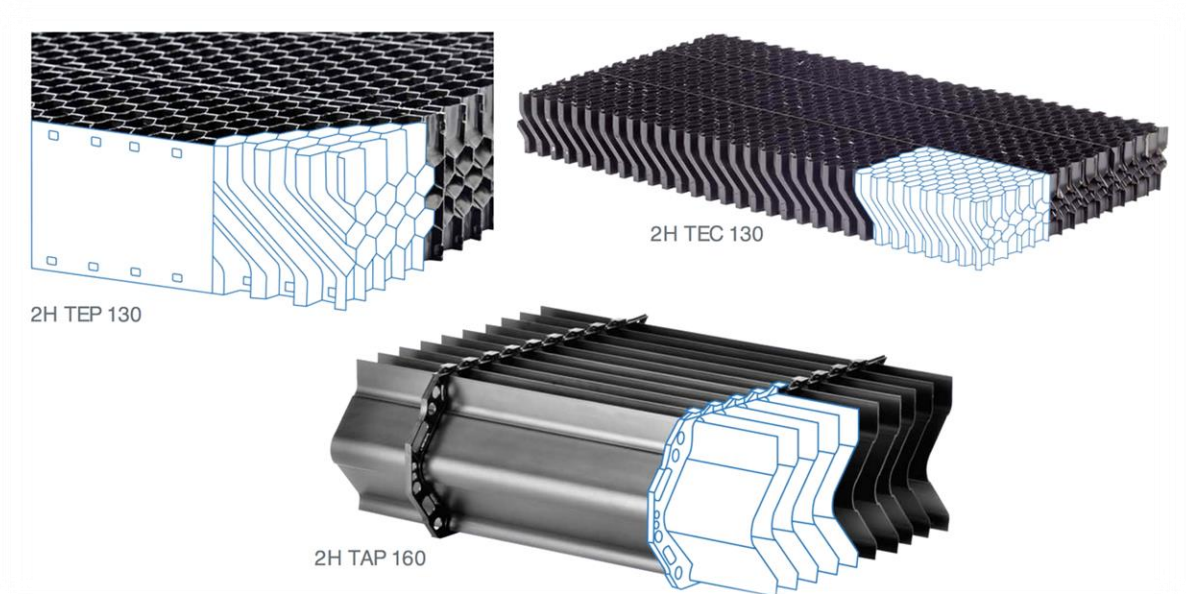
Jedná se o fyzikální ztrátu související s odpařovacím chlazením horké vody v chladicí věži. Velikost této ztráty odpovídá množství vody potřebnému k nasycení chladicího vzduchu a vzniklé vodní páře opouštějící objekt věže. Při běžném provozu se pohybuje v intervalu 1,2 – 2,8 % hmotnostního průtoku vody věží a závisí na hydraulickém zatížení věže, chladicím pásmu (tj. rozdílu teplot vstupní a výstupní vody) a parametrech okolního vzduchu, konkrétně jeho teplotě a relativní vlhkosti.

Pro chladicí věže s nuceným tahem v JE Dukovany je to jediná z uvedených ztrát cirkulující vody dosahující hodnot v jednotkách procent hydraulického zatížení systému. [23]

3.3.3 Ztráta úletem

Ztráta úletem, jinak také ztráta únosem, je mechanická ztráta způsobená tahem ventilátorů a částečně i okolním větrem. Jde o to, že vyvolaný tah unáší lehké rozprašované kapičky vody a s jistou pravděpodobností je odvede až mimo objekt věže, a tedy nenávratně pryč z oběhu. Tomuto jevu se snažíme zabránit instalací eliminátorů driftu, které mají různou účinnost dle použité technologie, standardem je však odloučení alespoň 95 % unikajících kapek.

Pokud by ve ventilátorových věžích JE Dukovany odlučovače kapek nebyly, činila by vzniklá ztráta zhruba 1,5 % hydraulického zatížení. Použité efektivní eliminátory tuto hodnotu snižují až na 0,01 %, což při maximálním průtoku za normálního provozu odpovídá cca 55 gramům unikající vody za sekundu. [23]



Obrázek 3.6: Příklady různých typů eliminátorů driftu [24]

4 Vodní hospodářství JE Dukovany

Voda je v dukovanské, stejně jaké v každé jiné, jaderné elektrárně zásadním médiem, o němž je třeba dobře pečovat. Vysoce moderní systémy vodního hospodářství mají za úkol zajišťovat především patřičnou kvalitu, kvantitu, nezávadnost a bezproblémovou cirkulaci vody ve všech jejích formách.

V případě Jaderné elektrárny Dukovany je voda odebírána z povrchového zdroje, jímž je řeka Jihlava, na níž bylo v sedmdesátých letech minulého století vybudováno vodní dílo Dalešice. Jeho součástí je spodní vyrovnávací nádrž Mohelno, a právě z ní je voda pro potřeby dukovanské elektrárny odebírána. Horní (dalešickou) nádrž díla drží se svými takřka 100 metry nejvyšší těleso hráze v České republice. Hráz nádrže Dalešice je sypaná, 350 metrů dlouhá, 8 metrů široká a je pod ní situována přečerpávací vodní elektrárna o výkonu 4x120 MW.



Obrázek 4.1: Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice na úpatí sypané hráze [25]

Na pravém břehu nádrže Mohelno je umístěna čerpací stanice, z níž je surová voda čerpána do čtyř zásobních gravitačních vodojemů, každém o objemu 2 000 m³. Z těchto vodojemů voda regulovaně samospádem odtéká do úpraven vody, které jsou již součástí samotného objektu elektrárny. [26]

V zásadě se setkáme se dvěma typy těchto úpraven vody (CHÚV – chemická úprava vody a ÚCHV – úprava chladicí vody) a ke každé z nich se pojí několik oddělených vodohospodářských systémů a okruhů, z nichž každý má na vlastnosti média specifické přísnější či benevolentnější požadavky.

4.1 Chemická úprava vody

Zajišťuje dodávku vody pro primární okruh, sekundární okruh a horkovodní systémy. Jejím účelem je provést pro potřeby těchto okruhů chemickou úpravu vody ze surového stavu takzvanou demineralizací. Ta se skládá z několika podprocesů počínaje destilací přes deionizaci až k finálním filtracím na úrovni nanovláken.

Demineralizovaná voda (též zkráceně jen demivoda nebo deionizovaná voda) je speciálním způsobem upravená voda, zbavená především vápenatých a jiných znečišťujících materiálů, které způsobují zanášení a usazování vápence a jiných pevných vrstev v zařízeních, v nichž mohou mít negativní vliv na chod a životnost. Tvrdé úsady mohou nejen snižovat průtok kapaliny a zhoršovat teplotní vlastnosti, ale i mechanicky poškozovat potrubní systémy, součásti a armatury.

V obou českých jaderných elektrárnách slouží demivoda nejen jako chladivo a moderátor, ale také jako médium sekundárního okruhu, což má za zásluhu delší životnost a spolehlivost strojních součástí, ale také vyšší účinnost celého cyklu.

Kvalita demivody je dána mírou čistoty, té odpovídá měrná elektrická vodivost neboli konduktivita. Čím je konduktivita nižší, tím je demivoda lepší. Abychom mohli vodu považovat za demineralizovanou, uvádí se hraniční maximální hodnota konduktivity $0,5 \mu\text{S/cm}$. [27]

Využití nachází demineralizovaná voda i v mnohem běžnějších a méně odborných aplikacích než jen v jaderné elektrárně. V automobilovém odvětví jsou s ní například ředěny chladicí kapaliny a kapaliny do oštrikovačů nebo také doplňovány akumulátory. Doporučuje se jí používat i v domácnostech pro plnění spotřebičů jako jsou napařovací žehličky, brání totiž svou čistotou před tvorbou nežádoucího vodního kamene.

Kromě technologií potřebných pro výrobu demivody se v budově CHÚV nachází také skladovací prostory.

4.2 Úprava chladicí vody

Slouží především k ustálení vody přivedené z gravitačních vodojemů a jako zásobárna pro čerpací stanici. Dále zde pak dochází k úpravě přídavné vody pro okruh cirkulační vody, okruhu technické vody důležité (TVD), technické vody nedůležité (TVN) a požární vody.

Právě na doplňování chladicích okruhů je využit zdaleka největší podíl vody dopravované do elektrárny z externího zdroje. Pro chlazení různých technologických zařízení se většinou používají vodní cirkulační chladicí systémy s otevřeným okruhem, tj. voda odvádějící teplo z daných spotřebičů je znovu ochlazována na původní teplotu přímým stykem s proudícím okolním vzduchem, není tedy žádnou bariérou oddělena od atmosféry a může se do ní částečně odpařovat, přičemž oním odpařováním dochází k zahušťování zbývající vody v okruhu. Ke snížení, respektive udržování koncentrací solí a suspendovaných látek na přijatelné úrovni se z chladicího okruhu část oběhové chladicí vody odvádí jako odluh při současném doplňování ztrát upravenou čerstvou vodou, jak bylo uvedeno v [podkapitole 3.3](#) o hmotnostní bilanci chladicí věže.

Souhrnné schéma vnějších chladicích okruhů Jaderné elektrárny Dukovany je zobrazeno na obrázku 4.2. Vidíme zde objekt CČS – centrální čerpací stanice. Tyto stanice jsou v elektrárně celkem dvě, jedna na každý hlavní výrobní blok (HVB). Do centrální čerpací stanice přichází přídavná voda ke kompenzaci ztrát všech chladicích vodních systémů, její

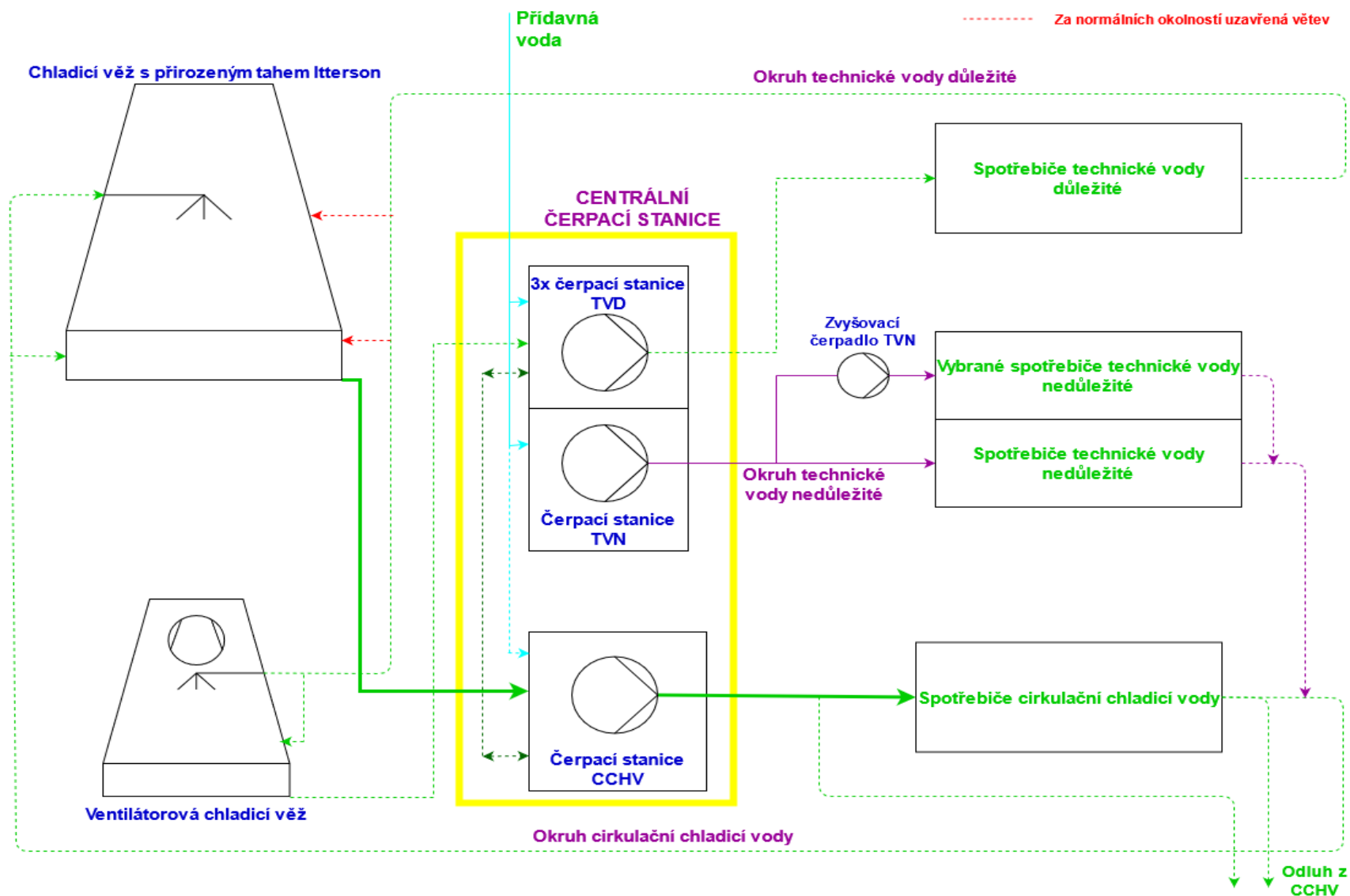
objem je zde rozdělen dle aktuální potřeby a jednotlivé okruhy jsou o ní obohaceny. Tato voda je již upravená po průchodu přes ÚCHV. [22]

V rámci CČS se dále setkáme s vnitřním dělením na pět čerpacích stanic, z nichž jedna náleží okruhu cirkulační chladicí vody, jedna okruhu technické vody nedůležité a tři divizím technické vody důležité. Počet současně pracujících čerpadel v každé čerpací stanici TVD se vždy odvíjí od aktuální potřeby reaktorového bloku, dle režimu, v němž se blok zrovna nachází. Právě technická voda důležitá je důležitá nejen z pohledu elektrárny, ale i z pohledu této práce. Její systém je totiž jediný, k jehož chlazení jsou přímo určeny ventilátorové chladicí věže s nuceným tahem. [26]

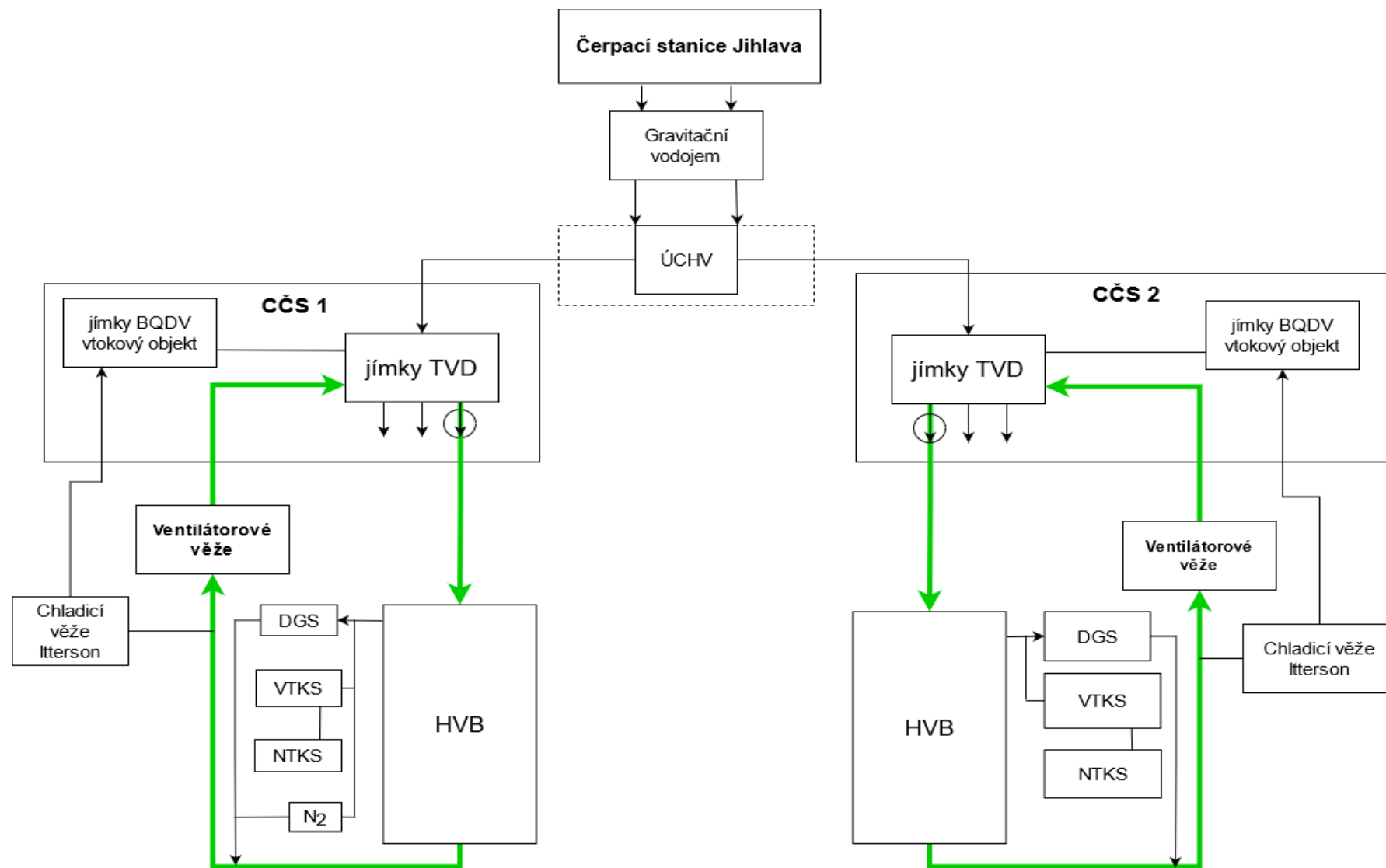
4.2.1 Okruhy technické vody důležité

Jde o jednu z nejdůležitějších částí bezpečnosti celé jaderné elektrárny. Účelem systému technické vody důležité je zajištění odvodu nízkopotenciální tepelné energie ze spotřebičů důležitých zejména z hlediska jaderné bezpečnosti, a to ve všech režimech provozu bloku včetně výpadku napájení systému vlastní spotřeby. Tento systém se skládá celkem ze tří okruhů pracujících nezávisle na sobě s tím, že chladicí výkon každého z nich postačuje k úplnému dochlazení primárního okruhu elektrárny, a tedy k bezpečnému odstavení bloku. Ostatní dva okruhy TVD tvoří 200% rezervu. To vše platí jak při plánovaném, tak i havarijním odstavení bloku jaderné elektrárny. [22]

Okruhy technické vody důležité začínají svůj cyklus právě ve své příslušné čerpací stanici, odkud je voda vedena do hlavního rozváděcího kolektoru TVD a z něj putuje vždy žádaný objemový podíl do příslušných stavebních objektů. Těmito objekty jsou hlavní výrobní blok (v rámci něj reaktorovna, mezistrojovna a strojovna), dieselgenerátorová stanice, vysokotlaká kompresorová stanice, kompresorová stanice vysokotlakého dusíku a budova správy radioaktivních odpadů. V těchto budovách je chladicí voda přivedena k vybraným spotřebičům, kterým pro jejich důležitost náleží přiřazení systému TVD. Oteplená technická voda důležitá se z velkých spotřebičů vrací pod tlakem do sběrného kolektoru a dále do hlavního vratného kolektoru, který ji odvádí k ventilátorovým chladicím věžím. Velké chladicí věže s přirozeným tahem se již ke chlazení TVD nepoužívají, jsou brány pouze jako rezervní alternativa (viz červené přerušované větve na obrázku 4.2, které jsou za běžných podmínek uzavřené). Po ochlazení je technická voda důležitá zavedena zpět do jímek TVD v CČS a okruh znázorněný na obrázku 4.3 může začít nanovo.



Obrázek 4.2: Blokové schéma vnějších chladicích okruhů



Obrázek 4.3: Schéma cirkulace TVD v JE Dukovany

4.3 Ventilátorové věže v JE Dukovany

V první řadě stojí za zmínku uvést na pravou míru označení objektů ventilátorových chladicích věží. Ty jsou totiž někdy v médiích, literatuře a také některých interních firemních dokumentech označovány zkratkou KJT, tj. koncové jímače tepla. Když se však na problematiku podíváme z fyzikálního hlediska, tak je skutečným koncovým jímačem tepla vzduch, respektive atmosféra, do které teplo proudícím vzduchem odchází, nikoliv samotné budovy chladicích věží a pojmenování KJT pro ně tedy považujeme za ne zcela korektní.

Jak bylo naznačeno v [úvodu](#) práce, objekty ventilátorových chladicích věží, ačkoliv byly součástí původního sovětského projektu, nestojí v dukovanské jaderné elektrárně dlouho. V osmdesátých letech z jejich výstavby sešlo z ekonomických důvodů a zpět do diskuse se toto téma dostalo až v roce 2011, kdy se po havárii v japonské elektrárně Fukušima Daiči zvýšila frekvence takzvaných „stress testů“, což jsou zátěžové testy zaštiťované Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (IAEA) a zaměřené především na jadernou i obecnou bezpečnost. Z výsledků těchto testů vyplynula nejedna připomínka. Asi nejvýraznější z nich pak byla nedostatečná odolnost stávajících chladicích věží vůči extrémním seismickým a povětrnostním podmínkám. Jednou z možných variant řešení tohoto problému by byly rozstřikovací bazény, podobné, jaké najdeme v JE Temelín. Tyto bazény však zabírají příliš velkou plochu a nevešly by se do areálu JE Dukovany. Právě z tohoto důvodu byly dostavěny původně plánované ventilátorové chladicí věže, jež by si měly umět poradit s vichrem o rychlosti až 250 kilometrů v hodině (odhad pro stávající věže s přirozeným tahem je cca 150 km/h) a zemětřesením o síle kolem 5,5 stupně Richterovy škály.

Stavba probíhala v letech 2013 až 2016 a budovy VCHV celkem zabírají 2160 m² plochy (2 budovy, 40x27 m, výška 15,66 m). V rámci prací bylo také třeba zavést potřebná přívodní a odvodní potrubí. Těch jsou řádově stovky metrů, mají průměr rovný metr a vedou 6 až 10 metrů pod zemí. První budova VCHV, jejíž schéma s řezem a popisem základních částí vidíme na obrázku 4.4, je určena pro okruh TVD navázaný na HVB I, tedy první a druhý blok elektrárny. Druhá budova pak pro HVB II, tj. třetí a čtvrtý blok. Objekty jsou situovány v blízkosti Ittersonů, jejichž funkce byla i po realizaci projektů VCHV zachována. [22]

Už tedy víme, že v JE Dukovany se nachází dvě budovy VCHV. Obě jsou takřka totožné a každá z nich se skládá ze 3 divizí, každé po 2 buňkách, přičemž každá buňka má svůj ventilátor (na obrázku 4.6) o délce lopatek 4 metry poháněný elektromotorem, chladicí výplň (tu lze vidět na obrázku 4.9 pod systémem rozstřiku teplé vody), eliminátory driftu a další nezbytné součásti. Divize náleží jednotlivě k příslušné větvi TVD. K bližšímu popisu základních technických parametrů nám slouží tzv. datasheet, tedy něco jako katalogový list v případě sériových součástí a strojů.

Tabulka 4.1: Technický datasheet jedné divize objektu VCHV [22]

Návrhové parametry

Hydraulické zatížení	m ³ /h	3 920
Maximální průtok	kg/s	1 088
Teplota vody vstupní	°C	42,60
Teplota vody výstupní	°C	23,20
Chladicí pásmo	°C ~ °C	19,40
Teplota suchého teploměru	°C	15,00
Teplota mokrého teploměru	°C	11,88
Přiblížení	°C	11,32
Relativní vlhkost	°C	70,00
Barometrický tlak	kPa	99,00

Technická data

Množství	-	1	
Typ chladicí věže	-	Ventilátorová	
Počet buněk	-	2	
Dodavatel	-	REKO Praha	
Rozměry jedné buňky (osově)	délka	m	13,00
	šířka	m	13,00
Celková výška chladicí věže	m	15,66	
Hloubka bazénu ochlazené vody	m	2,55	
Celkový objem bazénu	m ³	811,00	
Výška čerpání chladicí vody	m	8,30	
Příkon motoru ventilátoru (± 5 % tolerance)	Jedna buňka	kW	125
	Celkem	kW	250

Chladicí výplň

Typ	-	REKO 20
Výrobce	-	Brentwood
Síla před tvářením	mm	0,4
Materiál	-	PVC
Teplota výměnná plocha	m ² /m ³	144

Eliminátory

Typ	-	AOK 140
Výrobce	-	KOPOS
Materiál	-	PVC
Maximální úlet	%	0,01

Rozstřikovací trysky

Typ	-	REKO 01
Výrobce	-	Palba
Průměr trysky	mm	28
Materiál	-	LITEN

Ventilátor

Typ	-	WO7920-5-(1HS)
Výrobce	-	Wentech
Průměr	mm	7 920
Otáčky	ot/min	180
Materiál lopatek	-	FRP

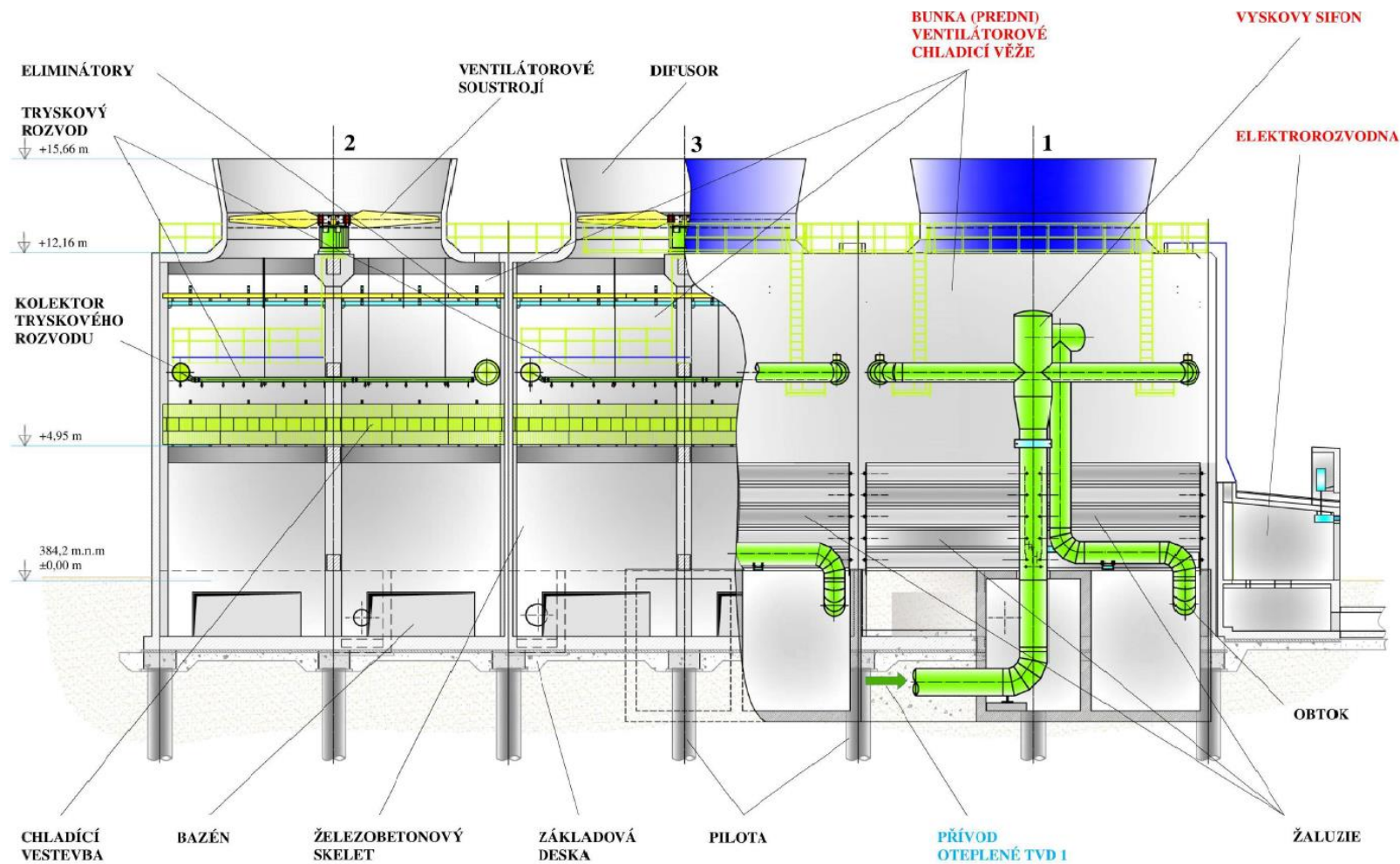
Motor

Typ	-	PMH 125 – 180D
Výrobce	-	VUES
Mechanický výkon	kW	125/16
Otáčky	ot/min	180/90
Napětí	V	400
Kmitočet	Hz	50

Konstrukční materiály

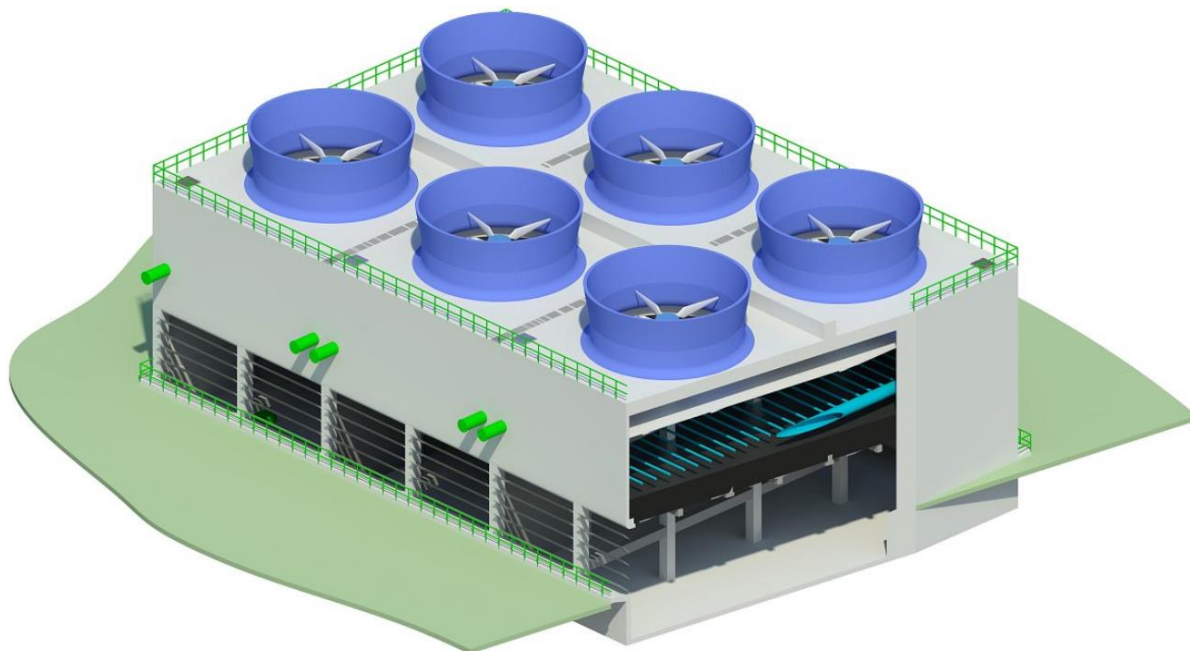
Základy a nádrž ochlazené vody	Monolitický ŽB
Stěny, strop a difuzory	Monolitický ŽB
Nosné trámy a překlady	Monolitický ŽB
Nosný rošt chladicí výplně	1.4404
Nosný rošt rozvodu vody	1.1301
Nosný rošt eliminátorů	1.4301
Přívodní potrubí	S 235 JR
Distribuční potrubí	PVC
Revizní lávky	S 235 JR
Rošty revizních lávek	FRP
Zábradlí	S 235 JR
Žaluzie	S 235 JR

Horní část každé buňky věže je zakončena 3,5 m vysokým difuzorem (na obrázku 4.7) navrženým s tlakovou diferencí 9,6 Pa. Další důležitou, zatím nezmíněnou, součástí objektů VCHV je výškový sifon. Jeho základním úkolem je kromě přívodu oteplené TVD do objektu věže také udržování minimální hladiny TVD v HVB při výpadku čerpadel. Tento sifon vidíme společně s potrubím bočního obtoku a žaluziemi na obrázku 4.8. Žaluzie jsou umístěny po celé délce budovy VCHV a slouží k regulaci vstupujícího vzduchu. [13]

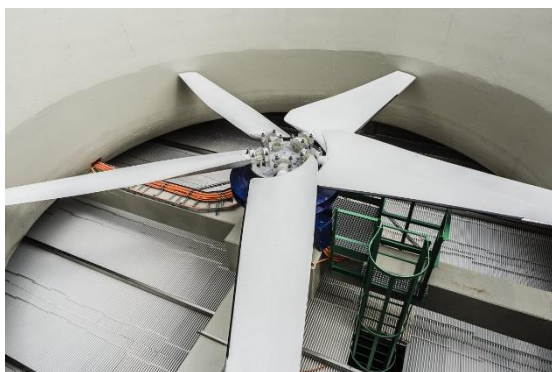


Obrázek 4.4: Popis součástí jednoho z objektů VCHV [13]

4.3.1 Fotodokumentace



Obrázek 4.5: Vizualizace celé budovy VCHV [28]



Obrázek 4.6: Ventilátorové soustrojí [28]



Obrázek 4.7: Difuzor [28]



Obrázek 4.8: Výškový sifon
+ žaluzie [28]



Obrázek 4.9: Rozstřík vody
+ chladicí výplň [28]

4.3.2 Provozní režimy VCHV JE Dukovany

Množství tepla, které je nutno předávat do atmosféry se během provozu hlavního výrobního bloku mění, je tedy nutné provozovat ventilátorové věže v několika režimech. Zde využíváme výhodu lepší regulovatelnosti věží s nuceným tahem, oproti těm s tahem přirozeným. Jaderná elektrárna Dukovany rozlišuje celkem čtyři možné režimy VCHV, přičemž v naprostě majoritní části provozních hodin je aktivní tzv. nechladicí neboli obtokový režim. [29]

❖ Nechladicí režim:

- Realizován použitím obtoku chladicích systémů buněk. Voda natéká z výškového sifonu rovnou do sběrných bazénů a z nich přes odtokový objekt spojovacím potrubím do CČS.
- Aktivní, je-li teplota technické vody důležité (t_{TVD}) na vstupu do HVB nižší než 28 °C.
- Ventilátory nejsou v provozu.
- Žaluzie jsou buď uzavřené nebo otevřené, to záleží na konkrétní teplotě vzduchu.

❖ Malý chladicí režim:

- Realizován použitím chladicích systémů buněk. Voda natéká z výškového sifonu do tryskového rozvodu a je rozprašována na chladicí vestavbu VCHV.
- Aktivován je automaticky, když t_{TVD} na vstupu do HVB překročí 28 °C. Vypíná se po podkročení 23 °C.
- Používá se rovněž při odstavování reaktorového bloku nebo dlouhodobém odvodu tepla po případné havárii.
- Ventilátory jsou provozovány v pomaloběžném režimu (příkon 16 kW).
- Žaluzie jsou otevřené.

❖ Velký chladicí režim:

- Realizace použitím chladicích systémů buněk, stejně jako u malého chladicího režimu.
- Aktivován automaticky, když t_{TVD} na vstupu do HVB překročí 30 °C.
- Ventilátory jsou provozovány v rychloběžném režimu (příkon 125 kW).
- Žaluzie jsou otevřené.

❖ Zimní režim:

- Realizace použitím obtoku stejně jako u nechladicího režimu.
- Ventilátory jsou v provozu v reverzním režimu. Spouštěny jsou buď ručně obsluhou při tvorbě námrazy na chladicí vestavbě nebo automaticky při teplotě venkovního vzduchu $t_s = -33$ °C (odstavují se po dosažení $t_s = -31$ °C).
- Žaluzie jsou uzavřené. [13]

5 Výpočetní model

Cílem této kapitoly je zkonstruovat postup, výpočetní model, pomocí něž se uživatel po zadání sady vstupních dat, reálných provozních parametrů, dobere přes funkční chladicí výkon ke konkrétní hodnotě teploty ochlazené vody. Hraniční hodnoty jsou převzaty z požadavků provozovatele na funkci objektu a garancí dodavatele.

K potřebám vypracování této diplomové práce byly společností ČEZ, a.s. mimo jiné dodány charakteristiky pro několik konkrétních pracovních bodů a výsledky garančních měření. Dle těchto podkladů bude výpočetní model validován.

Výpočet bude proveden pro jednu buňku VCHV. Jednotlivé buňky v JE Dukovany jsou totožné, model lze tedy jednoduše rozšířit, a to jak na divizi (dvě buňky), tak na celý objekt (šest buněk).

Z hlediska funkčnosti věže považujeme za adekvátní a uspokojivý výsledek stav, kdy teplota TVD vstupující do HVB nepřesáhne kritickou hodnotu 33 °C. Okamžitá hodnota teploty ochlazené vody $t_{w,2}$, která je výstupem této práce, však ještě není konečnou hodnocenou teplotou. Ochlazená voda stéká do bazénu chladicí vody pod věží, kde se mísí s vodou ochlazenou dříve a teprve odtud putuje tato směs přes odtokový objekt do HVB. [23]

5.1 Vstupní data

Vstupními daty pro výpočet jsou podnebné podmínky, konkrétně teplota okolního vzduchu změřená tradičně suchým teploměrem a relativní vlhkost v procentech. Dále pak objemový průtok chladicí vody, za jehož nominální stav považujeme hodnotu 1 920 m³ hodinově, což odpovídá polovině maximálního chodu čerpadel jedné divize TVD² (polovině, protože výpočet provádíme pro jednu buňku VCHV, přičemž divizi náleží buňky dvě). Druhý, nenominální objemový průtok, k němuž byly dodány potřebné podklady a s nímž má být nominální stav porovnán, je roven 1 200 m³/h. Vstupními parametry jsou rovněž teplota ohřáté vody přicházející do věže z HVB a aktivní režim ventilátoru. [22]

Tabulka 5.1: Vstupní data modelu

Označení	Uvažované hodnoty	Jednotka	Popis
$t_{s,1}$	0 až 47	°C	Teplota okolního vzduchu – suchý teploměr
φ_1	20 až 80	%	Relativní vlhkost okolního vzduchu
n	nízké/vysoké*	-	Otáčky ventilátoru
$\dot{V}_{w,1}$	1 200/1 920	m ³ /h	Hydraulické zatížení
$t_{w,1}$	10 až 60	°C	Vstupní teplota chladicí vody

* viz podkapitola [5.3 Ventilátor](#)

² Dle datasheetu (viz tabulka 4.1) je skutečné nominální hydraulické zatížení jedné divize 3 920 m³/h, polovina by tedy odpovídala 1 960 m³/h, nikoliv 1 920 m³/h, všechny další kontrolní podklady však uvádí právě hodnotu 1 920 m³/h. Jedná se buď o přepis nebo o zohlednění ztrát. Vzniklý rozdíl každopádně není významný.

Ve výpočetním postupu v rámci textové formy této práce budeme pro ukázkou uvažovat nominální stav okolních podmínek a vstupních parametrů, tj. $t_{s,1} = 15 \text{ °C}$, $\varphi_1 = 70 \%$, vysoké otáčky ventilátoru, nominální hydraulické zatížení a $t_{w,1} = 48 \text{ °C}$. Model však bude simultánně v obecné podobě přepisován do skriptu v softwaru EES (Engineering Equation Solver). Ze vzniklého skriptu bude vygenerována aplikace, v níž může uživatel vstupní parametry v mezích uvažovaných hodnot (dle tabulky 5.1) měnit. Tato aplikace je elektronickou přílohou diplomové práce.

5.2 Okolní vzduch

Prvním zásadním parametrem, který budeme při výpočtu hojně využívat, je tlak okolního vzduchu. Pro výpočet použijeme vztah zohledňující vliv teploty okolního vzduchu, kterou máme zadanou. Dále budeme potřebovat znát ještě nominální atmosférický tlak (fyzikální konstanta) a nadmořskou výšku, v níž se objekt nachází. Ta je dle dokumentace rovna 384 m n. m.

$$p = p_{\text{atm}} * \left(1 - \frac{0,0065 * h}{t_{s,1} + 273,15 + 0,0065 * h}\right)^{5,257} \quad [\text{kPa}] \quad (5.1)$$

$$p = 101,325 * \left(1 - \frac{0,0065 * 384}{15 + 273,15 + 0,0065 * 384}\right)^{5,257} = 96,83 \text{ kPa}$$

Nyní, když známe tlak, teplotu a relativní vlhkost, můžeme s využitím tabulek dohledat další parametry vzduchu vstupujícího do věže. Konkrétně budeme zjišťovat hustotu, absolutní vlhkost, měrnou tepelnou kapacitu, entalpii a teplotu mokrého teploměru.

$$\rho_v = f(t_{s,1}, \varphi_1, p) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (5.2)$$

$$\rho_v = f(15 \text{ °C}, 70 \%, 96,83 \text{ kPa}) = 1,156 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$x_1 = f(t_{s,1}, \varphi_1, p) \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \quad (5.3)$$

$$x_1 = f(15 \text{ °C}, 70 \%, 96,83 \text{ kPa}) = 7,764 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

$$c_{pv} = f(t_{s,1}, \varphi_1, p) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right] \quad (5.4)$$

$$c_{pv} = f(15 \text{ °C}, 70 \%, 96,83 \text{ kPa}) = 1,021 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}$$

$$i_{v,1} = f(t_{s,1}, \varphi_1, p) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (5.5)$$

$$i_{v,1} = f(15 \text{ °C}, 70 \%, 96,83 \text{ kPa}) = 34,73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$t_{mt,1} = f(t_{s,1}, \varphi_1, p) \text{ [°C]} \quad (5.6)$$

$$t_{mt,1} = f(15 \text{ °C}, 70 \%, 96,83 \text{ kPa}) = 11,86 \text{ °C}$$

5.3 Ventilátor

Jedním z určujících prvků každé chladicí věže s nuceným tahem jsou její ventilátorová soustrojí. Takové soustrojí se skládá ze samotného ventilátoru a jeho pohonu. Jedna buňka VCHV dukovanské jaderné elektrárny je konkrétně osazena jedním axiálním pětistým sacím ventilátorem o průměru 8 metrů a elektropohonem ve formě trojfázového asynchronního motoru se schopností fungovat ve dvou pracovních režimech – rychloběžném a pomaluběžném. Tyto režimy si pro potřeby výpočtů v rámci této podkapitoly označme dolními indexy tak, jak je to uvedeno v tabulce 5.2.

Mezi charakteristické technické parametry ventilátorového soustrojí patří:

- ❖ Příkon motoru P_p ve wattch.
- ❖ Otáčky n , které uvádíme minutově a jsou totožné pro motor i ventilátor (spojení je přímé).
- ❖ Celková tlaková diference Δp v pascálech. Ta se skládá ze dvou složek, statické Δp_{st} a dynamické Δp_d , přičemž statickou musíme nejprve ponížít o ztrátu způsobenou difuzorem Δp_{dz} . V našem případě pak pro rychloběžný režim platí:

$$\Delta p_{st} = \Delta p_{st,t} - \Delta p_{dz} \text{ [Pa]} \quad (5.7)$$

$$\Delta p_{st} = 160 - 9,6 = 150,4 \text{ Pa}$$

$$\Delta p = \Delta p_{st} + \Delta p_d \text{ [Pa]} \quad (5.8)$$

$$\Delta p = 150,4 + 50,7 = 201,1 \text{ Pa}$$

- ❖ Účinnost η ventilátoru v procentech.
- ❖ Množství vzduchu \dot{V}_v , které protéká věží v kubických metrech za sekundu.

Některé z těchto parametrů lze přímo či nepřímo nalézt v provozním předpisu objektu VCHV JE Dukovany. Tyto vyčtené hodnoty bereme jako vstupní konstanty a jejich souhrn je uveden v tabulce 5.2. Ze všech vlastností nás bude z hlediska výpočtu nejvíce zajímat právě objemový tok vzduchu, jelikož právě ten je jakožto zástupce funkce ventilátoru velice důležitou součástí energetické bilance věže.

Tabulka 5.2: Zadané parametry ventilátorového soustrojí pro různé varianty chodu [22]

Chod	Příkon P_p [W]	Otáčky n [1/min]	Celkové Δp [Pa]	Účinnost η [%]	Objemový průtok vzduchu \dot{V}_v [m ³ /s]
Rychloběžný (A)	125 000	184	201,1	81	470
Pomaluběžný (B)	16 000	92	?	?	?

Po vyjádření objemového průtoku vzduchu z následujícího vztahu pro výpočet vyžadovaného příkonu obecného ventilátoru (5.9) a následném dosazení známých parametrů vidíme, že dostaneme vyšší hodnotu, než jaká je uvedena v provozním předpisu stroje.

$$P_p = \frac{\dot{V}_v * \Delta p}{\eta} \quad [W] \quad (5.9)$$

$$\dot{V}_{v,t,A} = \frac{P_{p,A} * \eta_A}{\Delta p_A} = \frac{125\,000 * 0,81}{201,1} = 503,48 \frac{m^3}{s}$$

Porovnáme-li hodnoty s experimentem, zjistíme, že během garančního měření byl skutečný objemový tok vzduchu věží při devadesátiprocentním výkonu ventilátoru okolo 410 m³/s, což při přepočítání na plný rychloběžný chod ventilátoru vychází na zhruba 456 m³/s. Z tohoto lze usoudit, že tabulková hodnota z předpisu bude bližší realitě a považujeme ji za správnou. Vyjádříme tedy vzniklý úbytek vzdušného výkonu oproti výpočtu procentuálně a považujeme jej za ztrátu.

$$Z_v = \left(1 - \frac{\dot{V}_{v,A}}{\dot{V}_{v,t,A}}\right) * 100 \quad [%] \quad (5.10)$$

$$Z_v = \left(1 - \frac{470}{503,48}\right) * 100 = 6,65 \quad \%$$

V tabulce 5.2 vidíme, že pro pomaluběžný režim nejsou uvedeny všechny parametry, proto nyní ty chybějící ze známých vztahů (rovnice 5.11, 5.12 a 5.13) z oblasti vzduchotechniky dopočítáme. [30]

$$\Delta p_B = \Delta p_A * \left(\frac{n_B}{n_A}\right)^2 \quad [Pa] \quad (5.11)$$

$$\Delta p_B = 201,1 * \left(\frac{92}{184}\right)^2 = 50,275 \quad Pa$$

$$\dot{V}_{v,B} = \dot{V}_{v,t,A} * \frac{n_B}{n_A} * \left(1 - \frac{Z_v}{100}\right) \left[\frac{m^3}{s}\right] \quad (5.12)$$

$$\dot{V}_{v,B} = 503,48 * \frac{92}{184} * \left(1 - \frac{6,65}{100}\right) = 235 \frac{m^3}{s}$$

$$\eta_B = \frac{\dot{V}_{v,B} * P_{p,B}}{\Delta p_B} \quad [%] \quad (5.13)$$

$$\eta_B = \frac{235 * 16\,000}{50,275} = 74,79 \quad \%$$

Tabulka 5.3: Doplnění dopočítaných dat do tabulky 5.2

Chod	Příkon P _p [W]	Otáčky n [1/min]	Celkové Δp [Pa]	Účinnost η [%]	Objemový průtok vzduchu \dot{V}_v [m ³ /s]
Rychloběžný	125 000	184	201,100	81,00	470
Pomaluběžný	16 000	92	50,275	74,79	235

Nyní známe objemový průtok vzduchu věží pro oba funkční režimy ventilátoru a můžeme jej při znalosti parametrů vstupujícího vzduchu přepočítat na uchopitelnější hmotnostní tok.

$$\begin{aligned}\dot{m}_v &= \dot{V}_v * \rho_v \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] & (5.14) \\ \dot{m}_{v,A} &= 470 * 1,156 = 543,32 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\ \dot{m}_{v,B} &= 235 * 1,156 = 271,66 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\end{aligned}$$

5.4 Vlastnosti vody

Se vzduchem, jehož vstup jsme si již popsali, se v chladicí věži setkává voda, kterou máme právě za úkol ochladit. Abychom mohli později pokračovat ve výpočtech, musíme si určit i její vlastnosti.

Voda vstupuje do systému přírodním potrubím z HVB a přes výškový sifon putuje do rozstřikovacích trysek, jimiž je rovnoměrně distribuována na horní plochu chladicí výplně. Ze zadání známe její vstupní teplotu a objemový průtok. Díky těmto parametrům můžeme za pomoci známých vztahů a tabulek určit několik dalších důležitých vlastností.

$$\begin{aligned}\rho_w &= f(t_{w,1}, p) \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] & (5.15) \\ \rho_w &= f(48 \text{ }^\circ\text{C}, 96,83 \text{ kPa}) = 988,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}c_{pw} &= f(t_{w,1}, p) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} \right] & (5.16) \\ c_{pw} &= f(48 \text{ }^\circ\text{C}, 96,83 \text{ kPa}) = 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}l_w &= f(t_{w,1}) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] & (5.17) \\ l_w &= f(48 \text{ }^\circ\text{C}) = 2\,387 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\end{aligned}$$

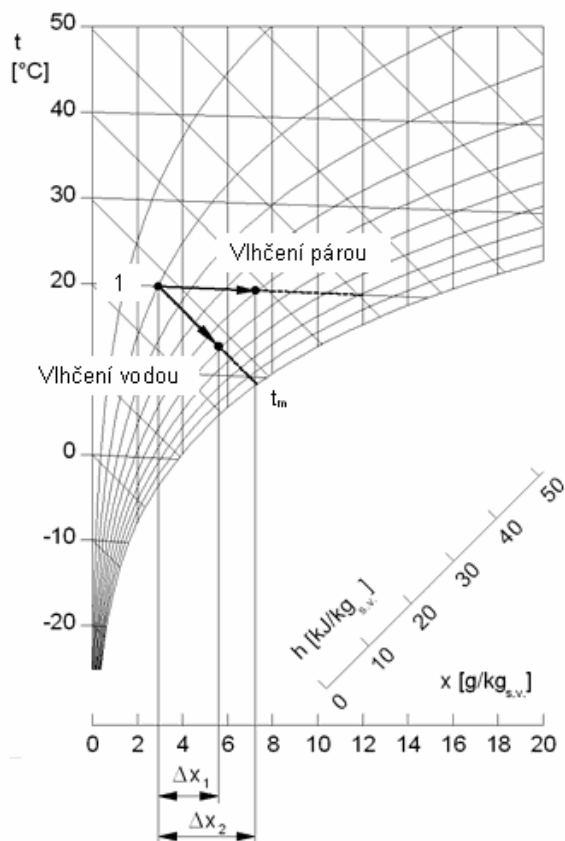
$$\begin{aligned}i_{w,1} &= f(t_{w,1}, p) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] & (5.18) \\ i_{w,1} &= f(48 \text{ }^\circ\text{C}, 96,83 \text{ kPa}) = 201 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\end{aligned}$$

$$\dot{m}_{w,1} = \dot{V}_{w,1} * \rho_w \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (5.19)$$

$$\dot{m}_{w,1} = \frac{1\,920}{3\,600} * 988,9 = 527,4 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

5.5 Vlhčení vzduchu

Vzduch, který je do věže z okolí nasáván, má jistou úroveň vlhkosti, která po styku s chlazenou vodou roste. Dochází k takzvanému vlhčení. V rámci úprav vzduchu známe dva typy vlhčení – párou nebo vodou (viz obrázek 5.1). Stavů a úprav vlhkého vzduchu zaznamenáváme do Molliérova diagramu.



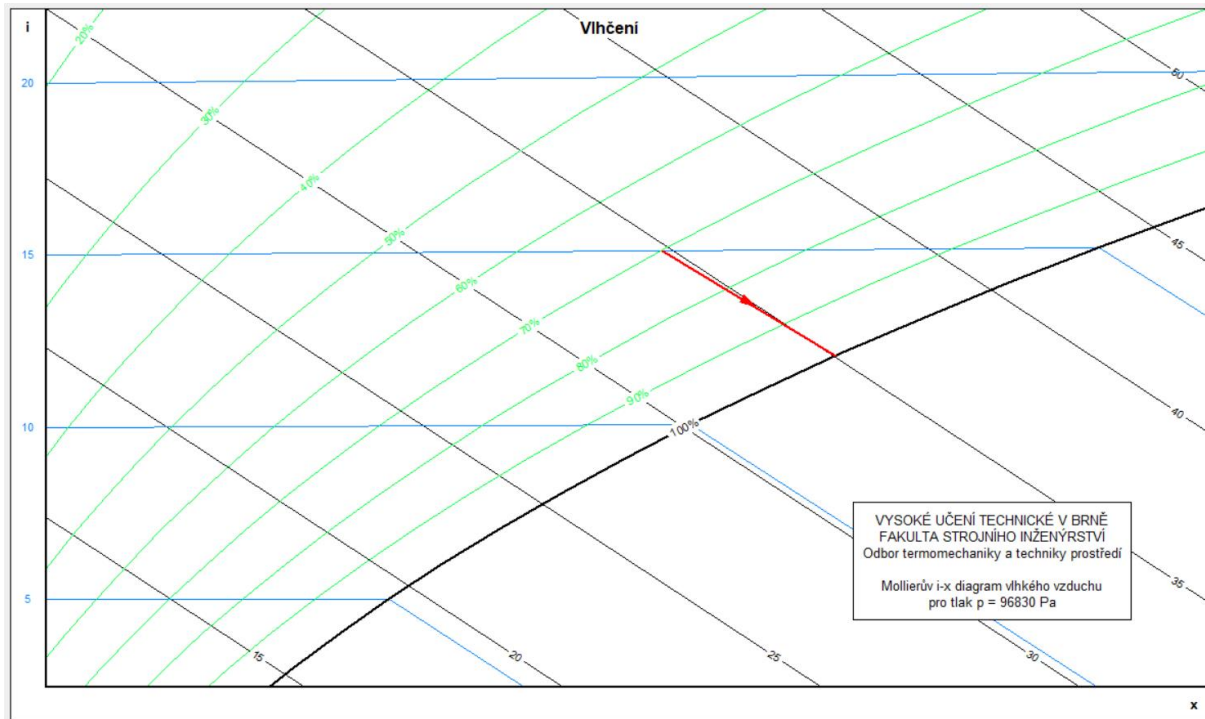
Obrázek 5.1: Oba způsoby vlhčení zakreslené do Molliérova diagramu [31]

Je zřejmé, že v našem případě se bude jednat téměř výhradně o vlhčení vodou, avšak lze předpokládat i podíl páry současně vznikající v chladicí výplni věže. Zaveďme v tomto bodě pro potřeby výpočetního modelu dva předpoklady.

- a) Vzduch je vlhčen výhradně vodou.
- b) Relativní vlhkost vzduchu na výstupu z věže je vždy rovna 100 %.

Z předpokladu a) vyplývá, že hovoříme o adiabatickém ději a předaný tepelný tok na potřeby tohoto procesu je nulový.

Předpoklad b) byl využit i autorem garančního měření, v němž je přímo uvedena teplota výstupního vzduchu jako $t_{s,2} = t_{mt,2}$, tj. teplota suchého teploměru odpovídá teplotě mokrého teploměru. Tato situace nastává právě ve chvíli, kdy je vzduch plně nasycen na relativní vlhkost $\varphi_2 = 100\%$.



Obrázek 5.2: Zaznačení našeho případu vlhčení, tj. vlhčíme při známém tlaku vzduch o teplotě 15 °C a relativní vlhkosti 70 % vodou o teplotě 48 °C na relativní vlhkost 100 % ³

5.6 Přenos tepla

Jak bylo uvedeno v [kapitole 3](#), sdílení tepla v chladicích věžích probíhá odpařováním (příjemcem \dot{Q} je část cirkulující vody) a konvekcí a sáláním (příjemcem \dot{Q} je chladicí vzduch). Podíl těchto principů na celkovém předaném tepelném toku je proměnlivý, například v letním období se až devadesát procentech veškerého chladicího výkonu přeneše odparem. V zimě naopak roste podíl tepla převzatého vzduchem, běžně ke třiceti procentům, výjimečně až k polovině celkového \dot{Q} .

Celkový přenášený tepelný tok spočteme jednoduše jako součet tepelných toků z jednotlivých uvedených principů. K tomu, abychom tyto dílčí hodnoty získali, však budeme kromě již známých vlastností vody a vzduchu potřebovat ještě jednu informaci, a to teplotu vzduchu na výstupu z věže. Tato teplota, respektive vlastní ohřev vzduchu, závisí na všech vstupních faktorech a v extrémních případech se může stát, že se vzduch dokonce ochladí a působí tedy v kontextu chladicí věže kontraproduktivně.

5.6.1 Ohřev vzduchu

Stanovení výstupní teploty vzduchu $t_{s,2}$ je v podstatě velmi podobný úkol jako stanovení $t_{w,2}$ a v praxi se při hodnocení a výpočtu charakteristik chladicích věží tento parametr určuje experimentálně měřením při definovaných okolních podmínkách. V rámci této práce není možné na budovách VCHV JE Dukovany žádné dodatečné zkoušky provést, použijeme tedy

³ Obrázek je screenshotem z aplikace „Vlhký vzduch 3.0“. Ta je volně dostupná na webových stránkách Energetického ústavu FSI VUT: <https://eu.fme.vutbr.cz/pro-studenty-podpora-vyuky-termomechanika>. Autorem aplikace je pan Ing. Pavel Snášel.

všechna data, která jsou dostupná, ta proložíme vhodnými křivkami a získáme vzorec pro výpočet $t_{s,2}$ zohledňující zadané a známé vstupní faktory. Jakmile bude hodnota teploty $t_{s,2}$ známá, použijeme ještě ekvivalent vztahu (5.3) pro stanovení absolutní vlhkosti vzduchu vystupujícího ze systému.

Předem je nutno podotknout, že níže použité koeficienty jsou platné pouze pro případ vysokých otáček ventilátoru a nominálního hydraulického zatížení věže. V jiných režimech se tyto hodnoty mění (dle tabulky 5.4), což je zohledněno v simultánně psaném skriptu, který obsahuje všechny potenciální situace.

$$t_{s,2} = t_{s,1} + 3,976 * (t_{w,1} * (1 - a) - b) - 2,3379 * (x_2 - x_1) [^{\circ}\text{C}] \quad (5.20)$$

$$a = c_a * t_{s,1}^2 + d_a * t_{s,1} + e_a [-] \quad (5.21)$$

$$b = c_b * t_{s,1}^2 + d_b * t_{s,1} + e_b [-] \quad (5.22)$$

$$c_a = -10^{-6} * \varphi_1 + 7 * 10^{-6} [-] \quad (5.23)$$

$$d_a = 10^{-5} * \varphi_1 - 1,4 * 10^{-3} [-] \quad (5.24)$$

$$e_a = -3 * 10^{-5} * \varphi_1 + 3,006 * 10^{-1} [-] \quad (5.25)$$

$$c_b = 2 * 10^{-4} * \varphi_1 - 1,2 * 10^{-3} [-] \quad (5.26)$$

$$d_b = -8 * 10^{-4} * \varphi_1 + 2,307 * 10^{-1} [-] \quad (5.27)$$

$$e_b = 1,3 * 10^{-2} * \varphi_1 + 4,7476 [-] \quad (5.28)$$

Postupným reverzním dosazováním námi uvažovaných vstupních parametrů do rovnic (5.23) až (5.28) získáme koeficienty $c_a, d_a, e_a, c_b, d_b, e_b$, ty následně využijeme ve vztazích (5.21) a (5.22). Nakonec vše aplikujeme do vzorce (5.20), a to včetně již známé hodnoty x_1 .

$$c_a = -10^{-6} * 70 + 7 * 10^{-6} = 6,3 * 10^{-5}$$

$$d_a = 10^{-5} * 70 - 1,4 * 10^{-3} = -7 * 10^{-4}$$

$$e_a = -3 * 10^{-5} * 70 + 3,006 * 10^{-1} = 2,985 * 10^{-1}$$

$$c_b = 2 * 10^{-4} * 70 - 1,2 * 10^{-3} = 1,28 * 10^{-2}$$

$$d_b = -8 * 10^{-4} * 70 + 2,307 * 10^{-1} = 1,747 * 10^{-1}$$

$$e_b = 1,3 * 10^{-2} * 70 + 4,7476 = 5,658$$

$$a = 6,3 * 10^{-5} * 15^2 - 7 * 10^{-4} * 15 + 2,985 * 10^{-1} = 0,2738$$

$$b = 1,28 * 10^{-2} * 15^2 + 1,747 * 10^{-1} * 15 + 5,658 = 11,16$$

$$t_{s,2} = 15 + 3,976 * (48 * (1 - 0,2738) - 11,16) - 2,3379 * (x_2 - 7,764)$$

$$t_{s,2} = 127,37 - 2,3379 * x_2 \quad (5.29)$$

$$x_2 = f(t_{s,2}, \varphi_1, p) \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \quad (5.30)$$

Nyní jsme v situaci, kdy máme dvě rovnice (5.29) a (5.30) o dvou neznámých ($t_{s,2}$ a x_2). Tuto soustavu vyřešíme (například využitím výpočetního softwaru) a dostáváme kýžené výsledky.

$$x_2 = 39,32 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

$$t_{s,2} = 35,43 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Doplňme ještě pro úplnost tabulky koeficientů a forem vzorce (5.20) pro všechny varianty nastavení věže. Hodnoty byly získány proložení dostupných dat za použití tabulkového procesoru MS Excel.

Tabulka 5.4: Souhrn koeficientů pro různé režimy věže k dosazení do rovnic (5.23) až (5.28)

	$\dot{V}_{w,1} = 1\,920 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$				$\dot{V}_{w,1} = 1\,200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$			
	n – vysoké		n – nízké		n – vysoké		n – nízké	
	LK*	AK**	LK	AK	LK	AK	LK	AK
c_a	-1E-6	7E-6	1E-6	-1E-4	-5E-7	0	-8E-7	-3E-5
d_a	1E-5	-1,4E-3	-8E-5	4,6E-3	-1E-5	-1,8E-3	-5E-6	-4E-4
e_a	-3E-5	0,3006	3E-4	0,4385	-3E-4	0,2259	3E-4	0,3355
c_b	2E-4	-1,2E-3	-5E-5	8,9E-3	1E-4	6E-4	1E-4	1,3E-3
d_b	-8E-4	0,2307	4,5E-3	-0,1736	1,1E-3	0,2744	-2E-4	0,1577
e_b	1,3E-2	4,7476	-2,2E-3	6,2911	3,29E-2	3,1022	2,9E-3	5,3374

* LK = lineární koeficient, tj. např.: $c_a = \text{LK} * \varphi_1 + \text{AK}$

** AK = absolutní koeficient, tj. např.: $c_a = \text{LK} * \varphi_1 + \text{AK}$

Tabulka 5.5: Verze vzorce (5.20) pro různé varianty nastavení věže

$\dot{V}_{w,1} = 1\,920 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	n – vysoké	$t_{s,2} = t_{s,1} + 3,976 * (t_{w,1} * (1 - a) - b) - 2,3379 * (x_2 - x_1)$
	n – nízké	$t_{s,2} = t_{s,1} + 7,952 * (t_{w,1} * (1 - a) - b) - 2,3379 * (x_2 - x_1)$
$\dot{V}_{w,1} = 1\,200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	n – vysoké	$t_{s,2} = t_{s,1} + 2,485 * (t_{w,1} * (1 - a) - b) - 2,3379 * (x_2 - x_1)$
	n – nízké	$t_{s,2} = t_{s,1} + 4,970 * (t_{w,1} * (1 - a) - b) - 2,3379 * (x_2 - x_1)$

5.6.2 Přenos tepla odpařováním

V rámci práce již byla nastíněna důležitá technická veličina, a to měrné skupenské teplo vody l_w , které jsme si stanovili ze vzorce (5.17). Tato hodnota odpovídá tepelnému toku přenesenému při změně skupenství (v našem případě odpaření) jednoho kilogramu vody. Abychom tedy mohli stanovit tepelný tok přenesený odpařováním, musíme zjistit, jaké množství vody se reálně odpařuje. K tomu využijeme poznatky o vzduchu na vstupu a na výstupu z věže a úvahu, že množství odparu odpovídá obohacení průchozího vzduchu vlhkostí.

$$\dot{m}_o = \dot{m}_v * (x_2 - x_1) \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (5.31)$$

$$\dot{m}_o = 543,32 * (39,320 - 7,764) = 17\,147 \frac{\text{g}}{\text{s}} = 17,147 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Výsledný hmotnostní tok odpařující se vody vynásobíme měrným skupenským teplem a získáváme první sčítací část celkového přeneseného tepelného toku.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_o &= \dot{m}_o * l_w \text{ [kW]} \\ \dot{Q}_o &= 17,147 * 2\,387 = 40\,930 \text{ kW} \end{aligned} \quad (5.32)$$

5.6.3 Přenos tepla konvekcí a sáláním

Jedná se o procesy sdílení tepla, které působí takřka vždy společně.

Konvekce, česky též proudění, je z hlediska praxe dost možná nejsložitějším způsobem sdílení tepla. Rozdělujeme ji v základu dle toho, zda při ní dochází nebo nedochází ke změně skupenství. Dále pak může být konvekce buď přirozená nebo nucená. V našem případě se jedná o variantu nuceného proudění vyvolaného ventilátorem beze změny skupenství (odpařování vody je proces řešený zvlášť). [32]

Sálání, jinak také radiace, není nic jiného než elektromagnetické záření o určité vlnové délce šířící se prostorem rychlostí světla. Na rozdíl od konvekce se teplo sáláním přenáší i ve vakuu. Zjistíme-li, kolik energie se zářením mezi dvěma médii/tělesy přenesou, musíme brát do úvahy spoustu aspektů, jejichž dohledatelnost je často velmi náročná, každopádně vzhledem k okolnostem není jejich konkrétní řešení předmětem této práce. [4]

Samotná schopnost média vést teplo těmito dvěma způsoby bývá specifikována součiniteli přestupu tepla, které lze při předpokladu současného působení navzájem sčítat pro konvekci i sálání. Výpočet takového součinitele vychází ze studia podobnostních kritérií a závisí na mnoha faktorech, včetně typu proudění, které rozlišujeme na laminární a turbulentní (případně přechodné). [33]

V případě našich chladicích věží jsou konvekce a sálání dva procesy sdílení tepla, jimiž hnaný vzduch odebírá teplo vodě. Označme tedy tepelný tok indexem dle jeho příjemce a berme přenos tepla konvekcí a sáláním za společný. K výpočtu není v naší situaci potřeba používat výše uvedené teorie, jejichž postupy by byly jak delší, tak náročnější, a navíc by do modelu mohlo být zaneseno více nežádoucích nepřesností. Vzhledem k již nabytým znalostem parametrů vzduchu, který předpokládáme, že je veškerým příjemcem tepla (vyjma již vypočteného odpařování), je nejefektivnějším krokem hodnotu tepelného toku získat z tradiční rovnice tepelné bilance (5.33) právě pro stranu ohřivaného vzduchu.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_v &= \dot{m}_v * c_{pv} * (t_{s,2} - t_{s,1}) \text{ [kW]} & (5.33) \\ \dot{Q}_v &= 543,32 * 1,021 * (35,43 - 15,00) = 11\,333 \text{ kW}\end{aligned}$$

5.7 Celkový tepelný tok – energetická bilance

Nyní, když známe jímače tepelné energie a množství tepla, které si ze systému odnášejí, můžeme součtem těchto hodnot stanovit celkový tepelný tok odebíraný vodě a z něj následně dopočít výslednou teplotu ochlazené vody stékající do sběrného bazénu pod věží.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_w &= \dot{Q}_o + \dot{Q}_v \text{ [kW]} & (5.34) \\ \dot{Q}_w &= 40\,930 + 11\,333 = 52\,263 \text{ kW}\end{aligned}$$

5.8 Teplota ochlazené vody

V závěru výpočtu si ještě musíme dát pozor na to, že skutečně ochlazovaná je pouze voda, která se neodpařila, tedy voda, která systém odtokovým objektem opouští.

$$\begin{aligned}\dot{m}_{w,2} &= \dot{m}_{w,1} - \dot{m}_o \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] & (5.35) \\ \dot{m}_{w,2} &= 527,400 - 17,147 = 510,253 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\end{aligned}$$

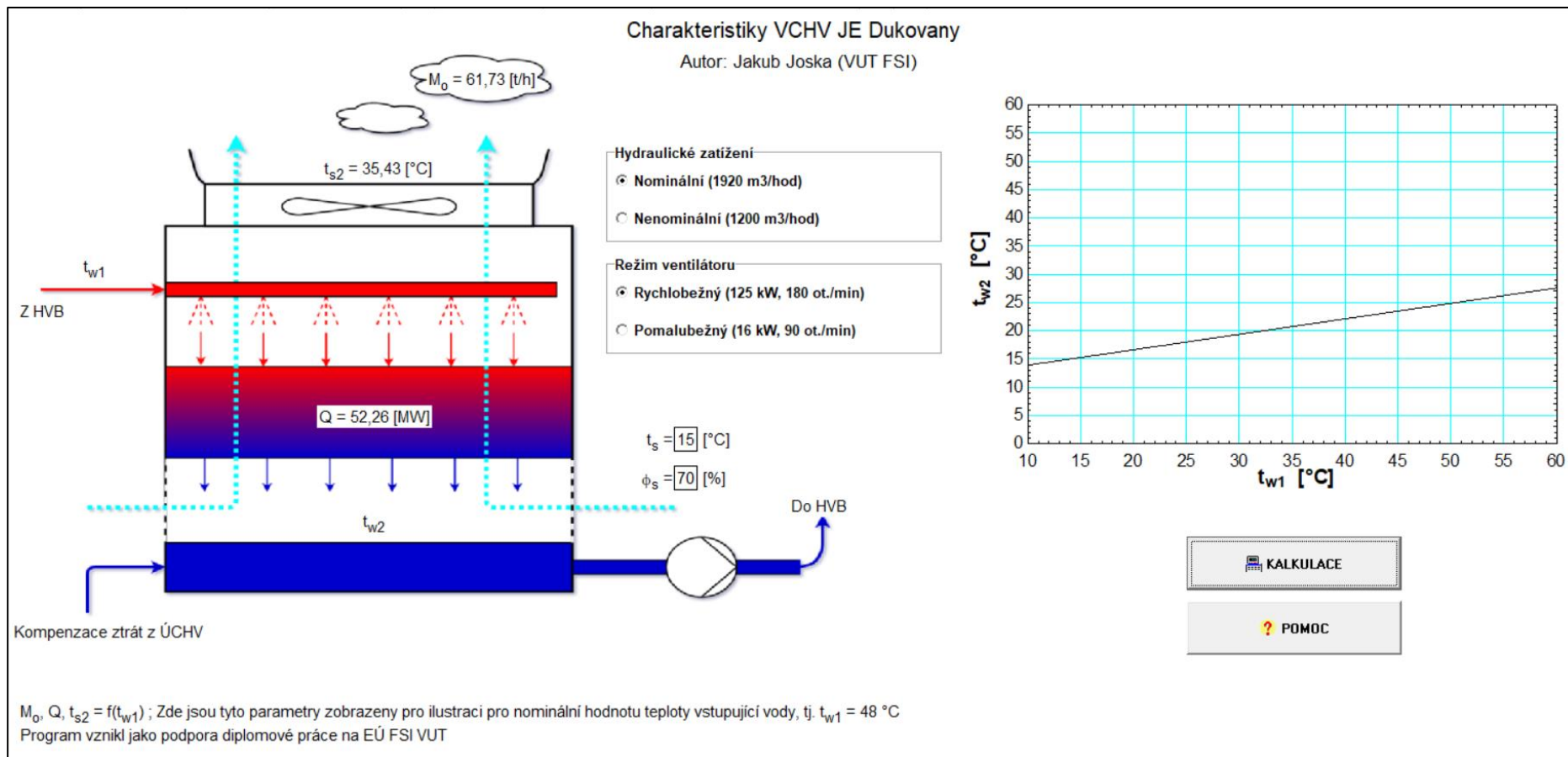
Teplotu ochlazené vody získáme úpravou vzorce (5.36) na (5.37) a dosazením již známých hodnot.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_w &= \dot{m}_{w,2} * c_{pw} * \Delta t_w \text{ [kW]} & (5.36) \\ \dot{Q}_w &= \dot{m}_{w,2} * c_{pw} * (t_{w,1} - t_{w,2}) \\ \dot{Q}_w &= \dot{m}_{w,2} * c_{pw} * t_{w,1} - \dot{m}_{w,2} * c_{pw} * t_{w,2} \\ \dot{m}_{w,2} * c_{pw} * t_{w,2} &= \dot{m}_{w,2} * c_{pw} * t_{w,1} - \dot{Q}_w \\ t_{w,2} &= t_{w,1} - \frac{\dot{Q}_w}{\dot{m}_{w,2} * c_{pw}} \text{ [}^\circ\text{C]} & (5.37) \\ t_{w,2} &= 48 - \frac{52\,263}{510,253 * 4,182} = \underline{23,51} \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Popsaný výpočtový model byl přepracován do skriptu v softwaru EES (Engineering Equation Solver). Tento skript je základem vyexportované aplikace, která je elektronickou přílohou práce. Popis této aplikace je obsahem následující [kapitoly 6](#).

6 Aplikace „Charakteristiky VCHV JE Dukovany“

Aplikace „Charakteristiky VCHV JE Dukovany“ byla vytvořena za použití softwaru EES (Engineering Equation Solver) a její skript vychází z modelu popsaného v [kapitole 5](#). Design aplikace je zobrazen na obrázku 6.1.

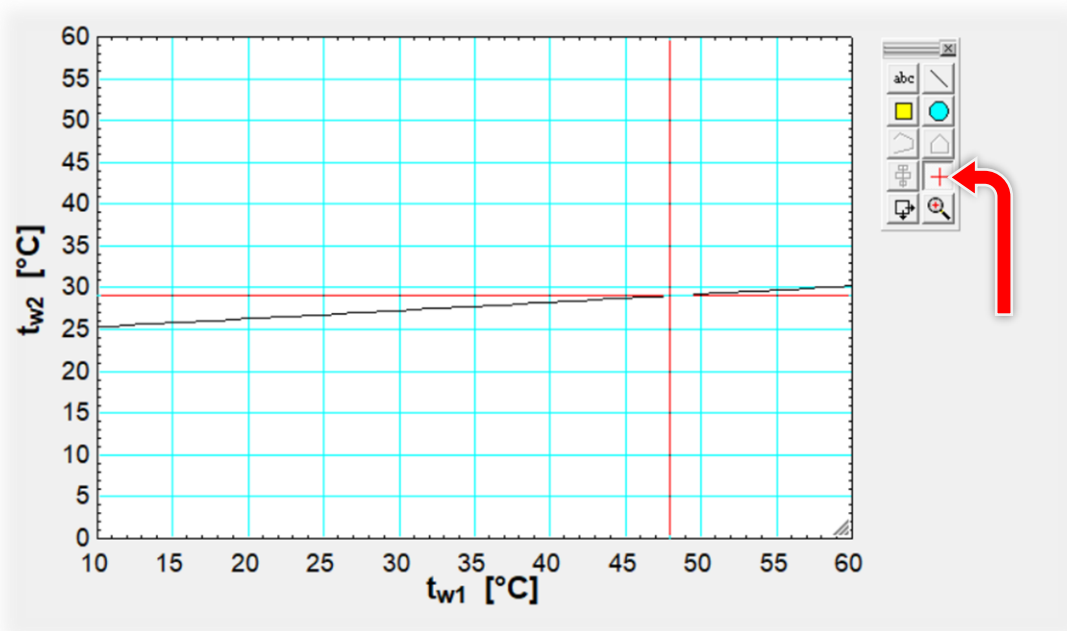


Obrázek 6.1: Náhled aplikace "Charakteristiky VCHV JE Dukovany"

Uživatel do aplikace zadá vstupní data (režim ventilátoru, hydraulické zatížení, teplotu okolního vzduchu a relativní vlhkost okolního vzduchu). Vstupní teplota vody je zadána parametricky v celém uvažovaném rozsahu, tj. od 10 do 60 °C s krokem 1 °C. Po zadání stiskne tlačítko „KALKULACE“ a program vykoná potřebné výpočty.

Výstupem z aplikace je pak graf zobrazující křivku konkrétní funkční závislosti $t_{w,2} = f(t_{w,1})$ pro zadané parametry. V grafice jsou rovněž vypsány hodnoty \dot{m}_o (v aplikaci jako M_O – EES nepodporuje doplňující symbol $\dot{_}$), \dot{Q}_w (v aplikaci uvedeno pouze jako Q – celkový předaný tepelný tok) a $t_{s,2}$ pro vstupní teplotu vody $t_{w,1} = 48$ °C.

Pro lepší orientaci ve vykresleném grafu a k přesnějšímu odečtu konkrétních dat nabízí aplikace možnost otevření zvláštního okna pouze s výsledným grafem, v němž si uživatel zobrazí pohyblivý červený kolmý kříž doplňující obecnou mřížku (viz obrázek 6.2). Do tohoto okna se uživatel dostane přes horní lištu výběrem možností „Windows“ → „Plot windows“. Pohyblivý kříž se zobrazí pomocí tlačítka, na nějž odkazuje červená šipka na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2: Zobrazení vhodné pro lehčí a přesnější odečet konkrétních hodnot $t_{w,2}$

Zpět do hlavního okna programu se uživatel dostane znovu přes horní lištu, tentokrát výběrem možností „Windows“ → „Diagram window“.

Pozor! Při spuštění exe souboru se na některých počítačích může vyskytnout hláška antivirového programu upozorňující na neznámý zdroj aplikace. V takovém případě je třeba z funkce správce počítače spuštění povolit (standardně „Další informace“ → „Přesto spustit“).

Součástí aplikace je pdf soubor s legendou a nápovědou, ten je přístupný po stisknutí tlačítka „POMOC“.

7 Srovnání modelu s dostupnými daty

V rámci této kapitoly zadáme do vytvořené aplikace několik vybraných vstupních stavů. Hodnoty, které z modelu dostaneme, porovnáme nejprve s daty dodanými ve formě výsledků provedených garančních měření, kde lze očekávat lehce významnější rozdíly, jelikož měření neprobíhala zcela ideálně (ventilátor nepracoval přesně v nominálním režimu apod.). Následně získané křivky porovnáme s dostupnou sadou charakteristik předaných k potřebám vypracování této práce jejím zadavatelem, společností ČEZ, a.s.

7.1 Model vs. garanční měření

Na každém z objektů VCHV JE Dukovany byla provedena jedna sada garančních měření. Sada se vždy skládá z deseti jednodinových zkoušek probíhajících kontinuálně za sebou. V tabulce 7.1 je uveden výčet pro nás podstatných dat z jednotlivých měření.

Tabulka 7.1: Výsledky garančních měření na objektech VCHV [22]

Objekt 1										
č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{s,1}$ [°C]	14,77	15,35	15,56	15,49	15,91	15,95	16,05	15,95	16,52	16,72
φ_1 [%]	82,6	80,2	79,6	79,2	76,5	75,2	75,1	75,3	72,5	69,8
n	90 % nominálních vysokých									
$\dot{V}_{w,1}$	1 920 m ³ /h									
$t_{w,1}$ [°C]	47,32	47,33	47,60	47,71	47,81	47,82	47,88	47,88	47,89	47,92
$t_{w,2,e}$ [°C]	26,66	26,78	26,86	26,88	26,92	26,95	26,94	26,96	27,02	27,06
Objekt 2										
č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{s,1}$ [°C]	6,44	7,20	8,50	10,10	12,14	13,70	14,93	15,16	15,28	15,64
φ_1 [%]	86,6	85,4	80,0	74,9	67,5	63,3	58,2	56,8	53,9	53,6
n	88 % nominálních vysokých									
$\dot{V}_{w,1}$	1 920 m ³ /h									
$t_{w,1}$ [°C]	45,70	46,36	46,72	46,81	46,77	47,14	47,48	47,75	47,90	47,98
$t_{w,2,e}$ [°C]	23,70	24,07	24,31	24,78	25,10	25,39	25,71	25,82	25,90	25,84

Nyní zadáme stejná vstupní data do vytvořeného výpočetního modelu a sumarizujeme výsledky z něj získané. Tyto výsledky porovnáme s měřeními a určíme vzniklý rozdíl $\Delta t_{w,2}$. Vzhledem k faktu, že během zkoušek byl regulován vzdušný výkon ventilátoru z klasického nominálního na 90 % (resp. 88 %), můžeme očekávat, že při výpočtu dojdeme k lehce vyššímu chladicímu výkonu, a tedy nižší hodnotě teploty ochlazené vody. Dolní index „e“ označuje výsledek experimentu (tj. garančního měření), „m“ pak náleží modelové hodnotě.

$$\Delta t_{w,2} = t_{w,2,e} - t_{w,2,m} \text{ [°C]} \quad (7.1)$$

$$\Delta t_{w,2,r} = \frac{\Delta t_{w,2}}{t_{w,2,e}} * 100 [\%] \quad (7.2)$$

Tabulka 7.2: Srovnání výsledků garančních měření s výsledky výpočetního modelu**Objekt 1**

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{w,2,e}$ [°C]	26,66	26,78	26,86	26,88	26,92	26,95	26,94	26,96	27,02	27,06
$t_{w,2,m}$ [°C]	24,52	24,71	24,86	24,83	24,95	24,91	24,97	24,93	25,07	25,05
$\Delta t_{w,2}$ [°C]	2,14	2,07	2,00	2,05	1,97	2,04	1,97	2,03	1,95	2,01
$\Delta t_{w,2,r}$ [%]	8,03	7,73	7,45	7,63	7,32	7,57	7,31	7,53	7,22	7,43

Objekt 2

č. měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{w,2,e}$ [°C]	23,70	24,07	24,31	24,78	25,10	25,39	25,71	25,82	25,90	25,84
$t_{w,2,m}$ [°C]	20,89	21,30	21,72	22,19	22,72	23,28	23,65	23,75	23,72	23,86
$\Delta t_{w,2}$ [°C]	2,81	2,77	2,59	2,59	2,38	2,11	2,06	2,07	2,18	1,98
$\Delta t_{w,2,r}$ [%]	11,86	11,51	10,65	10,45	9,48	8,31	8,01	8,02	8,42	7,66

Z tabulky 7.2 vidíme, že se pro výsledky výpočetního modelu skutečně potvrdil předpoklad nižší teploty ochlazené vody. Vzniklá diference se ve všech případech pohybuje v intervalu 7 až 12 % zkoumané hodnoty a za její příčinu lze považovat nižší výkon ventilátorů během provádění garančních měření.

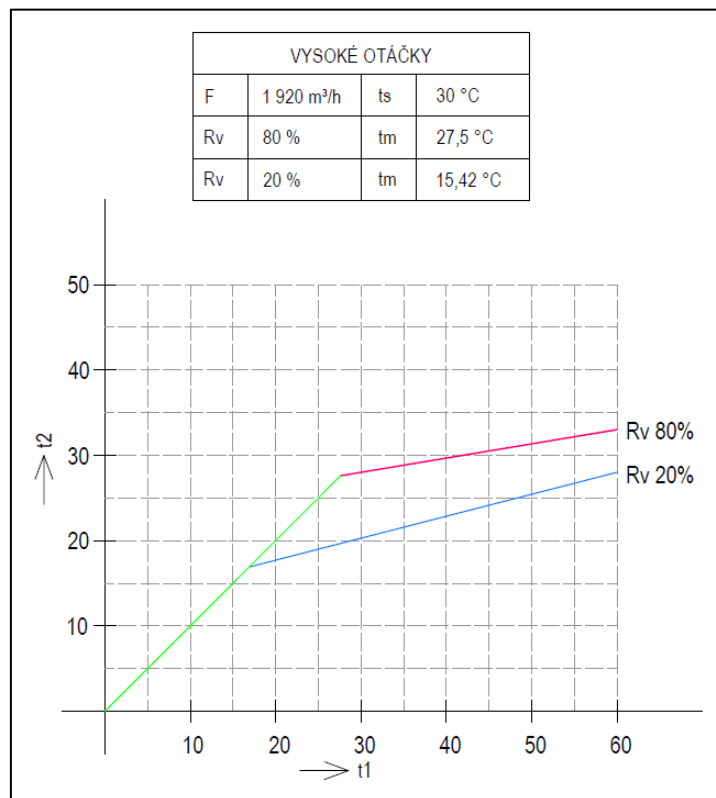
7.2 Model vs. dodané charakteristiky

K další validaci přesnosti a kvality výpočetního modelu nám poslouží charakteristiky dodané zadavatelem práce, společností ČEZ, a.s. Jedná se o sadu grafů, jejichž princip odpovídá výstupu aplikace „Charakteristiky VCHV JE Dukovany“. Setkáme se v nich rovněž s volbou parametrického zadání vstupní teploty ochlazované vody $t_{w,1}$.

Vypracovaných a předaných grafů závislosti $t_{w,2}$ na $t_{w,1}$ je hned několik. Jsou rozděleny do skupin, dle aktivního režimu ventilátoru a hydraulického zatížení věže. Mezi grafy v jednotlivých skupinách je krokový rozdíl v teplotě okolního vzduchu 10 °C (Od 0 do 40 °C). Samotný graf pak obsahuje vždy dvě křivky, přičemž každá odpovídá jedné hraniční hodnotě relativní vlhkosti vstupujícího vzduchu, tj. 20 a 80 %. Příklad jednoho takového grafu vidíme na obrázku 7.1. Autor zde oproti této práci používá odlišné značení příslušných veličin, uvedme proto pro upřesnění tabulku odpovídajících symbolů (tabulka 7.3).

Tabulka 7.3: Výpis značení odpovídajících parametrů

Značení veličiny v rámci DP	Značení veličiny v podkladech
$\dot{V}_{w,1}$	F
φ_1	Rv
$t_{s,1}$	t_s
$t_{mt,1}$	t_m
$t_{w,1}$	t_1
$t_{w,2}$	t_2

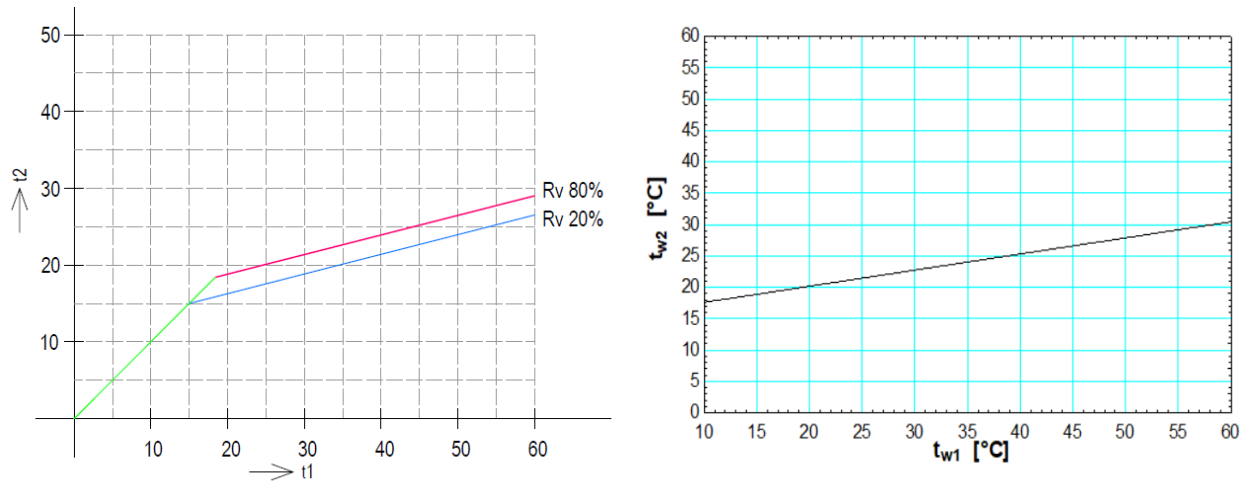


Obrázek 7.1: Příklad dodané charakteristiky [22]

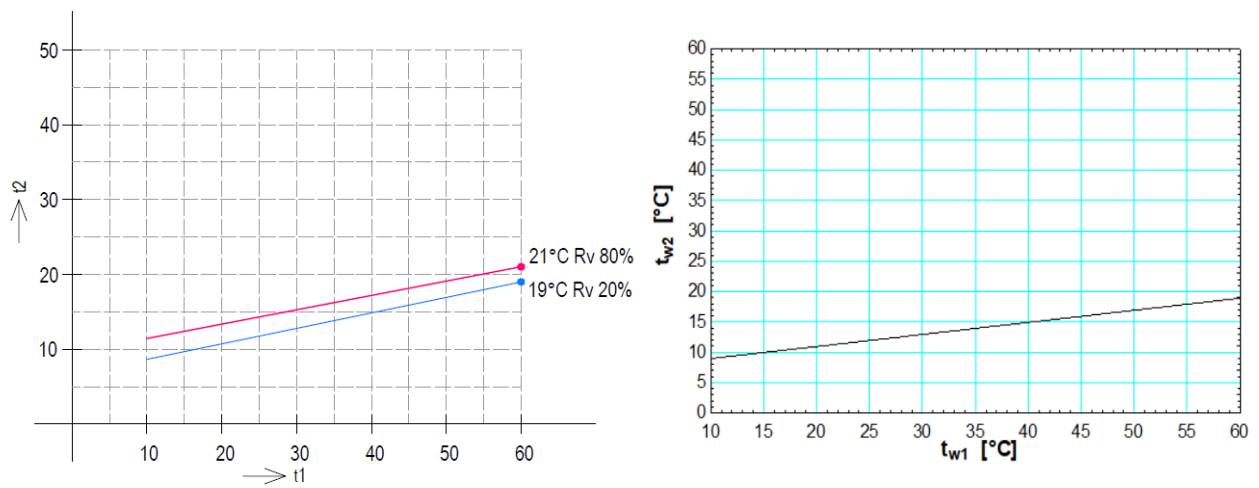
V obrázku 7.1 si na první pohled povšimneme podezřele vyhlížející zlomené zelené úsečky, která zobrazuje rovnost $t_{w,2} = t_{w,1}$. Tato část grafu neodpovídá realitě, budeme-li uvažovat platnost vstupních dat tak, jak jsou uvedeny. Odpovídá totiž úvaze, že ve chvíli, kdy by se dle výpočtů voda v chladicí věži neochladila, ale naopak ohřála, nemá logický smysl věž provozovat. Místo toho je využít tzv. nechladicí režim (viz [podkapitola 4.3.2](#) o provozních režimech VCHV JE Dukovany).

V tomto režimu je voda z výškového sifonu vedena obtokovým potrubím rovnou do odtokového objektu a její teplota na výstupu z věže je tak skutečně takřka rovna teplotě na vstupu (tj. opravdu platí uvažovaná rovnost $t_{w,2} = t_{w,1}$).

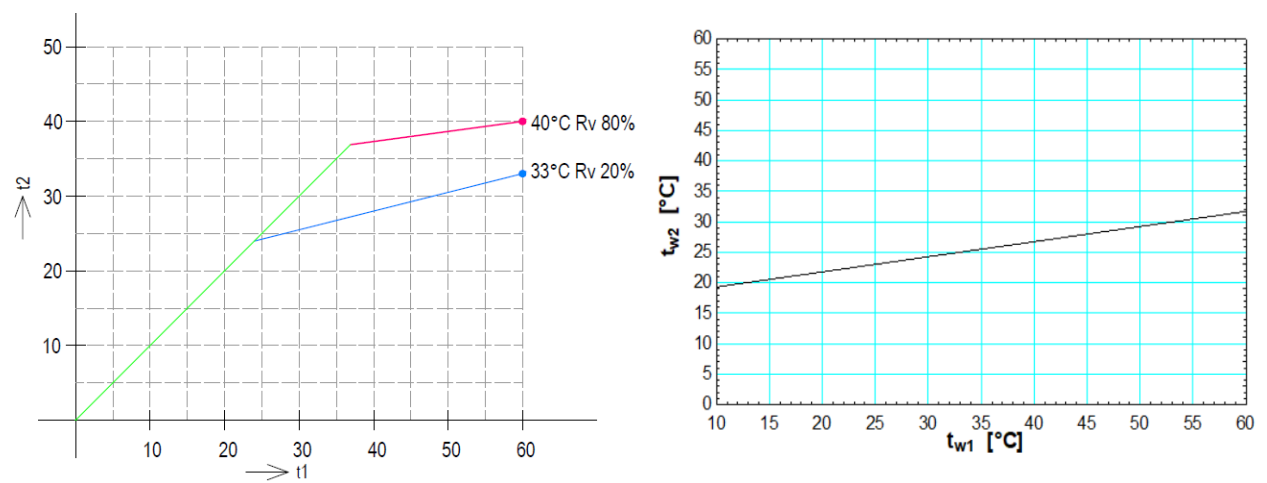
Tato myšlenka je jistě rozumná, avšak výpočetní model se v tomto liší a ctí zadání v celém rozsahu vstupních parametrů. Přesto si pro provozní oblasti, v nichž skutečně má smysl chladicí věž využívat, pojďme výsledky výpočetního modelu s dodanými charakteristikami graficky porovnat. Ke srovnání bude namátkou (ale zároveň tak, aby bylo pokryté co nejširší spektrum variant) vybráno několik sad vstupních parametrů.



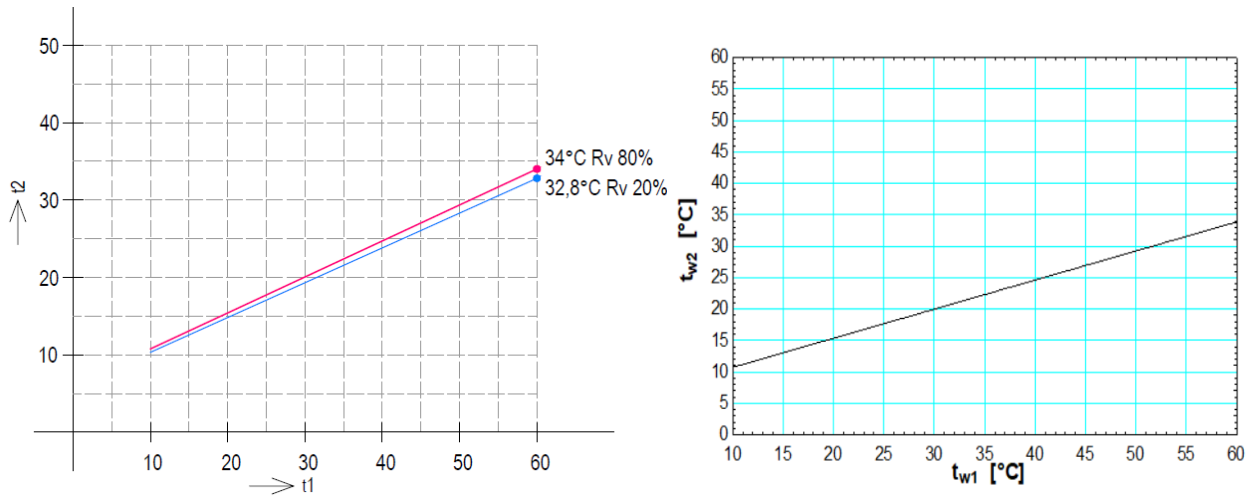
Obrázek 7.2: Vysoké otáčky, $\dot{V}_{w,1} = 1\,920 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $t_{s,1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = 80 \%$



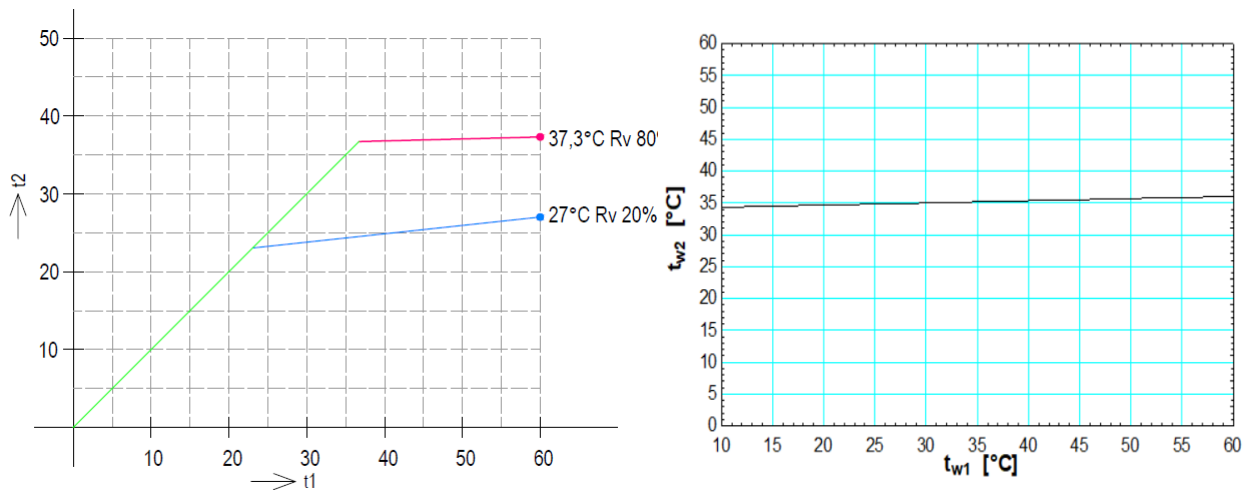
Obrázek 7.3: Vysoké otáčky, $\dot{V}_{w,1} = 1\,200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $t_{s,1} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = 20 \%$



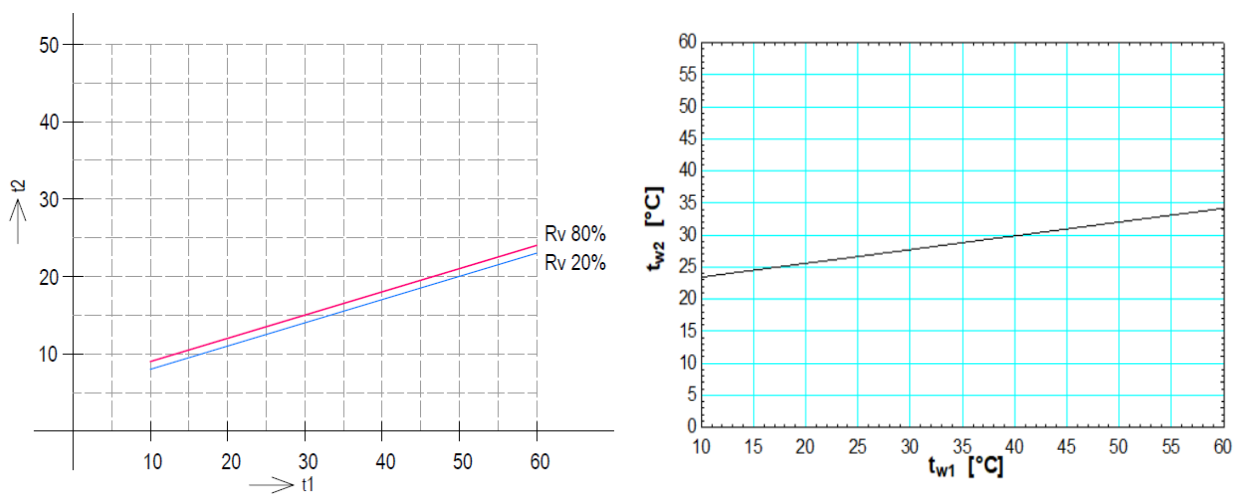
Obrázek 7.4: Nízké otáčky, $\dot{V}_{w,1} = 1\,200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $t_{s,1} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = 20 \%$



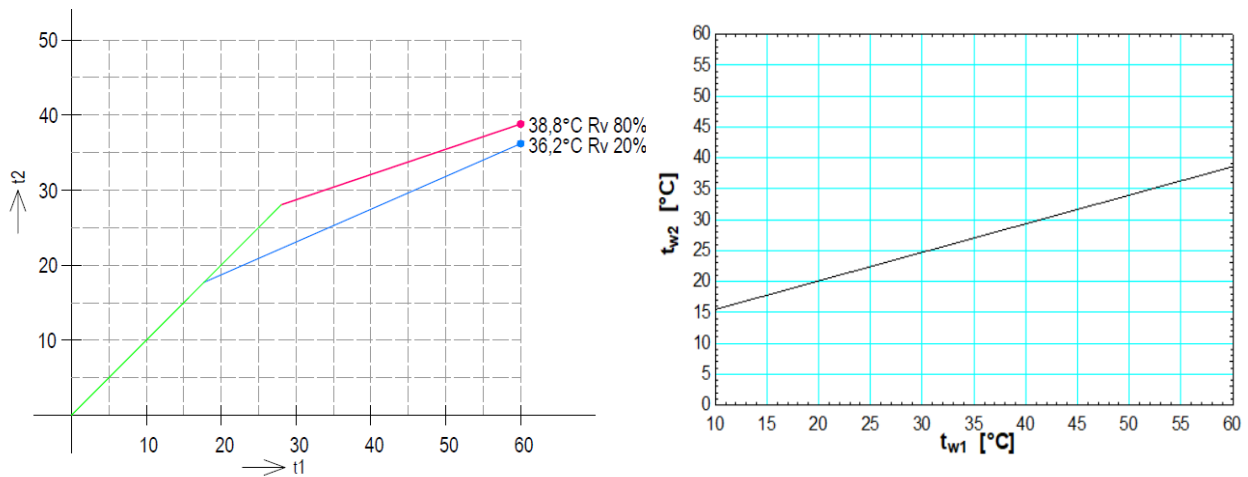
Obrázek 7.5: Nízké otáčky, $\dot{V}_{w,1} = 1\,920 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $t_{s,1} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = 80 \%$



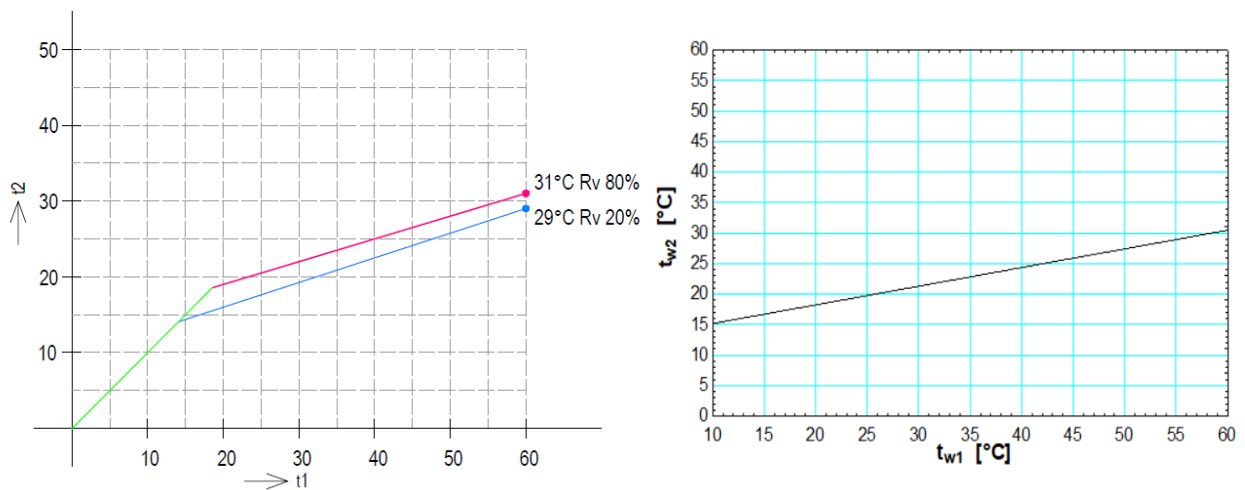
Obrázek 7.6: Vysoké otáčky, $\dot{V}_{w,1} = 1\,200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $t_{s,1} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = 80 \%$



Obrázek 7.7: Vysoké otáčky, $\dot{V}_{w,1} = 1\,920 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $t_{s,1} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = 20 \%$



Obrázek 7.8: Nízké otáčky, $\dot{V}_{w,1} = 1\,920 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $t_{s,1} = 30 \text{ °C}$, $\varphi_1 = 20 \%$



Obrázek 7.9: Nízké otáčky, $\dot{V}_{w,1} = 1\,200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, $t_{s,1} = 20 \text{ °C}$, $\varphi_1 = 80 \%$

Na základě tohoto grafického srovnání výstupů aplikace s dodanými charakteristikami pro široké spektrum odpovídajících vstupních parametrů můžeme označit výpočetní model za validní a přesný. Pokud si z grafů odečteme jednotlivé výsledky $t_{w,2}$, dobereme se k maximální odchylce kolem 1 až 2 °C, a to spíše výjimečně (například na obrázku 7.6 pro $t_{w,1} = 60 \text{ °C}$). Pro většinu vstupů výsledek modelu velmi věrně kopíruje data dodaná.

8 Studie vlivu změn vstupních dat na chladicí účinek

Z výsledků našich výpočtů pro dostatečně pestrou a rozsáhlou sadu vstupních kombinací můžeme nyní získat potřebná data k analýze vlivu změn jednotlivých vstupních parametrů.

V následujících podkapitolách se vždy zaměříme na jednu vstupní veličinu, která bude proměnlivá v celém svém uvažovaném rozsahu. Ostatní vstupní parametry musíme určit a brát je jako konstanty (volíme nominální hodnoty), aby se projevil pouze vliv vstupu zkoumaného.

Tabulka 8.1: Specifikace vstupních hodnot pro analýzy v podkapitolách 8.1 až 8.3

Podkapitola	Proměnlivý vstup	Konstanta 1	Konstanta 2
8.1	$t_{w,2} = f(t_{w,1})$	$t_{s,1} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$	$\varphi_1 = 70 \%$
8.2	$t_{w,2} = f(t_{s,1})$	$t_{w,1} = 48 \text{ }^\circ\text{C}$	$\varphi_1 = 70 \%$
8.3	$t_{w,2} = f(\varphi_1)$	$t_{w,1} = 48 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{s,1} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$

Co se týče otáček ventilátoru a hydraulického zatížení věže, přiřaďme si uvažované možnosti do čtyř režimů, které pokryjí všechny varianty aktuálního nastavení systému.

Tabulka 8.2: Označení možných režimů

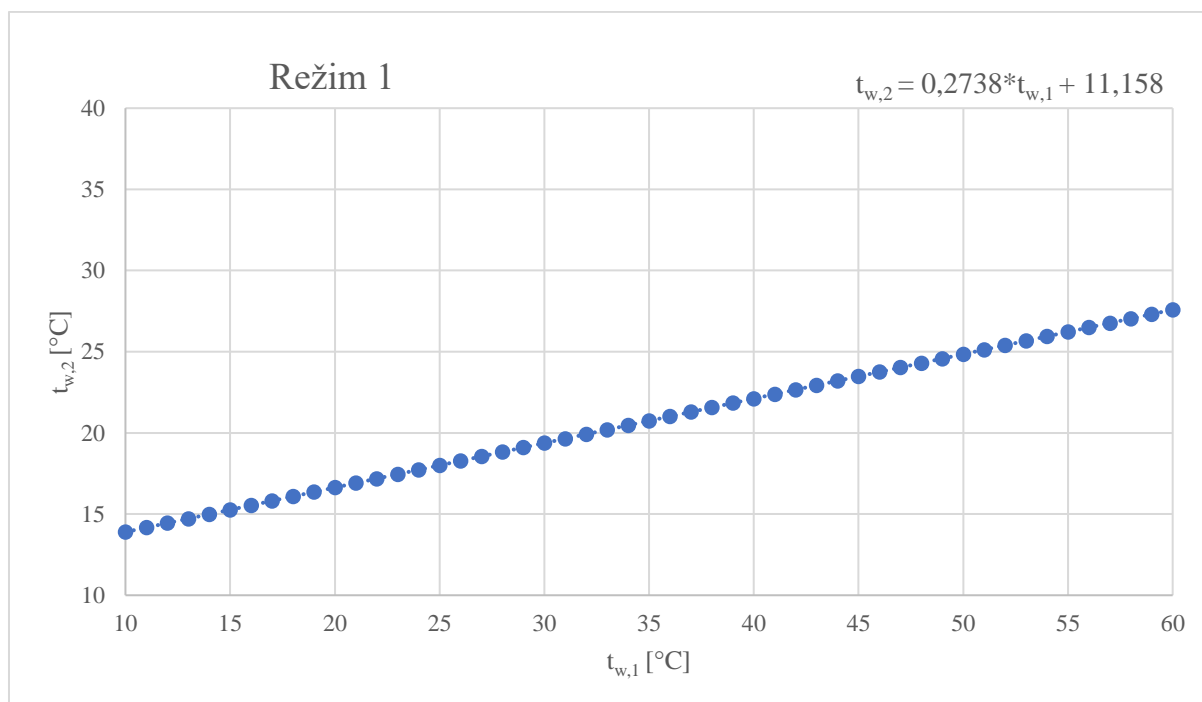
Název	Otáčky ventilátoru	Hydraulické zatížení
Režim 1	Vysoké	1 920 m ³ /h
Režim 2	Nízké	1 920 m ³ /h
Režim 3	Vysoké	1 200 m ³ /h
Režim 4	Nízké	1 200 m ³ /h

V rámci každé z následujících podkapitol bude vliv zkoumaného vstupního parametru analyzován pro všechny tyto režimy. Celkem bude tedy vytvořeno dvanáct křivek popisujících funkční závislosti teploty ochlazené vody na okolních podmínkách. Rovnice určující dané křivky vždy zobrazíme v pravém horním rohu každého grafu.

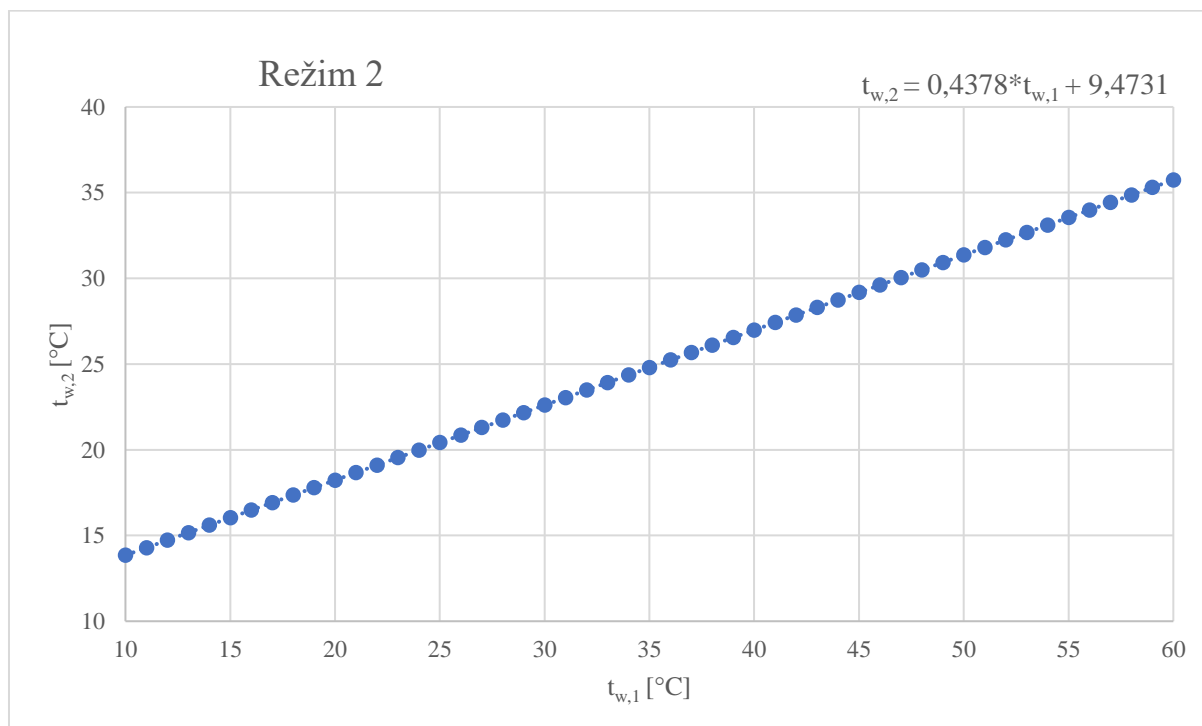
8.1 Vliv změny $t_{w,1}$

Na obrázcích 8.1 až 8.4 je zobrazen vliv změny $t_{w,1}$ napříč celým uvažovaným rozsahem na konečnou $t_{w,2}$. Krok mezi jednotlivými výpočty je vždy 1 °C.

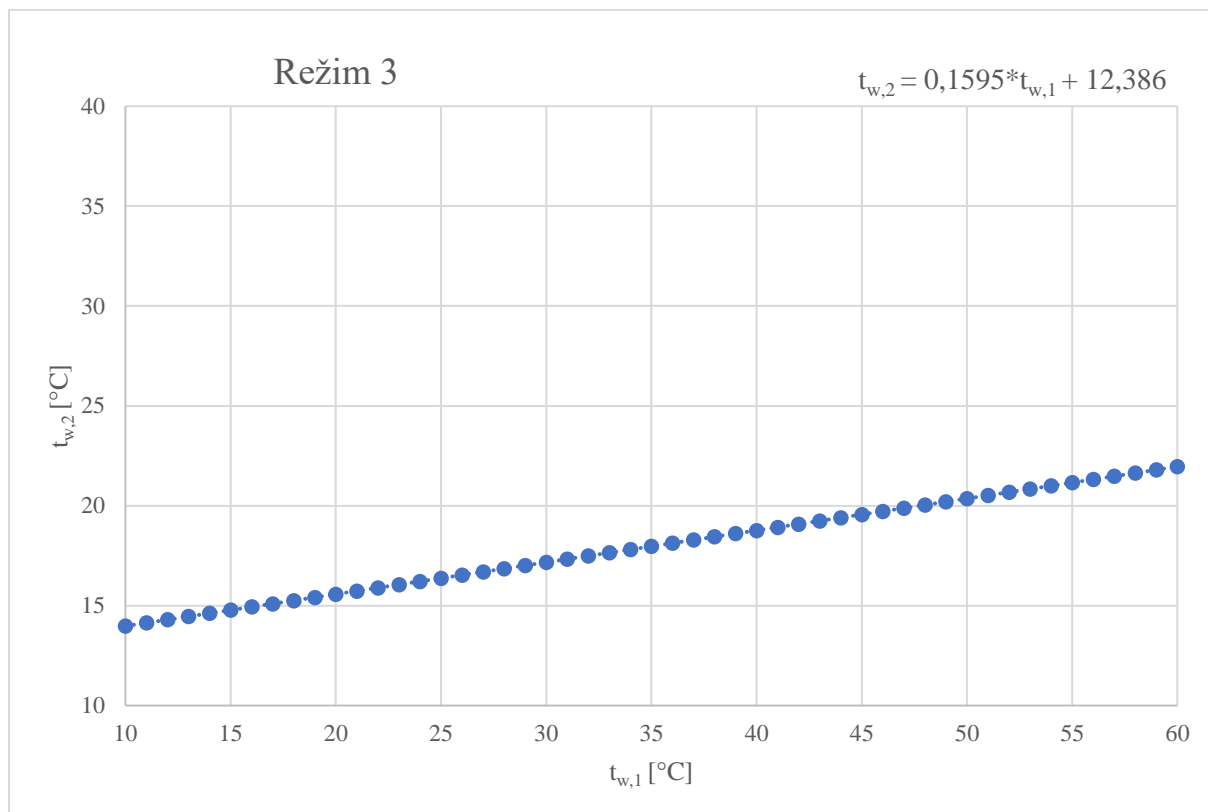
Z výsledků vidíme, že závislost má lineární charakter. Zároveň zjišťujeme, že pro režimy uvažující nízké otáčky ventilátoru má $t_{w,1}$ na systém výraznější vliv. Toto lze vyvodit z vyššího lineárního koeficientu v rovnici popisující vzniklou funkční závislost. Rovněž můžeme vyčíst, že vliv $t_{w,1}$ roste s vyšším hydraulickým zatížením, což je krajně zřejmé.



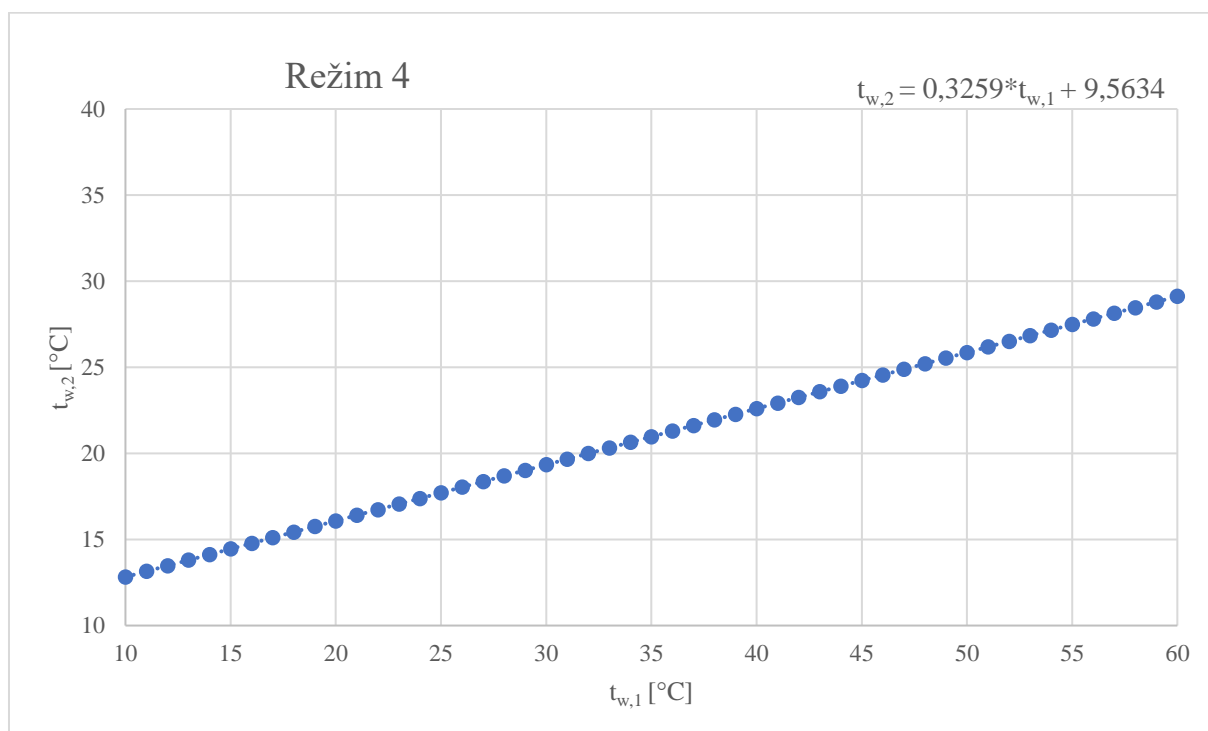
Obrázek 8.1: Vliv změny $t_{w,1}$ na $t_{w,2}$ pro „Režim 1“



Obrázek 8.2: Vliv změny $t_{w,1}$ na $t_{w,2}$ pro „Režim 2“



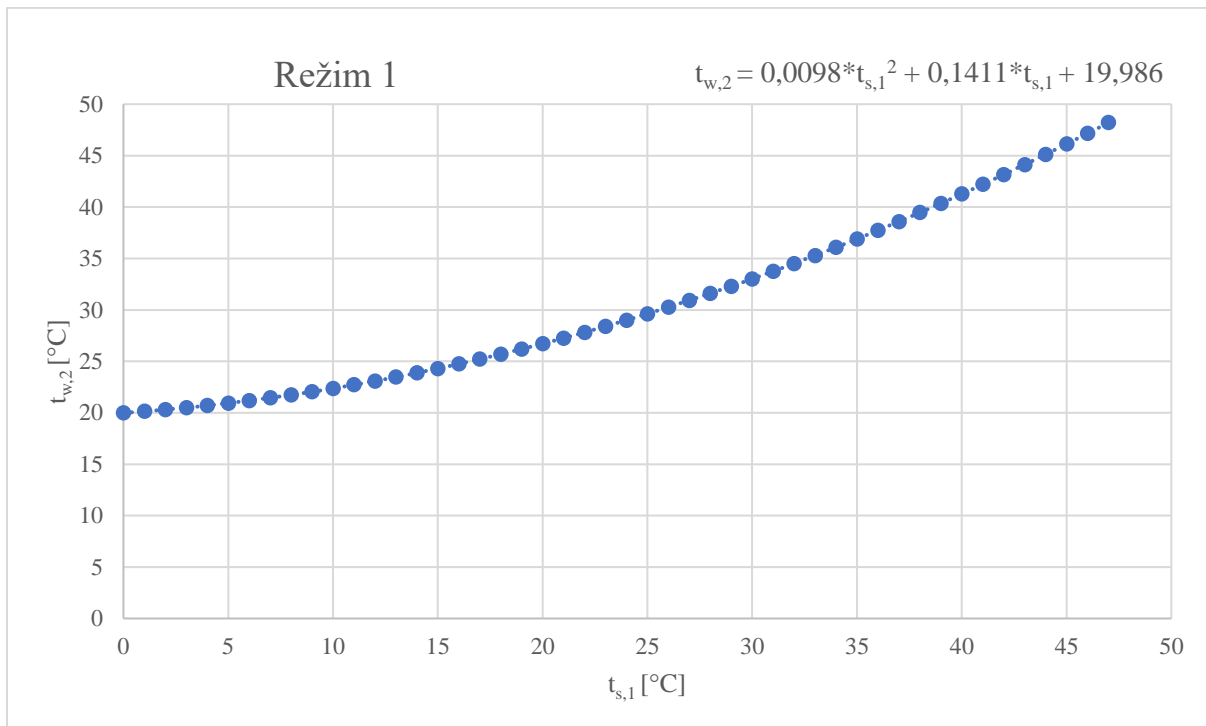
Obrázek 8.3: Vliv změny $t_{w,1}$ na $t_{w,2}$ pro „Režim 3“



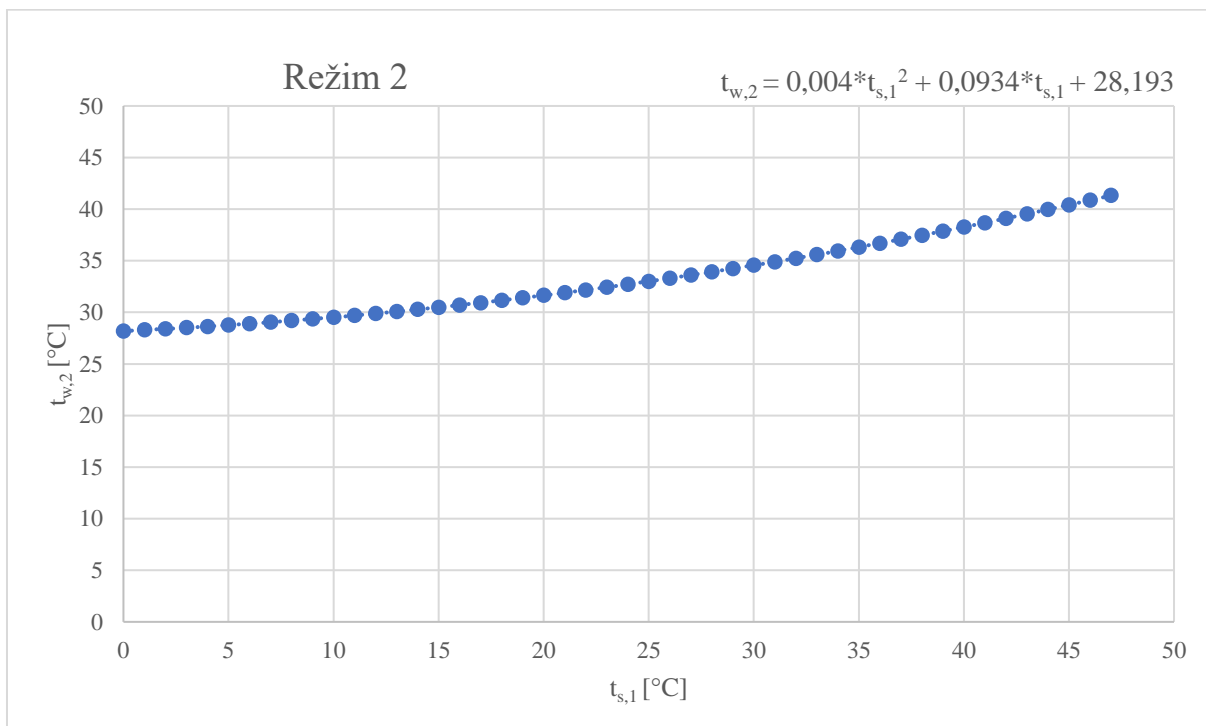
Obrázek 8.4: Vliv změny $t_{w,1}$ na $t_{w,2}$ pro „Režim 4“

8.2 Vliv změny $t_{s,1}$

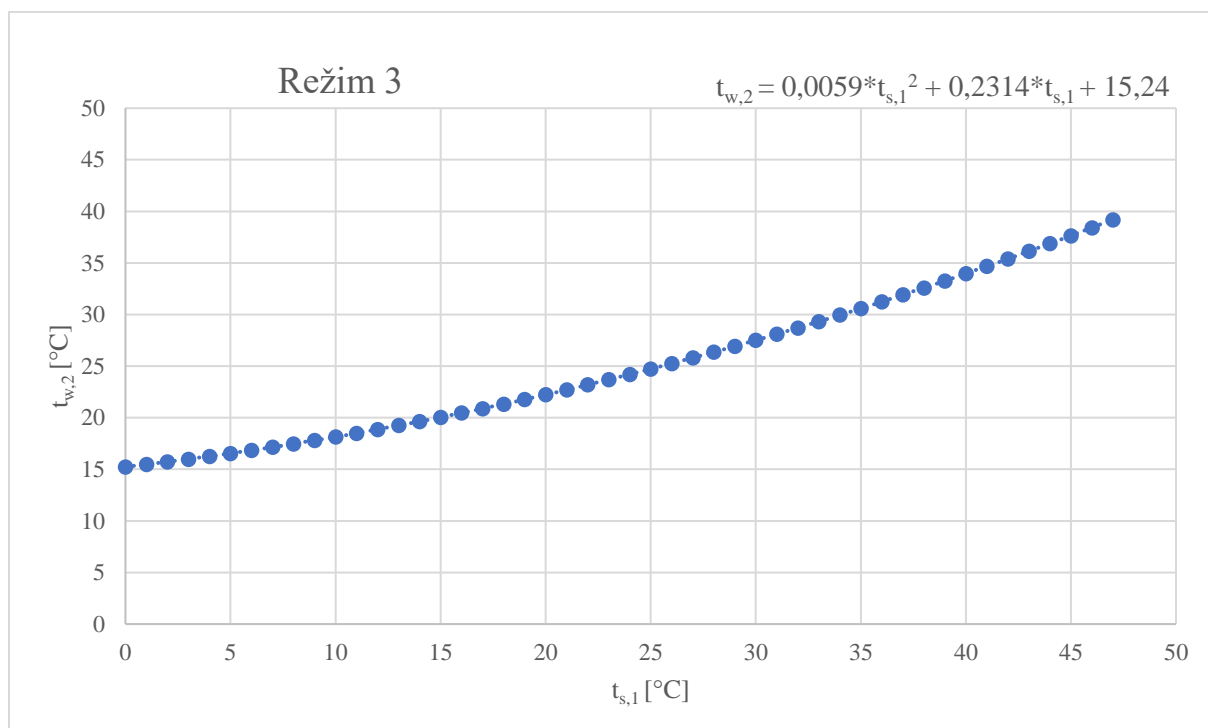
Na obrázcích 8.5 až 8.8 je zobrazen vliv změny $t_{s,1}$ napříč celým uvažovaným rozsahem na konečnou $t_{w,2}$. Krok mezi jednotlivými výpočty je vždy 1 °C. Vidíme, že pro režimy uvažující vysoké otáčky ventilátoru má $t_{s,1}$ na systém výraznější vliv. Toto lze vyvodit z vyšších kvadratických i lineárních koeficientů v rovnicích popisujících vzniklé funkční závislosti.



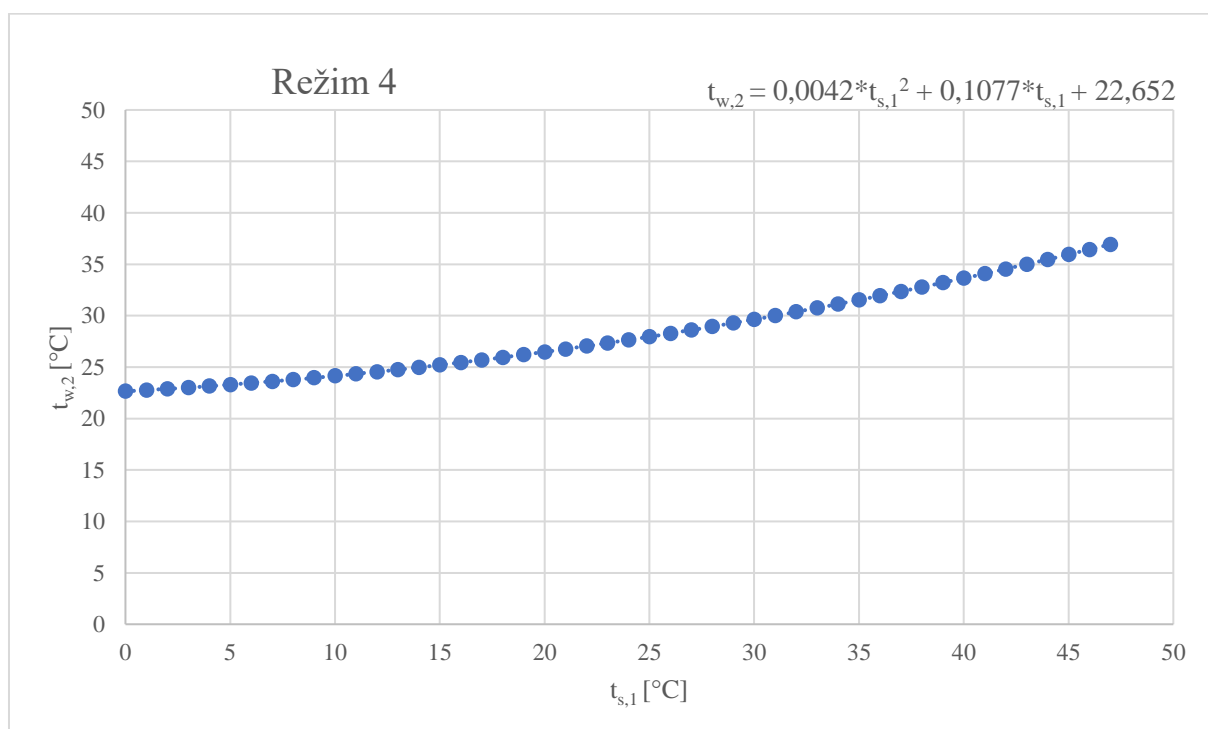
Obrázek 8.5: Vliv změny $t_{s,1}$ na $t_{w,2}$ pro „Režim 1“



Obrázek 8.6: Vliv změny $t_{s,1}$ na $t_{w,2}$ pro „Režim 2“



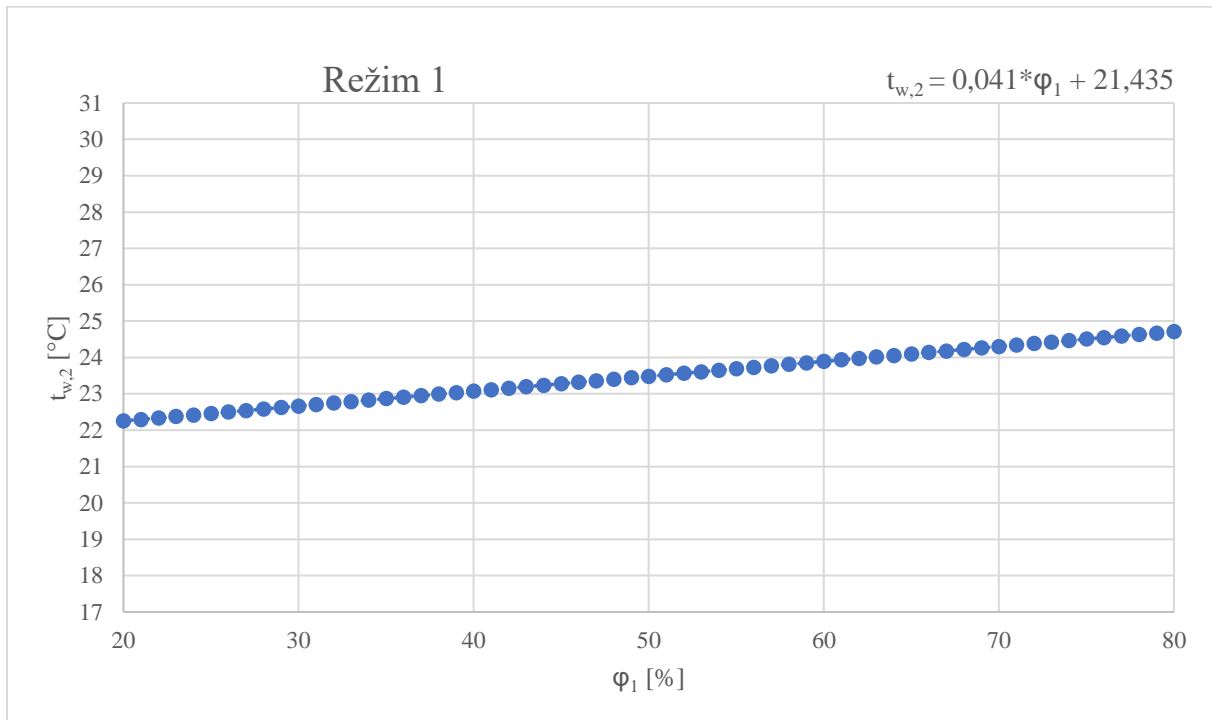
Obrázek 8.7: Vliv změny $t_{s,1}$ na $t_{w,2}$ pro „Režim 3“



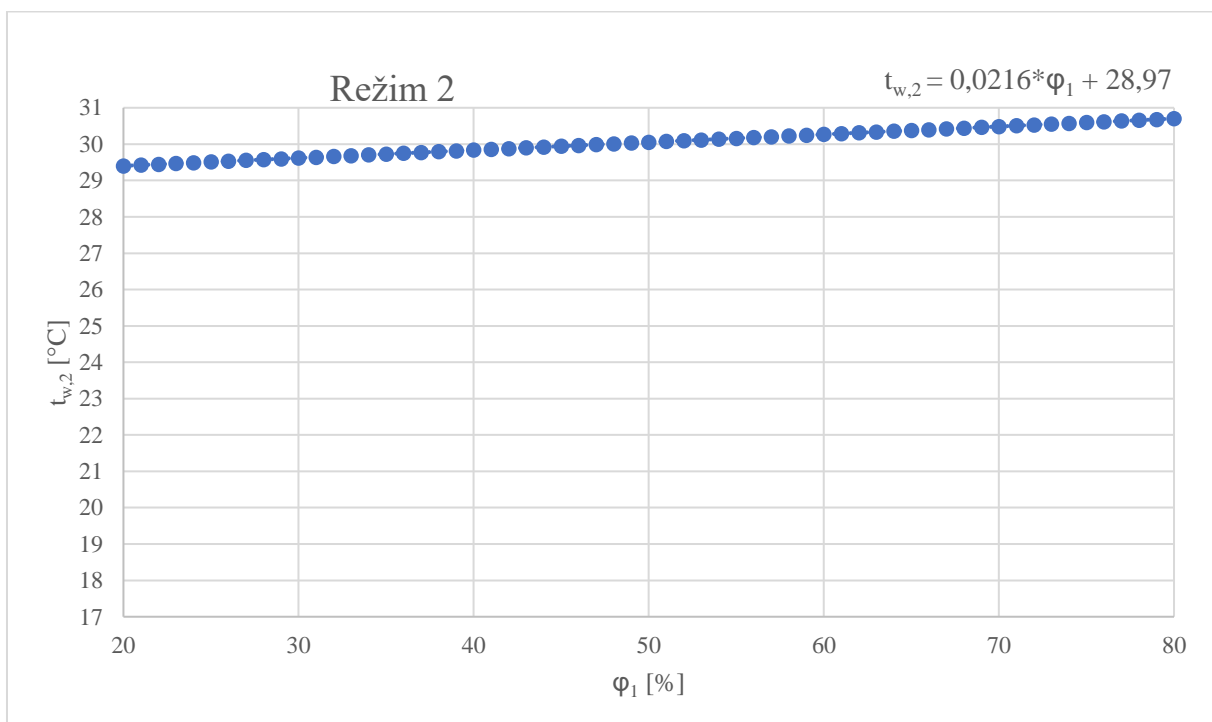
Obrázek 8.8: Vliv změny $t_{s,1}$ na $t_{w,2}$ pro „Režim 4“

8.3 Vliv změny φ_1

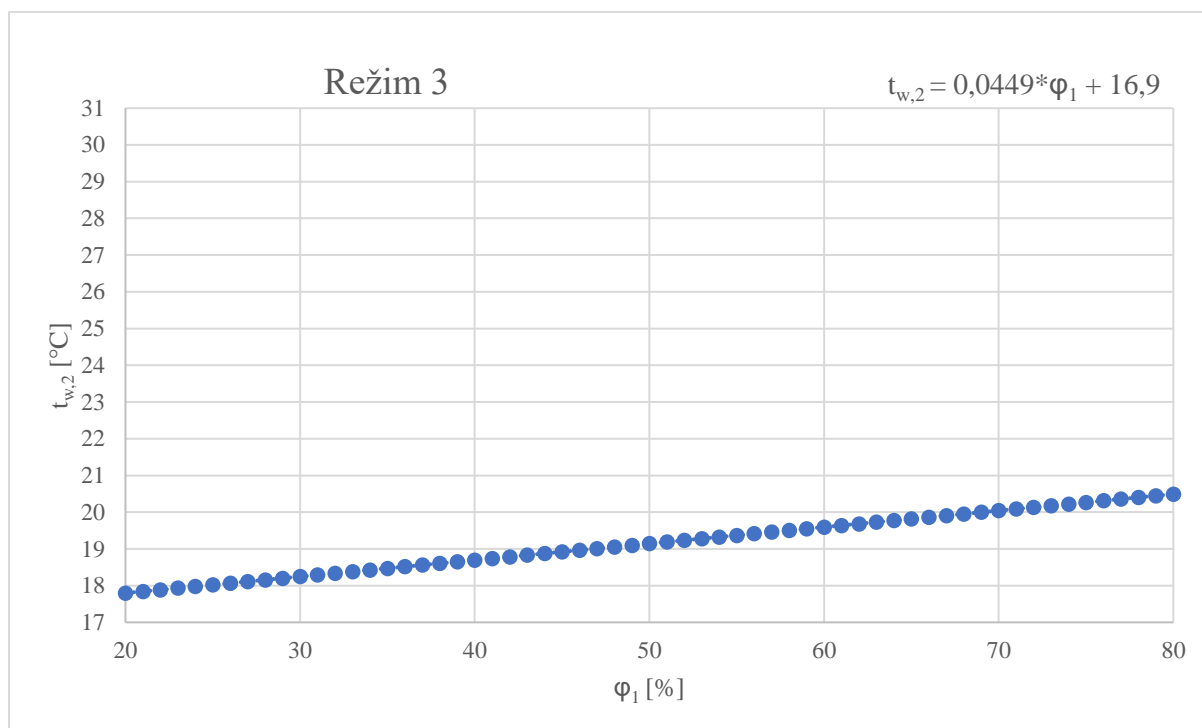
Na obrázcích 8.9 až 8.12 je zobrazen vliv změny φ_1 napříč celým uvažovaným rozsahem na konečnou $t_{w,2}$. Krok mezi jednotlivými výpočty je vždy 1 %. Z výsledků vidíme, že pro režimy uvažující vysoké otáčky ventilátoru má φ_1 na systém výraznější vliv. Toto lze vyvodit z vyšších lineárních koeficientů v rovnicích popisujících vzniklé funkční závislosti. Rovněž pozorujeme mírně rostoucí vliv φ_1 s klesajícím hydraulickým zatížením.



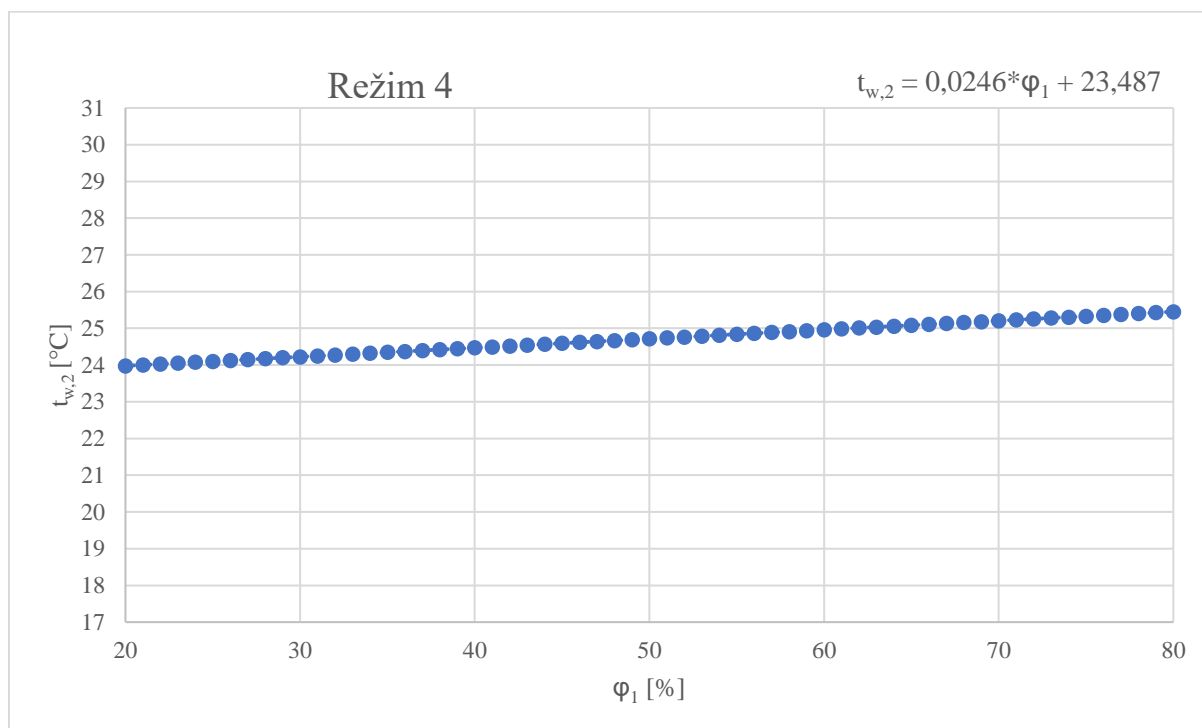
Obrázek 8.9: Vliv změny φ_1 na $t_{w,2}$ pro „Režim 1“



Obrázek 8.10: Vliv změny φ_1 na $t_{w,2}$ pro „Režim 2“



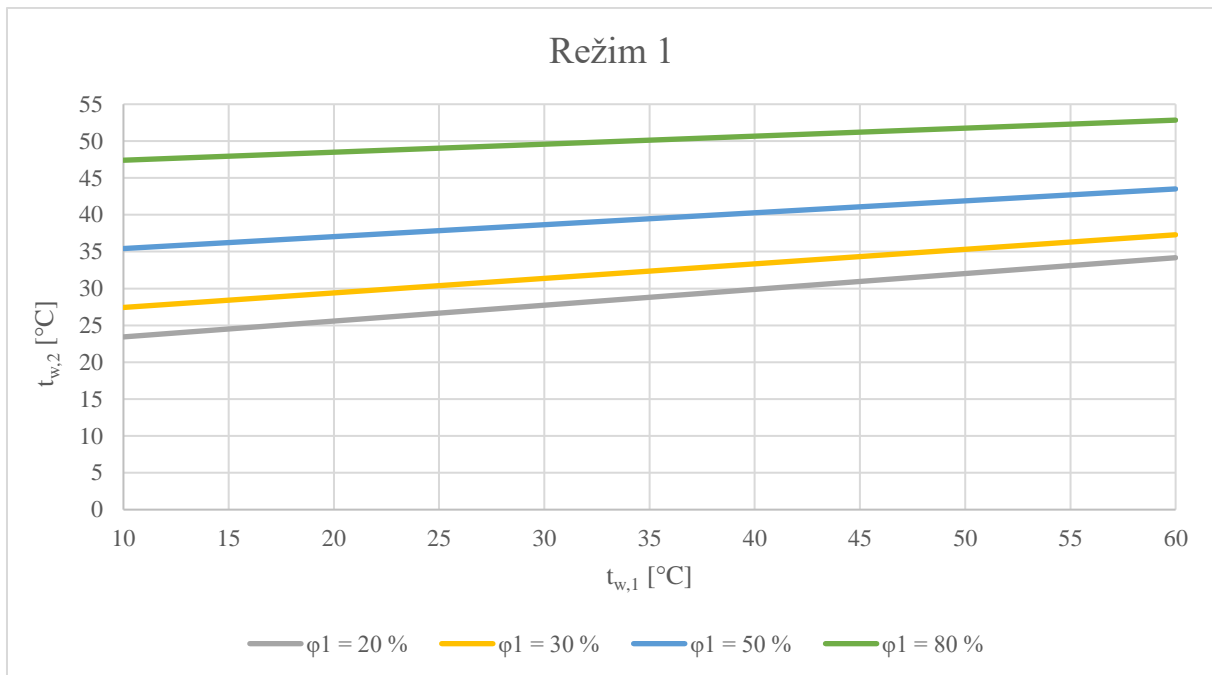
Obrázek 8.11: Vliv změny φ_1 na $t_{w,2}$ pro „Režim 3“



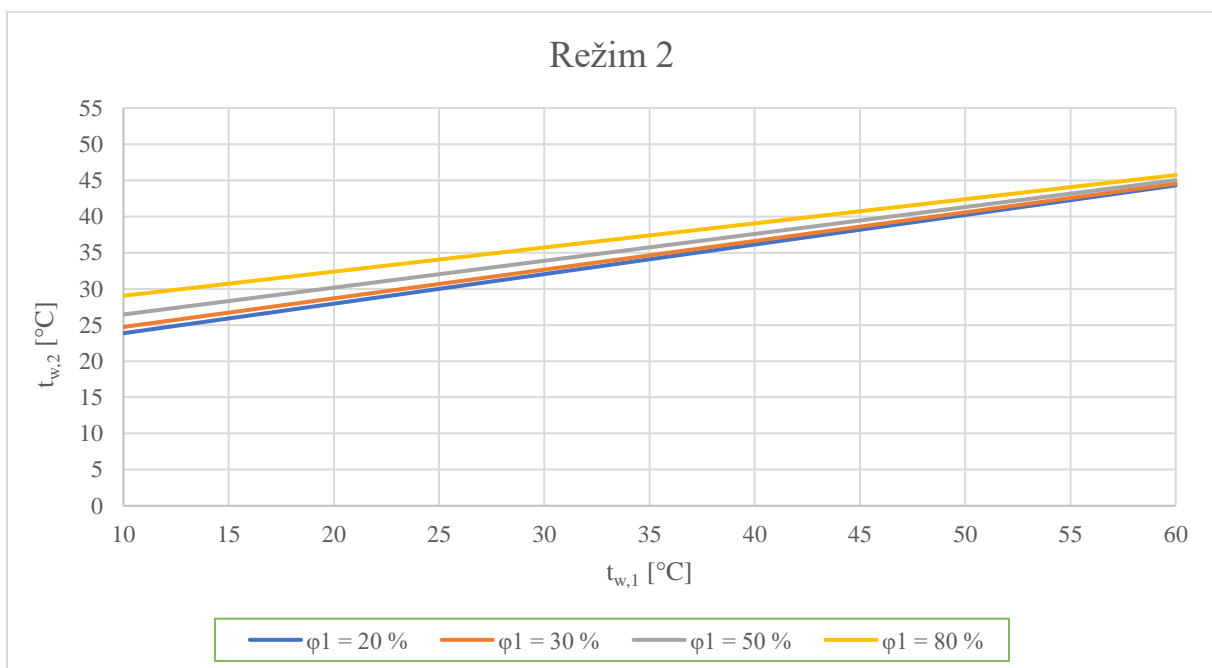
Obrázek 8.12: Vliv změny φ_1 na $t_{w,2}$ pro „Režim 4“

9 Extrémní podmínky

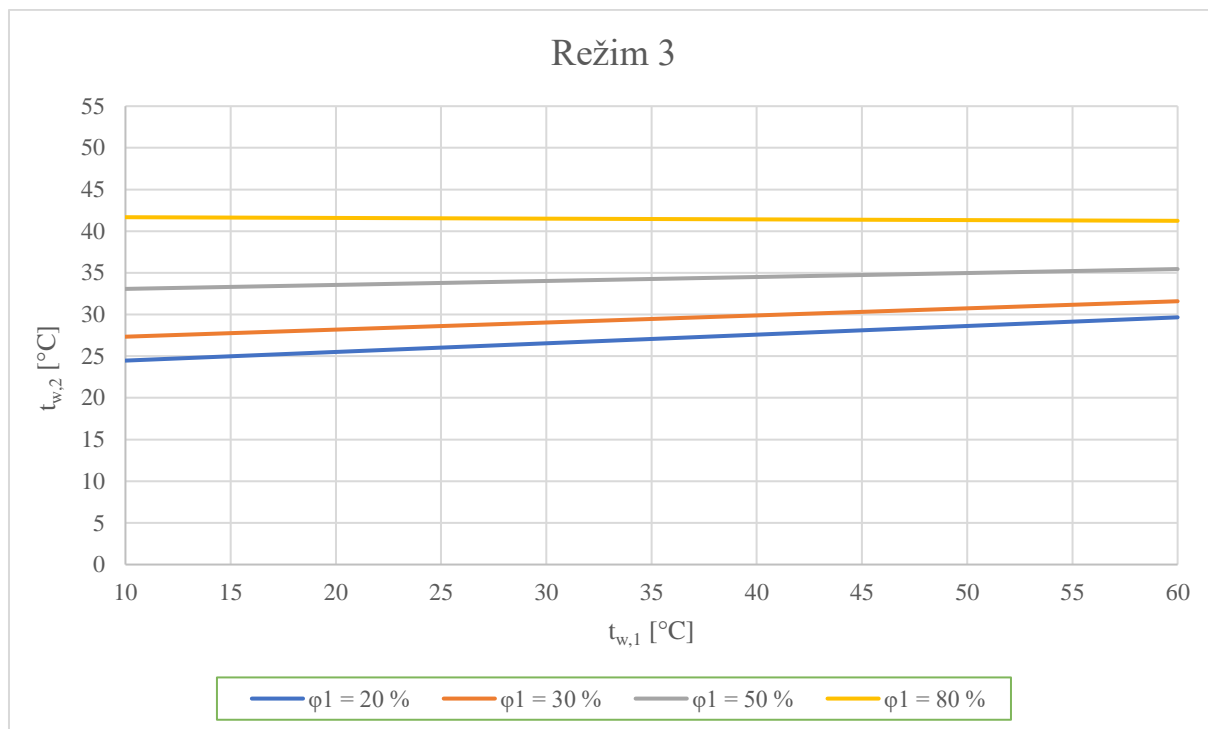
Jedním z primárních důvodů, proč tato práce pod záštitou společnosti ČEZ, a.s. vznikla bylo, abychom na základě vytvořeného modelu mohli odhadnout potenciální chování a fungování VCHV v JE Dukovany při extrémních klimatických podmínkách. Proto ještě věnujme závěrečnou kapitolu této práce právě uvedení výsledků výpočetního modelu pro maximální uvažovanou venkovní teplotu okolního vzduchu, tj. 47 °C. Grafy závislosti $t_{w,2}$ na $t_{w,1}$ uvedme znovu pro všechny režimy (viz tabulka 8.2), a to s proměnlivou relativní vlhkostí okolního vzduchu, kterou však při extrémních teplotách lze očekávat na úrovních okolo 20 až 30 %.



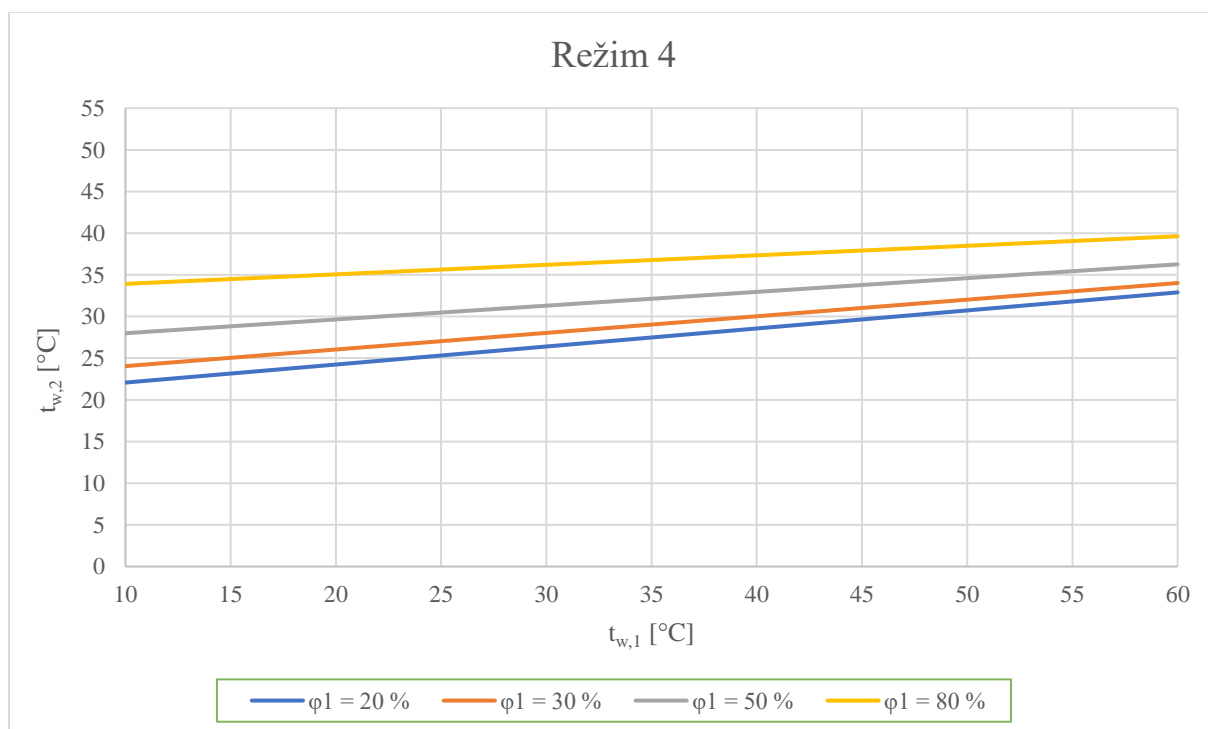
Obrázek 9.1: Závislost $t_{w,2}$ na $t_{w,1}$ při extrémní teplotě okolního vzduchu pro „Režim 1“



Obrázek 9.2: Závislost $t_{w,2}$ na $t_{w,1}$ při extrémní teplotě okolního vzduchu pro „Režim 2“



Obrázek 9.3: Závislost $t_{w,2}$ na $t_{w,1}$ při extrémní teplotě okolního vzduchu pro „Režim 3“



Obrázek 9.4: Závislost $t_{w,2}$ na $t_{w,1}$ při extrémní teplotě okolního vzduchu pro „Režim 4“

Závěr

Diplomová práce je rozdělena do celkem devíti hlavních kapitol, přičemž se napříč nimi podařilo splnit všechny základní předem stanovené cíle zadané společností ČEZ, a.s., která pro potřeby této práce poskytla značné množství podkladů, informací a konzultací.

První polovina práce je orientovaná teoreticky.

Úvodní kapitola se věnuje zaprvé popisu funkce jaderné elektrárny a významu jádra v oblasti elektroenergetiky, a to jak v ČR, tak i ve světě. Zakončena je pak souhrnem informací o JE Dukovany, jejíž ventilátorové chladicí věže jsou samotným předmětem práce.

Následuje stručná a povšechná rešerše technologických způsobů odvodu tepla, na níž plynule navazuje kapitola zaměřená konkrétně na teorii chladicích věží. Zde je kladen důraz na dělení chladicích věží do skupin dle rozlišujících kritérií. Různé skupiny jsou navzájem porovnány a jsou uvedena jejich specifika. Dále pak pokračuje podkapitola uvádějící hmotnostní bilanci tradiční chladicí věže včetně popisu všech druhů systémových ztrát.

Čtvrtý oddíl práce předkládá pohled na vodohospodářství dukovanské jaderné elektrárny, přičemž zároveň již i uvádí první konkrétní technická data vlastních chladicích věží s nuceným tahem. Obsahem této části jsou také autorské nákresy schémat zobrazujících objekty a okruhy náležící struktuře vodního hospodářství JE Dukovany. Tyto grafiky jsou inspirovány firemními skripty určenými ke školení zaměstnanců elektrárny.

Druhá polovina diplomové práce je orientovaná prakticky.

Začíná návrhem výpočetního modelu určeného ke stanovení teploty ochlazené vody na výstupu ze systému VCHV. Tento model je jmenovitě aplikován na nominální okolní podmínky, simultánně je však přepisován do obecného skriptu, který je základem aplikace, již se věnuje kapitola číslo 6. Model samotný je rozdělen do několika podkapitol zaměřených na specifické části technické podstaty chlazení ventilátorovou chladicí věží. Tyto podkapitoly na sebe svými mezivýsledky navazují.

Popsaný model je v sedmé kapitole validován s dostupnými daty ve formě výsledků garančních měření a několika charakteristik vytvořených projektantem pro sadu konkrétních pracovních bodů. Srovnání lze považovat za úspěšné, jelikož maximální zjištěná odchylka mezi výsledkem modelu a dodanými charakteristikami nepřekračuje v žádném z případů 2 °C.

Oddíl číslo 8 se zaměřuje na poslední z cílů práce. Je v něm realizována studie vlivu změn vstupních dat na chladicí účinek věže. Řešení je koncipováno do tří podkapitol, přičemž každá z nich uvažuje jeden ze vstupních parametrů (vstupní teplota vody, okolní teplota a relativní vlhkost vzduchu) za proměnný a zkoumá vliv jeho změny na hodnotu teploty ochlazené vody, a to při všech uvažovaných variantách chodu věže. Získané závislosti jsou vyjádřeny graficky i matematicky a jsou náležitě okomentovány. Takřka ve všech případech koresponduje výstup studie s logickým očekáváním.

Poslední kapitola předkládá odhad chování ventilátorových chladicích věží při extrémní teplotě okolního vzduchu, jejímž uvažovaným maximem rozumíme hodnotu 47 °C.

Práce je obohacena o několik obrázků a grafů určených ke snadnějšímu pochopení a názornější prezentaci popisované problematiky. Elektronickou přílohou je pak aplikace vyexportovaná na základě výpočetního skriptu napsaného v inženýrském softwaru EES. Tento skript kopíruje popsáný model z kapitoly 5 v obecném pojetí vstupních parametrů.

Reference

- [1] Ventilátorové věže v Jaderné elektrárně Dukovany. *K4 SPACE* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.k4.cz/je-dukovany-ventilatory/t1492>
- [2] JADERNÁ ELEKTRÁRNA. *ČEZ* [online]. Praha, 1998 [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k33.htm#model>
- [3] KUNTOFF, Steffen. Schéma JE s tlakovodním reaktorem. In: *Hellfirez* [online]. Spremberg, 2000 [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: http://www.hellfirez.de/web/referate/inhalte/Physik_Energie-Dateien/kernkraftwerk_druckwasserreaktor_1.png (překlad wikipedia.org)
- [4] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-802-1443-006.
- [5] CHALUPOVÁ, Adéla. Tepelný diagram Rankin-Clausiova cyklu s přehřátou parou. In: *Wikimedia.org* [online]. 2020 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fe/Diagram_prehrata.png
- [6] World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements. *World Nuclear Association* [online]. Londýn: World Nuclear Association, 2021 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>
- [7] *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy 2019*. Jihlava: ERÚ, 2020. Dostupné také z: https://www.eru.cz/documents/10540/5381883/Rocni_zprava_provoz_ES_2019.pdf/debe8a88-e780-4c44-8336-a0b7bbd189bc
- [8] Jaderná elektrárna Dukovany je v provozu od roku 1985. *O Energetice* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2018 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrany/jaderna-elektrarna-dukovany>
- [9] Jaderná elektrárna Dukovany. *Svět energie* [online]. Dukovany: Simopt, 2020 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrany/jaderne-elektrany-cez/jaderna-elektrarna-dukovany>
- [10] Sborník přednášek pro Letní univerzitu 2020. JE Dukovany, Skupina ČEZ a.s. 2020. 55 s.
- [11] ŠKORPÍK, Jiří. Transformační technologie: zdroje a přeměna energie [online]. 2006 [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: www.transformacni-technologie.cz
- [12] Methods of Refrigeration. *ME Mechanical* [online]. 2016 [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://me-mechanicalengineering.com/methods-of-refrigeration/> (překlad e-konstrukter.cz)
- [13] Vodní hospodářství – Vnější chladicí okruhy. ČEZ a.s., 2018. str. 281-328 [*firemní skripta*]
- [14] KUPPAN, T., Heat exchanger design handbook. USA, New York: Taylor and Francis, 2000. ISBN 0-8247-9787-6.

- [15] ŠUBERT, Ondřej, J. ČÍŽEK a L. NOVÁKOVÁ. *Model chladicí věže* [online]. Praha, 2008 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: https://stc.fs.cvut.cz/history/2008/sbornik/Papers/S2/Subert_Ondrej_12107.pdf. Příspěvek. ČVUT.
- [16] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tepelné elektrárny a teplárny*. Praha: Vydavatelství SNTL, 1984. 608 s.
- [17] Cooling Towers Explained: How does a cooling tower work? *Engineeringclicks* [online]. 2018 [cit. 2021-01-27]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/cooling-tower/>
- [18] Natural draft cooling tower diagram. In: *Engineeringclicks* [online]. 2018 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/wp-content/uploads/2017/08/NaturalDraft-CoolingTower.png> (překlad vlastní)
- [19] ŠAPOŠNIKOV, Vsevolod Vladimirovič, František POMAJZL a Ivo POSSELT. *Atmosférické chladiče a chladicí věže*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977. Řada strojírenské literatury.
- [20] Spodní část chladicí věže. In: *Občanská bezpečnostní komise při jaderné elektrárně Dukovany* [online]. Dukovany: efcomm, 2020 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: https://www.obkjedu.cz/data_1/1312middle.jpg
- [21] Induced draft cooling tower diagram. In: *Engineeringclicks* [online]. 2018 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/wp-content/uploads/2017/08/InducedDraft-CoolingTower-460x435.png> (překlad vlastní)
- [22] Interní data společnosti ČEZ, a.s. [*firemní dokumentace*]
- [23] Ventilátorová chladicí věž KJT I. ČEZ a.s., 2016. Provozní předpis P329p. [*firemní dokumentace*]
- [24] 2H Drift Eliminators. *Enexio, 2H Water technologies* [online]. Blisworth: Enexio, 2017 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <https://479134.smushcdn.com/1987826/wp-content/uploads/2017/07/Screen-Shot-2017-07-27-at-12.37.43.png?size=2120x1111&lossy=0&strip=1&webp=1>
- [25] Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice je v provozu již 40 let. In: *O Energetice* [online]. Dalešice: ČTK, 2018 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elekrarny-cr/precerpavaci-vodni-elekrarna-dalesice-je-v-provozu-jiz-40-let>
- [26] Bártů, Marek. *Email*. ČEZ a.s., Jaderná elektrárna Dukovany, Dukovany 269 Dukovany, 675 50. 17.05.2021.
- [27] Demineralizovaná voda. *EOP* [online]. Opatovice nad Labem: EOP, 2019 [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.eop.cz/demineralizovana-voda>
- [28] Výstavba dvou ventilátorových chladicích věží Dukovany. *REKO a.s. cooling towers* [online]. Praha: REKO PRAHA, 2016 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.reko-praha.cz/reference/vystavba-dvou-ventilatorovych-chladicich-vezi-dukovany/>
- [29] PETZ Petr. *Koncový jímač tepla* [firemní prezentace]. 05/2014 [cit. 2021-01-27].
- [30] F. Drkal, M. Lain, J. Schwarzer, V. Zmrhal. *Vzduchotechnika*. https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/VZT/Vzduchotechnika.pdf Praha: ČVUT, 2009

[31] Průběh změny stavu vzduchu při vlhčení vzduchu vodou a párou a značení chladiče ve schématech. *Tzbinfo* [online]. Praha 6: Topinfo, 2006 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z:
<https://vetrani.tzb-info.cz/docu/clanky/0033/003382o9.gif>

[32] ŠTĚTINA, Josef. Termomechanika online.
<https://sites.google.com/vutbr.cz/termomechanika/doma/termomechanika-6tt?authuser=0>
Brno: VUT, 2020

[33] BALÁŠ, Marek. Procesy sdílení tepla.
https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/283945/mod_resource/content/0/01_Procesy%20sd%C3%ADlen%C3%AD%20tepla.pdf Brno: VUT, 2020

Seznam použitých zkratk

AK	absolutní koeficient
BQDV	hlavní cirkulační čerpadlo kondenzátu
CČS	centrální čerpací stanice
CCHV	cirkulační chladicí voda
DGS	diesel generátorová stanice
EE	elektrická energie
ENČ	elektromotorová napájecí čerpadla
FRP	vláknový kompozit (Fibre-reinforced plastic)
HK	hlavní kondenzátor
HVB	hlavní výrobní blok
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
INES	Mezinárodní stupnice jaderných událostí
JE	jaderná elektrárna
JEDU	Jaderná elektrárna Dukovany
KČ	kondenzátní čerpadlo
KJT	koncový jímač tepla
KS	kompresorová stanice
LITEN	termoplastický materiál, polyetylen
LK	lineární koeficient
NT	nízkotlaký (díl turbíny, regenerátor, kompresorová stanice, ...)
OZE	obnovitelné zdroje energie
PG	parogenerátor
PT	parní turbína
PVC	polyvinylchlorid
ŘS	řídící systém
TO	termické odplynění
TÚV	tepelná úpravna vody
TVD	technická voda důležitá
TVN	technická voda nedůležitá
ÚCHV	úpravna chladicí vody
VCHV	ventilátorové chladicí věže
VT	vysokotlaký (díl turbíny, regenerátor, kompresorová stanice, ...)
VV	ventilátorová věž
VVER	vodo-vodní energetický reaktor
ŽB	železobeton

Seznam použitých symbolů

a, b, c _a , d _a , e _a , c _b , d _b , e _b	[-]	koeficienty určující křivky získané proložením dat
c _p	[kJ/(kg*K)]	měrná tepelná kapacita (při p=konst.)
h	[m n. m.]	nadmořská výška
i	[kJ/kg]	entalpie
l	[kJ/kg]	měrné skupenské teplo
ṁ	[kg/s]	hmotnostní tok
n	[1/min]	otáčky ventilátoru
p	[kPa]	tlak
P _p	[kW]	příkon
Q̇	[kW]	tepelný tok
t	[°C]	teplota
Ṃ	[m ³ /s] ∨ [m ³ /h]	objemový tok
x	[g/kg]	absolutní vlhkost
Z	[%]	ztráta
Δp	[Pa]	tlaková diference (podtlak/přetlak)
η	[%]	účinnost
ρ	[kg/m ³]	hustota
φ	[%]	relativní vlhkost

Seznam použitých indexů

1	vstup do systému
2	výstup ze systému
A	rychloběžný režim ventilátoru
atm	atmosférický
B	pomaluběžný režim ventilátoru
d	dynamický
dopl	voda doplňovaná do systému
dz	difuzorová ztráta
e	experimentální
m	modelové
mt	mokrý teploměr
o	odpar
odkal	voda ztracená odkalem
odluh	voda ztracená odluhem
odpar	voda ztracená odparem
r	relativní
s	suchý teploměr
st	statický
t	teoretická
TVD	technická voda důležitá
ulet	voda ztracená úletem
v	označení média: vzduch
w	označení média: voda

Seznam příloh

Příloha 1: Aplikace „Charakteristiky VCHV JE Dukovany“