



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro:	p. Libora HÁJKA
program:	Teoretický základ strojního inženýrství
obor:	bez oboru
název česky:	Metody měření a hodnocení tepelné výkonnosti mokrých chladicích věží
název anglicky:	Method of Measurement and Evaluation of Thermal Performances of Wet Cooling Towers

Zásady pro vypracování:

- 1) Rešerše odborné literatury a dostupných informačních zdrojů.
- 2) Seznámit se s dostupnými výpočtovými postupy pro výpočet mokrých chladicích věží.
- 3) Provést rozbor problematiky měření a vyhodnocování tepelné výkonnosti mokrých chladicích věží.
- 4) Provést příklad měření a vyhodnocení.

Rozsah průvodní zprávy: 30 stran

Rozsah grafických prací: 2 výkresy A4, grafy, schémata, 20 stran

Seznam doporučené literatury:


- 1) ČSN EN 14705
- 2) ČSN EN 13741
- 3) CTI ATC-105
- 4) D.G.Kröger: Air-cooled Heat Exchangers and Cooling Towers (Volume I., II.), 2004
- 5) Mikyška L., Šebek J.: Chladicí věže provoz a údržba, SNTL, Praha, 1989

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavol Vitkovič, Ph.D.


Konzultant bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 25. 4. 2016

Datum odevzdání bakalářské práce: 17. 6. 2016


.....
Prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.
Vedoucí Ú 12112




.....
Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
Děkan fakulty

V Praze dne 25. 4. 2016

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, s pomocí vedoucího bakalářské práce, odborné literatury a ostatních materiálů, které mi byly poskytnuty a jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Praze dne 18. 8. 2016

Hájek Libor

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Pavolu Vitkovičovi Ph.D. za čas, cenné rady a připomínky, které vedly k úspěšnému zpracování bakalářské práce.

Anotační list

Jméno autora:	Libor Hájek
Název Bakalářské práce:	Metody měření a hodnocení tepelné výkonnosti mokrých chladicích věží
Anglický název:	Method of measurement and evaluation of thermal performances of wet cooling towers
Akademický rok:	2015/2016
Studijní obor:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav/odbor:	Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Vitkovič Pavol, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 39 Počet obrázků: 9
Klíčová slova:	Měření, chladicí věž, Merkelovo číslo, výpočtové metody
Key word:	Measurement, cooling tower, Merkel number, calculation methods
Abstrakt:	Bakalářská práce se zabývá normami pro mokré chladicí věže, návrhem měření, které je s normami v souladu, vlastním měřením a následným vyhodnocováním.
Abstract:	Bachelor thesis is dealing with standards for wet cooling towers, designed a measurement that is consistent with the standards , the actual measurement, and subsequent evaluation.

Obsah

Seznam symbolů.....	7
1 Úvod	9
2 Normy pro měření mokrých chladicích věží.....	10
3 Norma EN 13741:2003	10
3.1 Podmínky měření	10
3.2 Měřené veličiny	10
3.3 Měření a měřicí zařízení	11
3.4 Počet měřicích zařízení.....	13
3.5 Doba měření.....	13
4 Norma EN 14705:2005	14
4.1 Podmínky měření	14
4.2 Měřené veličiny	14
4.3 Měření a měřicí zařízení	15
4.4 Počet měřicích zařízení.....	18
4.5 Doba měření.....	18
5 Norma ATC-105 (00).....	19
5.1 Podmínky měření	19
5.2 Měřené veličiny	20
5.3 Měření a měřicí zařízení	20
5.4 Počet měřicích zařízení.....	22
5.5 Doba měření.....	23
6 Porovnání norem.....	23
7 Návrh měření chladicí věže	24
7.1 Měřicí zařízení – počet, seznam	24
8 Výpočtové postupy.....	27
9 Aplikace výpočtové metody na měření gridových výplní.....	31
9.1 Popis standu chladicí věže	31
9.2 Popis gridové chladicí výplně	32
9.3 Nastavení experimentu	33
9.4 Měření	36
9.5 Vyhodnocení a výsledky	36
10 Závěr	38
Seznam použité literatury:	39

Seznam symbolů

Veličina	Název veličiny	Jednotka
A	Plocha	[m ²]
a _{fi}	Konstanta výplně	[1]
A _{fr}	Teplosměnná plocha	[m ²]
C _{pa}	Měrná tepelná kapacita	[J · kg ⁻¹]
C _{pai}	Měrná tepelná kapacita suchého vzduchu	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
C _{pv}	Měrná tepelná kapacita	[J · kg ⁻¹]
C _{pvi}	Měrná tepelná kapacita vodní páry	[J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
C _{pw}	Měrná tepelná kapacita pro střední teplotu vody	[J · kg ⁻¹]
G _w	Hmotnostní průtok přes výplň	[kg · m ⁻² · s ⁻¹]
h	Vlhkost	[kg · kg ⁻¹]
h _{ai}	Výška přívodu vzduchu	[m]
h _d	Hmotnostní součinitel	[kg · m ² · s ⁻¹]
i _{fgwo}	Latentní teplo pro 273,15 K	[J · kg ⁻¹]
i _{mai}	Entalpie nasyceného vzduchu	[J · kg ⁻¹]
i _{masw}	Entalpie nasyceného vzduchu	[J · kg ⁻¹]
L/G	Poměr hmotnostního průtoku vody a vzduchu při zkušebních podmínkách	[1]
L _{ai}	Délka přívodu vzduchu	[m]
L _{fi}	Výška výplně	[m]
m	Průtok teplé vody	[l · s ⁻¹]
m _a	Hmotnostní průtok vzduchu	[kg · s ⁻¹]
m _b	Průtok odkalování	[l · s ⁻¹]
Me	Merkelovo číslo	[1]
m _w	Hmotnostní průtok vody	[kg · s ⁻¹]
n _c	Počet čidel	[1]
n _v	Počet čidel	[1]
p _a	Atmosférický tlak	[N · m ⁻²]
p _v	Tlak vodní páry pro teplotu	[N · m ⁻²]
Q	Sdělené teplo	[kW]
Q _B	Průměrný objem vody v nádrži na ochlazenou vodu během testu	[l]

q_{me}	Hmotnostní průtok na vstupu do chladicí věže	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
S_1	Tepelná časová prodleva	$[\text{min.}]$
T_{ai}	Teplota vzduchu na vstupu	$[\text{°C}]$
t_s	Teplota studené vody	$[\text{°C}]$
t_t	Teplota teplé vody	$[\text{°C}]$
T_w	Střední teplota	$[\text{°C}]$
T_{wb}	Teplota vzduchu mokrého teploměru na vstupu	$[\text{°C}]$
T_{wi}	Vstupní teplota vody	$[\text{°C}]$
T_{wk}	Teplota vody	$[\text{K}]$
T_{wo}	Výstupní teplota vody	$[\text{°C}]$
w	Měrná vlhkost	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$
z	Expoment	$[1]$
ρ	Hustota	$[\text{kg} \cdot \text{m}^3]$

1 Úvod

Chladicí věže jsou zařízení, využívaná v průmyslu, ale především v energetice, zvláště pak u tepelných elektráren. Voda je rozstříkována tryskami, stéká přes výplň do sběrné nádoby, odkud je následně odvezena. Proti proudu vody proudí vzduch, který je odváděn do ovzduší. Probíhá sdílení tepla mezi vzduchem a vodou. Chladicí věže se velkou mírou podílejí na účinnosti, jak elektráren, tak i průmyslových procesů. Zefektivněním chlazení můžeme dosáhnout vyšší účinnosti zařízení, snížení nákladů nebo menšího vlivu na životní prostředí.

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky Českého vysokého učení technického v Praze připravuje akreditaci zkušební laboratoře, jejímž cílem bude výzkum a vývoj modernějších a efektivnějších chladících zařízení. Laboratoř bude zahrnovat měření mokrých chladících věží. Na základě podmínek akreditace jsem vypracoval přehled norem, kde jsou stanoveny, podmínky a požadavky na měření. Dále jsem v souladu s normami vypracoval návrh měření mokré chladicí věže pro výše zmíněnou laboratoř.

V druhé části práce jsem se zabýval výpočtovými metodami a vyhodnocováním chladících věží. Postup jsem aplikoval na měření gridové výplně v mokré chladicí věži za účel získání Merkelova čísla.

2 Normy pro měření mokrých chladicích věží

Norma popisuje standardizované postupy v měření mokrých chladicích věží. Ve světě se nejčastěji měří dle evropských nebo amerických norem. Zde je rozbor evropských norem EN 13741:2003 [1] a EN 14705:2005 [2], dle kterých bude vytvořena akreditovaná laboratoř. Dále je pro srovnání rozbor americké normy ATC-105 (00) [3].

3 Norma EN 13741:2003

Normu vytvořil Evropský normalizační úřad (CEN) [1]. Přejímací zkoušky tepelného výkonu mokrých chladicích věží s umělým tahem. Vznikla v roce 2003. Norma lze také vyhledat pod označením ČSN EN 13741. Podrobnosti jsou uvedeny v [1].

3.1 Podmínky měření

Měření musí probíhat za dobrého počasí (mlha, déšť apod.). Provozní podmínky by měly být v průběhu zkušební období konstantní. Vstupní teplota mokrého teploměru může kolísat, ale nesmí se měnit o více než 1 K za hodinu.

Během měření, musí být zajištěno, aby se zkušební podmínky neměnily o více než:

- ± 5 % tepelné zátěže
- ± 5 % průtoku vody
- ± 5 % rozsahu chladicí věže

3.2 Měřené veličiny

Následuje seznam všech měřitelných veličin, které norma uvádí.

Tabulka 1: Seznam měřených veličin

Č.	Měřené veličiny
1	Průtok teplé vody
2	Teplota teplé vody
3	Teplota studené vody
4	Vstupní teplota vlhkého teploměru
5	Výkon ventilátoru
6	Rychlost větru
7	Nátoková výška
8	Teplota technologické vody
9	Průtok technologické vody
10	Teplota doplňkové vody
11	Průtok doplňkové vody

3.3 Měření a měřící zařízení

Požadavky na měřící zařízení a jejich rozmístění. Všechna zařízení musí být kalibrována.

Teplota

1. Odporové teploměry
2. Kapalinové teploměry
3. Termoelektrické články
4. Termistory
5. Křemíkové teploměry

Teploměr musí mít stupnici ne vyšší než 0,1 K, čitelná na 0,05 K. Každý senzor mající odchylku větší než 0,1 K musí být nahrazen.

Teplota mokrého teploměru

- a) Indikátor musí být odstupňován ne více než po 0,1 K
- b) Teplotní citlivost musí být $\pm 0,05$ K
- c) Snímač teploty musí být pokrytý punčoškou, která neustále přivádí destilovanou vodu
- d) Punčoška musí pevně přiléhat a dosahovat alespoň 2 cm přes snímač a musí být čistá
- e) Snímač musí být chráněn před přímým slunečním světlem a jinými zdroji tepla
- f) Teploměr musí být v blízkosti suchého teploměru
- g) Rychlost vzduchu na teploměru musí být udržována mezi $3-6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- h) Teplota destilované vody musí mít přibližnou teplotu jako teplota mokrého teploměru

Relativní vlhkost vstupujícího vzduchu musí být měřena pomocí vlhkoměrů (např. kapacitních) s přesností $\pm 3 \%$ se stejnými ochrannými požadavky jako u suchého teploměru.

Průtok vody

Tabulka 2: Měřící metody průtoku vody

Měřící metody průtoku	Typická linearita v % z průtoku
Pitotova/Prandtlova trubice	$\pm 1 / \pm 3$
Turbine metry	$\pm 0,5 / \pm 1$
Elektromagnetické měřící zařízení	$\pm 0,5 / \pm 4$
Ultrazvukové měřící zařízení	$\pm 0,1 / \pm 1$
Škracení měřících zařízení	Záleží na rozdílu měření tlaku
Počítadla (pokud je průtok konstantní)	Záleží na typu počítadla

Rychlost průtoku teplé vody se měří. Měří se v potrubí studené vody, pokud místní podmínky neumožňují měření v potrubí teplé vody.

Výkon ventilátoru

Měří se pouze elektrická energie, kterou ventilátor využívá. Příkon se určí měřením napětí, proudu a účinníku, nebo přímým měřením příkonu.

Nátoková výška

Je celkový tlakový rozdíl mezi smluvním vstupem a výstupem věže.

Měření větru

Střední rychlost větru nesmí překročit $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ během doby měření. Pokud je rychlost větru v blízkosti této hodnoty, může být použito kontinuální měření. V takovém případě poryvy s více než $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nesmí být více než 10krát během jedné hodiny nebo déle než jednu minutu (kumulovaná hodnota). Rychlost větru se měří ve výšce 1 m až 1,5 m nad převýšením rozvodů vody, a pokud možno v otevřeném prostoru a bez překážek a mimo vliv chladící věže.

Měření se obvykle provádí pomocí otočného šálku nebo rotující lopatky anemometru; obecný směr větru může být stanoven za použití lopatkové typu zařízení.

3.4 Počet měřících zařízení

Minimální počet měřících zařízení, která budou umístěna na chladicí věži dle všech požadavků, které jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Počet měřících zařízení

Č.	Parametr	Min. číslo M	Uspořádání
1	Průtok vody m	M=1 pro každé přívodní potrubí	Dle přijatých standardů
2	Teplota teplé vody t_h	M=1 pro každé přívodní potrubí	V hlavním přívodním potrubí
3	Teplota studené vody t_c	M \geq 2 pro každý výstup	
4	Teplota mokrého teploměru	$M \geq 0,5 \left(\frac{A}{m^2}\right)^{0,4}$ M \geq 2	
5	Výkon ventilátoru F_p	M=1	Na motoru
6	Nátoková výška Δp_{io}	M=1	

3.5 Doba měření

Doba trvání zkoušky musí být volena s přihlédnutím ke kolísání teplot vzduchu a rozptylu provozních parametrů k získání dostatečného počtu (min. 10) platných hodnot. Časová lhůta je minimálně 1 hodina, ale ne více než 8 hodin. K mechanickému návrhu, standardizované chladicí věže je tepelná časová prodleva poměrně malá (například 2 minuty) a obecně nemusí být brána v úvahu. Ale pokud je tento časový interval větší než 2 minuty, zkušební doba se prodlužuje o podobné množství a zkušební průměry musí být založeny na kompenzačním časovém rozpětí, takže naměřené hodnoty budou představovat skutečný výkon věže.

$$S_1 = \frac{Q_B}{60(m + m_b)} \quad (1)$$

Kde tepelné zpoždění přesáhne 5 minut, se předpokládá, že doba odečtu nízkých teplot vody obsahuje odpovídající času za dobu dalších naměřených.

4 Norma EN 14705:2005

Normu vytvořil Evropský normalizační úřad (CEN) [2] Výměníky tepla - Metoda měření a hodnocení tepelného výkonu mokré chladicí věže. Vznikla v roce 2005. Podrobnosti jsou uvedeny v [2].

4.1 Podmínky měření

Měření musí probíhat za dobrého počasí (mlha, déšť apod.). Podmínky si dohodnou zúčastněné strany.

Cirkulující voda nesmí obsahovat více než 100 ppm ropy, dehtu nebo tuhých látek.

- ± 10 % objemový průtok cirkulující vody
- ± 20 % rozsahu chlazení
- ± 20 % tepelné zátěže

V průběhu 1 hodiny na konci měření

- Průtok vody $\leq \pm 2$ % za hodinu
- Tepelná zátěž $\leq \pm 5$ % za hodinu
- Okolní teplota vlhkého teploměru $\leq 1 \text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$

4.2 Měřené veličiny

Následuje seznam všech měřitelných veličin, které norma uvádí.

Tabulka 4: Seznam měřených veličin

Č.	Měřené parametry
1	Vstupní teplota vzduchu
2	vstupní teplota mokrého teploměru nebo relativní vlhkost
3	Atmosférický tlak, 10 m nad zemí
4	Rychlost větru, 10 m nad zemí
5	Směr větru, 10 m nad zemí
6	Okolní teplota, 10 m nad zemí
7	Okolní teplota mokrého teploměru, 10 m nad zemí
8	Atmosférický tlak
11	Průtok teplé vody
12	Teplota teplé vody
13	Teplota studené vody
14	Rychlost proudění studené vody, pokud je třeba
15	Nátoková výška
31	Výkon ventilátoru

41	Teplota doplňkové vody
42	Průtok doplňkové vody
43	Průtok technologické vody

4.3 Měření a měřící zařízení

V následující kapitole jsou popsány požadavky na měřící zařízení a jejich rozmístění. Všechna zařízení musí být kalibrována.

Měření vzduchu

Pomocí anemometru. Jedno zařízení je dostačující. Pro měření otevřeného pole musí být zařízení ve výšce 10 m nad zemí na otevřeném místě v min. vzdálenosti 300 m od překážky (např. chladicí věže, budov aj.) Pokud to není možné, všechny zúčastněné strany dospějí k vzájemné dohodě.

Měření teploty suchého teploměru okolního vzduchu a vlhkého teploměru nebo relativní vlhkosti při atmosférickém tlaku.

Hodnoty se měří ve výšce 10 m nad zemí v okolí místa měření rychlosti a směru větru. V případě potřeby musí být průměrná vertikální okolní teplota suchého teploměru měřená v obklopení chladicí věže mezi výškou středu vstupu vzduchu a až dvojnásobkem výšky chladicí věže. Sondy musejí být chráněny před slunečním zářením a deštěm.

Detekce deště

Měření pomocí srážkoměru popř. vizuální kontrolou.

Měření vstupujícího vzduchu suchého teploměru a teplota vlhkého teploměru nebo relativní vlhkosti

Veličiny se měří v blízkosti přívodu vzduchu na maximální vzdálenosti 1,5 m. Minimální počet sond musí být $n_c \cdot n_v$, kde n_c = počet sond po obvodu, n_v = počet sond podél výšky přívodu vzduchu (viz. tabulka 5). Kde se používá několik sond, musí být rozloženy v pravidelných intervalech v obvodovém i

svislém směru. Pokud se sondy nacházejí pouze v jedné úrovni, musí být přednostně nainstalované ve středu přívodu vzduchu. Sondy musejí být chráněny před slunečním zářením a deštěm.

Měření a výpočet absolutní a relativní vlhkosti okolního vzduchu

Měření vlhkosti prostředí se provádí buď za použití tří odsávacích psychrometrů, nebo tří vlhkoměrů. Tyto zařízení musejí být chráněny před slunečním zářením a deštěm a jsou umístěny ve výšce 10 m nad úrovní terénu v blízkosti měření rychlosti a směru větru.

Měření atmosférického tlaku

Atmosférický tlak se měří pomocí absolutního tlakového snímače a je chráněn proti účinkům větru.

Stanovení teploty teplé vody

- a) Měření teploty cirkulující vody v chladicí věži
 - Teplota se měří v distribučním potrubí
 - V případě několika přívodních potrubí v každém zvlášť
 - Měřicí zařízení musí obsahovat alespoň 3 sondy
- b) Výpočet průměrné teploty teplé vody
 - Průměrná teplota se rovná aritmetickému průměru
 - Více vstupů - průměrná teplota se vypočítá vážením teploty podle odpovídajících toků

Stanovení teploty doplňkové vody

- Na vstupu do vodního okruhu chlazení
- 3 sondy
- Průměrná teplota se rovná aritmetickému průměru naměřených hodnot

Stanovení teploty technologické vody

- Měří se na výtoku z chladicí věže

- 3 sondy
- Průměrná teplota se rovná aritmetickému průměru naměřených hodnot

Stanovení teploty ochlazené vody

- teplota cirkulující vody se měří uvnitř potrubí, na výstupu chladicí věže

Průtok vody

Existují dva typy průtoků vody, které vstupují a opouštějí chladicí věže:

- a) Průtoky s časovým zpožděním (čerpadel) – tlakové ztráty musejí být konstantní
- b) Variabilní průtoky v závislosti na nastavení (hladiny vody, ventily,...)

Měření cirkulujícího průtoku vody

V závislosti na typu chladicího okruhu, je tento průtok neměnný nebo proměnlivý.

- a) Neměnný – měření pro každý systém čerpadel, dle ISO 2975-3
- b) Proměnlivý – pomocí redukčních zařízení (EN ISO 5167-1, ISO/TR 3313) nebo přepadem (ISO 1438-1)

Měření doplňkové/technologické vody a objemový průtok

Měření se provádí buď absolutním způsobem na základě standardizovaných Redukční zařízení (EN ISO 5167-1 a ISO / TR 3313), nebo pomocí standardizovaným přepadem (viz ISO 1438-1), nebo nepřímý způsob, který vyžaduje předběžnou kalibraci.

4.4 Počet měřících zařízení

Minimální počet měřících zařízení, která budou umístěna na chladicí věži dle všech požadavků, které jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Počet měřících zařízení

Č.	Parametr	Minimální počet	Poznámka
1	Průtok vody	1 pro každou trubku	V potrubí
2	Teplota teplé vody	$t_t = 0,5 \frac{A}{m^2}$ min. 3 sondy na jedno potrubí	Uprostřed toku
3	Teplota studené vody	$t_s = 2,5(q_{me} \cdot 10^{-3})^{\frac{1}{2}}$	Stanovení v klíčových bodech rozdělením na rovné úseky. Pro hloubku min. 1,5 m dvou měřících tratí za sebou
4	Vstupní teplota mokrého a suchého teploměru	$n_c = \left L_{ai}^{0,3} + 0,5 \right _{int}$ $n_v = \left \frac{h_{ai}}{6} + 1 \right _{int}$	
5	Relativní vlhkost okolního vzduchu	$n_c = \left L_{ai}^{0,3} + 0,5 \right _{int}$ $n_v \geq 1$	Pokud se neměří mokrým teploměrem
6	Tlak vzduchu	1	
7	Rychlost vzduchu	1	
8	Výkon ventilátoru	1	Na vstupu proudu
9	Nátoková výška	1	

4.5 Doba měření

Doba měření musí být volena podle změny teploty vzduchu v čase, tak aby bylo dosaženo přesné průměrné hodnoty, která představuje celý den. Pro malé chladicí věže alespoň 2 periody, pro velké alespoň 10 period. Perioda odpovídá 10 minutám. Získané hodnoty jsou průměrné za jednu periodu. Aby bylo možné dosáhnout přesné průměrné hodnoty podle působení větru, vyžaduje měření alespoň 300 period. Výkyvy teploty vzduchu musí být brány v úvahu.

5 Norma ATC-105 (00)

Normu vytvořil Cooling Technology Institute (CTI) [3]. Přejímací předpis pro mokré chladicí věže. Vznikla v roce 2003 v USA. Podrobnosti jsou uvedeny v [3].

5.1 Podmínky měření

Věž musí být v dobrém stavu, čistá a průchodná. Voda nesmí mít více než 5 000 ppm částic, cirkulující voda nesmí mít více než 10 ppm oleje, dehtu atd. Cirkulace průtoku vody nesmí kolísat o více než 2 %, tepelné zatížení a rozsah o více než 5 %.

Během měření, musí být zajištěno, aby se zkušební podmínky neměnily o více než:

- Teplota vlhkého teploměru $\pm 8,5$ °C
- Teplota suchého teploměru ± 14 °C
- Rozsah ± 20 %
- Průtok vody ± 10 %
- Barometrický tlak $\pm 3,5$ kPa
- Výkon ventilátoru ± 10 %

Teplota psychrometrů může během měření kolísat, lineární úpravou metodou nejmenších čtverců nesmí v průměru za zkušební období překročit tyto hodnoty:

- Teplota vlhkého teploměru 1 °C·h⁻¹
- Teplota suchého teploměru 3 °C·h⁻¹

Maximální odchylka:

- Teplota vlhkého teploměru $\pm 1,5$ °C
- Teplota suchého teploměru $\pm 4,5$ °C

5.2 Měřené veličiny

Následuje seznam všech měřitelných veličin, které norma uvádí.

Tabulka 6: Seznam měřených veličin

Č.	Měřené veličiny
1	Teplota vlhkého teploměru
2	Teplota suchého teploměru
3	Teplota studené vody
4	Teplota teplé vody
5	Průtok vody
6	Nátoková výška
7	Výkon ventilátoru
8	Rychlost větru
9	Teplota doplňkové vody
10	Průtok doplňkové vody
11	Teplota technologické vody
12	Průtok technologické vody
13	Barometrický tlak

5.3 Měření a měřící zařízení

V následující kapitole jsou popsány požadavky na měřící zařízení a jejich rozmístění. Protokol o zkoušce musí obsahovat individuální identifikaci a umístění pro každý nástroj použitý při zkoušce tak, že kalibrace datum a historie lze dohledat. Interval kalibrace jednotlivých čidel je uveden v tabulce 7. Všechna zařízení musí být kalibrována.

Tabulka 7: Kalibrační frekvence měřících zařízení

Zařízení	Minimální kalibrační frekvence
Teplotní senzory	Do 3 měsíců před použitím
Průtokoměry vody	Po třech letech
Elektroměry	Každoročně
Zařízení na měření rychlosti a směru větru	Každoročně

Měření průtoku vody

Měříme:

- cirkulaci průtoku vody do věže
- průtok doplňkové vody*
- průtok technologické vody*

**pokud není zastaveno před zkouškou*

Norma CTI Bulletin STD-146 [4] podrobně popisuje Pitotovy trubice včetně všech souvisejících rovnic, požadavky na potrubí, vlastnosti vody a manometrů.

Měření teploty vody

Měření teploty vody se odkazuje na normu ASME PTC-19.3 [5].

Měřicí zařízení by měli mít následující vlastnosti:

- a) Ukazatel odstupňován po 0,1 °C
- b) Teplotní citlivost $\pm 0,05$ °C
- c) Teplotní čidla musí být umístěna, tam kde je voda promíchávána

Teplota teplé cirkulující vody se měří v distribučním systému nebo na vstupu do chladicí věže. Teplota studené cirkulující vody se měří na výtlaku čerpadla. Teplota doplňkové vody se měří na vstupu do systému. Teplota technologické vody se měří na výstupu ze systému.

Teplota vstupujícího vzduchu

Vstupní teplota suchého teploměru se měří u věží s přirozeným tahem, umělým tahem a u mokřých/suchých chladících věží. Teplota se měří suchým teploměrem.

Vstupní teplota vlhkého teploměru

Vlhký teploměr musí mít mechanické sání

- a) Ukazatel odstupňován po 0,1 °C
- b) Teplotní citlivost $\pm 0,05$ °C
- c) Teplotní čidla musejí být chráněna před slunečními paprsky a jiným zdroji tepla
- d) Čidlo musí být potaženo punčoškou, které je neustále vlhčena destilovanou vodou
- e) Teplota destilované vody musí být přibližná měřené teplotě vlhkým teploměrem
- f) Punčoška přiléhá na čidlo a sahá 2 cm přes něj a musí být udržována v čistotě
- g) Rychlost vzduchu kolem teplotního čidla musí být 4,5 - 5,5 m·s⁻¹

Měřicí zařízení musí být umístěno do 1,5m od přívodu vzduchu.

Vstupní teplota suchého teploměru

- a) Ukazatel odstupňován po 0,1 °C
- b) Teplotní citlivost $\pm 0,05$ °C
- c) Teplotní čidla musejí být chráněna před slunečními paprsky a jiným zdroji tepla
- d) Rychlost vzduchu kolem teplotního čidla musí být alespoň $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Umístění suchého teploměru je stejné jako vlhkého teploměru.

Rychlost a směr větru

Měří se anemometrem a větrnou korouhví umístěné na volném prostranství v dostatečné vzdálenosti, aby se předešlo vlivům způsobeným chladící věží.

Nátoková výška

- a) Celkový tlak nad atmosférickým tlakem vyjádřený v metrech vody, na ose přívodu potrubí
- b) Svislá vzdálenost v metrech od osy vstupního potrubí na hranu nádrže

Výstupní rozhraní ventilátoru

Výkon se stanoví přímým měřením vstupních kW, nebo měřením proudu, napětí. Další způsoby jsou uvedeny v normě ASME PTC-19.6 [6].

Rozbor vody

Vzorek vody musí být odebrán během zkoušky. Rozbor provede renomovaná laboratoř.

5.4 Počet měřících zařízení

Pro teplotu mokrého teploměru:

$$n = K \cdot A^{0,4} \quad (2)$$

K = konstanta; 0,52 pro SI; 0,2 pro IP

Norma více nespecifikuje, kolik měřících zařízení je potřeba pro měřené veličiny.

5.5 Doba měření

Doba měření se liší podle typu chladicí věže. Pro věže s přirozeným tahem je doporučeno minimálně 6 hodinových měření. Mohou probíhat v průběhu alespoň 2 dní. Pro věže s umělým tahem je minimální délka měření 1 hodina. Pokud je tepelná časová prodleva větší než 5 minut, musí být měření prodlouženo právě o tuto dobu.

6 Porovnání norem

Norma ATC - 105 [3] popisuje současně věže s přirozeným a umělým tahem. Neudává přesné počty měřících zařízení ani jejich typy, ale popisuje přesně intervaly jejich kalibrace. Na podrobnější popis norma odkazuje na normu ASME PTC-19.6 [4]. Naopak Evropské normy se podrobně věnují počtu jednotlivých měřících zařízení. Norma EN 14705 [2] navazuje a rozšiřuje normu EN 13741 [1]. EN 14705 [2] vychází z Německé normy DIN 1947 [7]. Norma neuvádí způsob měření průtoku vzduchu, avšak s tímto parametrem pracuje ve výpočtových metodách. Normy se shodují ve většině měřených parametrů. Nejpodrobněji popisují požadavky na měření teploty, zvláště pak teplotu mokrého a suchého teploměru.

Evropské normy více specifikují dobu měření, která má reprezentovat průběh celého dne. Od ranních, odpoledních nebo nočních teplot a vlivů povětrnostních podmínek. Délka jednotlivých měření je pro malé věže minimálně 2x10 minut a pro velké 10x10 minut. Americká norma požaduje minimálně 6 hodinových měření v průběhu 2 dní. Čím je měření delší, tím přesnější výsledky získáme.

Norma PTC 19.3 [5] byla v roce 2010 přepsána, neboť byly nalezeny zásadní chyby, kvůli kterým byla na 15 let vyřazena elektrárna v Japonsku. Avšak norma ATC - 105 [3] vydaná v roce 2003 koresponduje se starým vydáním normy PTC 19.3 [5].

7 Návrh měření chladicí věže

Tento návrh vyhovuje všem požadavkům uvedeným v evropských normách EN 13741:2003 a EN 14705:2005. Jedná se o věž s umělým tahem pro průmyslové účely. Věž je tvořena nosnou konstrukcí, chladicím systémem, rozvodem vody, tryskami, eliminátorem, ventilátorem a sběrnou nádobou. Věž má rozměry 3 790 x 3 393 x 6 810 mm (šířka x délka x výška). Průtok vzduchu od 0,5 do 5 m·s⁻¹ a průtok vody 60 až 220 m³·h⁻¹. Maximální měřitelná výška výplně je 3 metry. Příkon ventilátoru je 8,5 kW. Věž se bude nacházet ve vnitřních prostorách laboratoře. Maximální vstupní teplota je 65 °C. Rozvod vody je tvořen dvěma přívodními trubkami, na kterých jsou umístěny rozstříkovací trysky.

Měření teploty bude provedeno pomocí odporového platinového teploměru Pt 100. Měření vlhkosti bude provedeno pomocí psychrometrů, tudíž měření teploty suchého a mokrého teploměru pomocí Pt 100.

7.1 Měřicí zařízení – počet, seznam

Následuje výpočet množství měřících zařízení. Počty měřících zařízení souvisí především s rozměry věže, obvodem a výškou. Některé parametry není možné měřit.

V součtu bude třeba 25 teplotních čidel Pt 100, 2 absolutní tlakové snímače, jeden vestavěný indukční průtokoměr a jeden anemometr.

Výpočet:

$$t_s = 2,5(q_{me} \cdot 10^{-3})^{\frac{1}{2}} = 1 \quad (3)$$

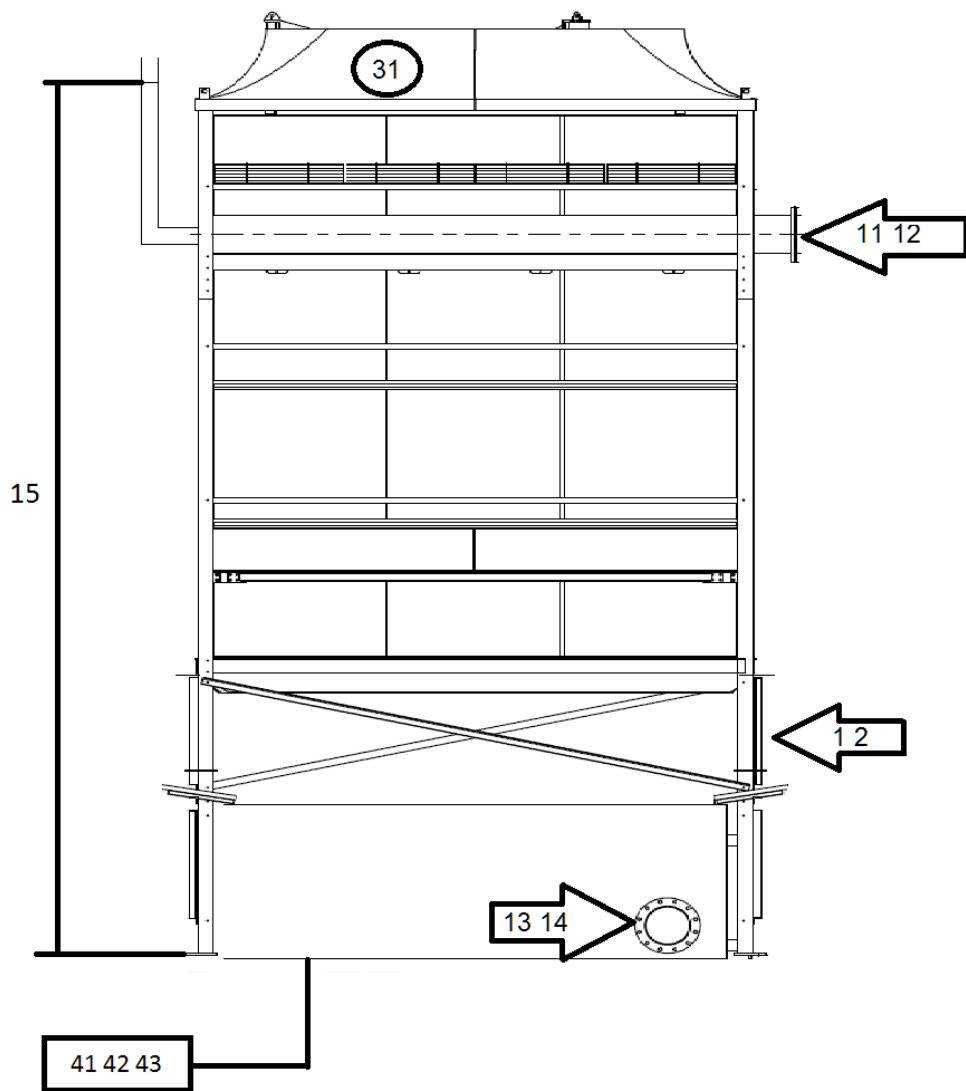
$$n_c = \left| L_{ai}^{0,3} + 0,5 \right|_{int} = \left| 3,43^{0,3} + 0,5 \right| = 8 \quad (4)$$

$$n_v = \left| \frac{h_{ai}}{6} + 1 \right| = \left| \frac{1}{6} + 1 \right| = 1 \quad (5)$$

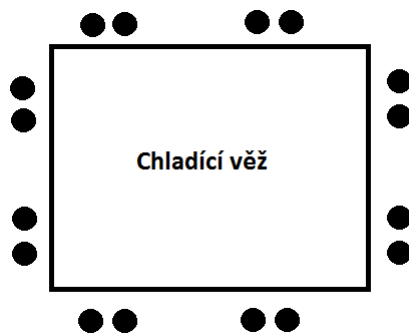
Tabulka 8: Počet měřících zařízení návrhu měření

Č.	Parametr	Minimální počet	Měřící zařízení
1	Vstupní teplota vzduchu	$n_c = 8$ $n_v = 1$	Pt 100
2	Vstupní teplota mokrého a suchého teploměru	$n_c = 8$ $n_v = 1$	Pt 100
3	Atmosférický tlak, 10 m nad zemí	1	Absolutní tlakový snímač
4	Rychlost větru, 10 m nad zemí	1	Anemometr
5	Směr větru, 10 m nad zemí	1	Anemometr
6	Okolní teplota, 10 m nad zemí	1	Pt 100
7	Okolní teplota mokrého teploměru, 10 m nad zemí	1	Pt 100
8	Atmosférický tlak	1	Absolutní tlakový snímač
11	Průtok vody	1	Vestavěný indukční průtokoměr
12	Teplota teplé vody	3	Pt 100
13	Teplota studené vody	1	Pt 100
14	Rychlost proudění studené vody	1	Nebude měřeno
15	Nátoková výška	1	Určí se výpočtem
31	Výkon ventilátoru	1	Nebude měřeno
41	Teplota doplňkové vody	1	Pt 100
42	Průtok doplňkové vody	1	Nebude měřeno
43	Průtok technologické vody	1	Nebude měřeno

3 4 5 6 7 8
10 m nad zemí



Obr. 1: Rozmístění měřících zařízení na chladicí věži



Obrázek 2: Rozmístění teplotních čidel

8 Výpočtové postupy

Pro návrh věží se používá Merkelovo číslo Me . Ze známého Merkelova čísla a podmínek na vstupu do chladicí věže, vzduchu a vody, dopočítáme parametry na výstupu z chladicí věže. Merkelovo číslo se získává experimentálně. Existuje několik numerických integračních metod, které jsou aproximací výpočtu Merkelova integrálu, nejnámější a v praxi nejvyužívanější je Chebysheva metoda.

Aplikace Chebysheva metody

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{(b-a)}{4} [f(x_1) + f(x_2) + f(x_3) + f(x_4)] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Me &= \frac{h_d a_{fi} A_{fr} L_{fi}}{m_w} = \frac{h_d a_{fi} L_{fi}}{G_w} = \int_{T_{wo}}^{T_{wi}} \frac{c_{pw} dT_w}{i_{masw} - i_{ma}} \\ &\approx \frac{(T_{wi} - T_{wo})}{4} \left[\frac{c_{pw1}}{\Delta i_{(1)}} + \frac{c_{pw2}}{\Delta i_{(2)}} + \frac{c_{pw3}}{\Delta i_{(3)}} + \frac{c_{pw4}}{\Delta i_{(4)}} \right] \\ &\approx \frac{c_{pwm} (T_{wi} - T_{wo})}{4} \left[\frac{1}{\Delta i_{(1)}} + \frac{1}{\Delta i_{(2)}} + \frac{1}{\Delta i_{(3)}} + \frac{1}{\Delta i_{(4)}} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Převod teploty na Kelviny

$$T_{aiK} = 273,15 + T_{ai} \quad (8)$$

$$T_{wbK} = 273,15 + T_{wb} \quad (9)$$

$$T_{wiK} = 273,15 + T_{wi} \quad (10)$$

$$T_{woK} = 273,15 + T_{wo} \quad (11)$$

Měrná tepelná kapacita pro střední teplotu vody

$$T_w = \frac{T_{wiK} + T_{woK}}{2} \quad (12)$$

$$c_{pwm} = (8,15599 \cdot 10^3) - (2,80627 \cdot 10 \cdot T_w) + (5,11283 \cdot 10^{-2} \cdot T_w^2) - (2,17582 \cdot 10^{-13} \cdot T_w^6) \quad (13)$$

Průběžné teploty vody

$$T_{w1K} = T_{woK} + 0,1 \cdot (T_{wiK} - T_{woK}) \quad (14)$$

$$T_{w2K} = T_{woK} + 0,4 \cdot (T_{wiK} - T_{woK}) \quad (15)$$

$$T_{w3K} = T_{woK} + 0,6 \cdot (T_{wiK} - T_{woK}) \quad (16)$$

$$T_{w4K} = T_{woK} + 0,9 \cdot (T_{wiK} - T_{woK}) \quad (17)$$

Měrná tepelná kapacita suchého vzduchu

$$T_{ais} = \frac{T_{aiK} + 273,15}{2} \quad (18)$$

$$c_{pai} = 1045,356 - (3,161783 \cdot 10^{-1} \cdot T_{ais}) + (7,083814 \cdot 10^{-4} \cdot T_{ais}^2) - (2,705209 \cdot 10^{-7} \cdot T_{ais}^3) \quad (19)$$

Měrná tepelná kapacita vodní páry

$$c_{pvi} = 1360,5 + (2,31334 \cdot T_{ais}) - (2,46784 \cdot 10^{-10} \cdot T_{ais}^5) + (5,91332 \cdot 10^{-13} \cdot T_{ais}^6) \quad (20)$$

Tlak vodní páry pro teplotu mokrého teploměru

$$z = 10,79586 \left(1 - \frac{273,16}{T_{wbK}}\right) + 5,02808 \log_{10} \frac{273,16}{T_{wbK}} + 1,505474 \cdot 10^{-4} \left[1 - 10^{-8,29692 \left(\frac{T_{wbK}}{273,16} - 1\right)}\right] + 4,2873 \cdot 10^{-4} \left[10^{4,76955 \left(1 - \frac{273,16}{T_{wbK}}\right)} - 1\right] + 2,786118312 \quad (21)$$

$$p_{vw} = 10^z \quad (22)$$

Měrná vlhkost

$$w = \frac{2501,6 - 2,3263(T_{wbK} - 273,15)}{2501,6 + 1,8577 \cdot (T_{aiK} - 273,15) - 4,184(T_{wbK} - 273,15)} \cdot \frac{0,62509 p_{vw}}{p_a - (1,005 \cdot p_{vw})} - \frac{1,00416(T_{aiK} - T_{wbK})}{2501,6 + 1,8577(T_{aiK} - 273,15) - 4,184(T_{wbK} - 273,15)} \quad (23)$$

Latentní teplo pro 273,15 K

$$i_{fgwo} = 3,4831814 \cdot 10^6 - 5,8627703 \cdot 10^3 \cdot 273,15 + 12,139568 \cdot 273,15^2 - 1,40290431 \cdot 10^{-2} \cdot 273,15^3 \quad (24)$$

Entalpie vzduchu na vstupu

$$i_{mai} = c_{pai} (T_{aiK} - 273,15) + w (i_{fgwo} + c_{pvi} (T_{aiK} - 273,15)) \quad (25)$$

Měrná tepelná kapacita pro průběžné teploty

$i = 1,2,3,4$

$$T_{wiKs} = \frac{T_{wiK} + 273,15}{2} \quad (26)$$

$$c_{pa(i)} = 1,045356 \cdot 10^3 - 3,161783 \cdot 10^{-1} \cdot T_{wiKs} + 7,083814 \cdot 10^{-4} \cdot T_{wiKs}^2 - 2,705209 \cdot 10^{-7} \cdot T_{wiKs}^3 \quad (27)$$

$$c_{pv(i)} = 1360,5 + 2,31334 \cdot T_{wiKs} - 2,46784 \cdot 10^{-10} \cdot T_{wiKs}^5 + 5,91332 \cdot 10^{-13} \cdot T_{wiKs}^6 \quad (28)$$

Tlak vodní páry pro průměrné teploty

$$\begin{aligned} z_i = & 10,79586 \cdot \left(1 - \frac{273,16}{T_{wiK}}\right) + 5,02808 \log_{10} \frac{273,16}{T_{wiK}} + 1,50474 \\ & \cdot 10^{-4} \left[1 - 10^{-829692 \left(\frac{T_{wiK}}{273,16} - 1\right)}\right] + 4,2873 \\ & \cdot 10^{-4} \left[10^{4,76955 \left(1 - \frac{273,16}{T_{wiK}}\right)} - 1\right] + 2,786118312 \end{aligned} \quad (29)$$

$$p_{v(i)} = 10^{z_i} \quad (30)$$

Měrná vlhkost

$$w_i = \frac{0,62509 \cdot p_{v(i)}}{p_a - (1,005 \cdot p_{v(i)})} \quad (31)$$

Entalpie nasyceného vzduchu pro průměrné teploty

$$\dot{i}_{mai(i)} = c_{pa(i)} \cdot (T_{wiK} - 273,15) + w_i \left(\dot{i}_{fgw} + c_{pv(i)}(T_{wiK} - 273,15)\right) \quad (32)$$

Entalpie vzduchu (jiný postup)

$$\dot{i}_{ma(i)} = m_w \cdot c_{pwm} \cdot \frac{T_{wiK} - T_{woK}}{m_a} + \dot{i}_{mai} \quad (33)$$

Rozdíl entalpií

$$\Delta \dot{i}_i = \dot{i}_{mai(i)} - \dot{i}_{ma(i)} \quad (34)$$

9 Aplikace výpočtové metody na měření gridových výplní

Výpočtové postupy dle kapitoly 8 byly aplikovány na měření gridových výplní. Cílem je získání závislost Merkelova čísla na poměru hmotnostního průtoku vody a vzduchu.

9.1 Popis standu chladicí věže

Pro experimentální měření parametrů chladicích výplní byl použit funkční model protiproudé chladicí věže s nuceným tahem.

Kostra modelu je sestavena z hliníkových profilových tyčí čtvercového průřezu. Model chladicí věže má čtvercový půdorys o rozměrech 1,67 x 1,67 m (světelné rozměry 1,47 x 1,47 m) a sahá do výšky 5 m. Stěny modelu jsou tvořeny z plexiskla a polypropylenu.

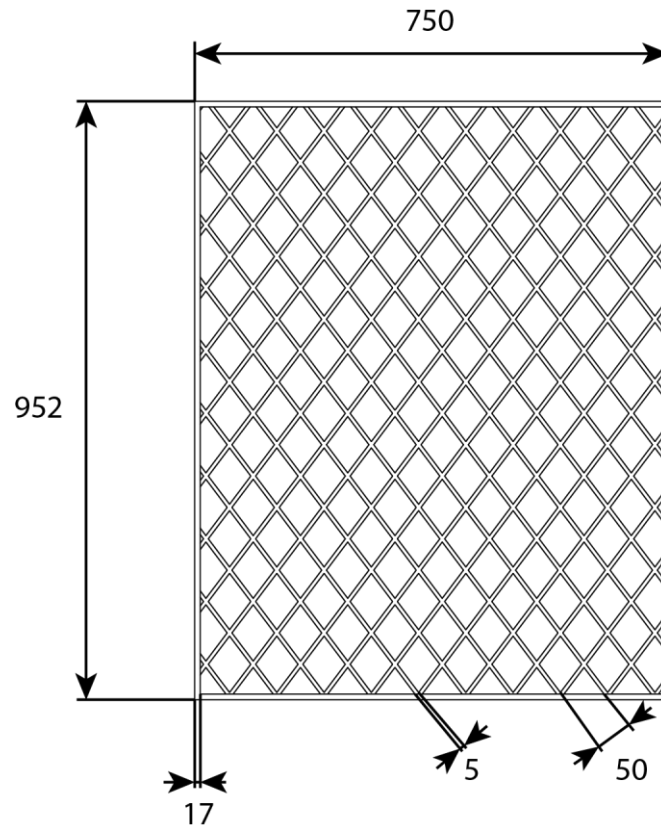
Modelová chladicí věž je řešena jako odsávaná. Urychlení proudění vzduchu je řešeno radiálním středotlakým ventilátorem o výkonu 37kW a maximální otáčky jsou 1 475 ot. \cdot min.⁻¹. Propojení ventilátoru se samotnou modelovou chladicí věží je řešeno vzduchotechnickým systémem o průřezu 1 m². Průtok vzduchu ventilátorem je 54 000 m³·h⁻¹ při statickém tlaku cca 160 Pa. Otáčky ventilátoru a tím i průtoky věží lze nastavovat pomocí frekvenčního měniče. Na výtlačnou stranu radiálního ventilátoru je připojen vzduchotechnický systém, který je vyveden světlíkem na střechu laboratoře. Výtlačný tlak vzduchu vně laboratoře je realizován z toho důvodu, aby parametry na vstupu byly neměnné. Kdyby, byl výtlačný tlak vzduchu vyveden do laboratoře, byly by ovlivněny vstupní parametry během probíhajícího měření (laboratoř není nekonečně rozlehlá). Za výtlačnou částí ventilátoru je umístěn zúžený prostor, ve kterém je umístěno několik odběrů celkového tlaku a dva odběry statického tlaku.

Rozdílem těchto tlaků je zjištěn tlak dynamický, z něhož je vyhodnocena rychlost proudění vzduchu v měřicím prostoru. Z této rychlosti je následně určen průtok vzduchu věží. V tomto měřicím prostoru je kromě tlakových odběrů umístěno i teplotní čidlo (Pt100) a kapacitní vlhkostní čidlo pro určení parametrů vzduchu proudícího tímto prostorem.

Voda je do chladicí věže přivedená z vyvýšené vodní nádrže pomocí PVC potrubí. Do tohoto tlakového vodovodního potrubí je vřazen indukční průtokoměr, pomocí kterého je možné kontrolovat velikost objemového průtoku vody, a čerpadlo, kterým je proudící voda urychlována.

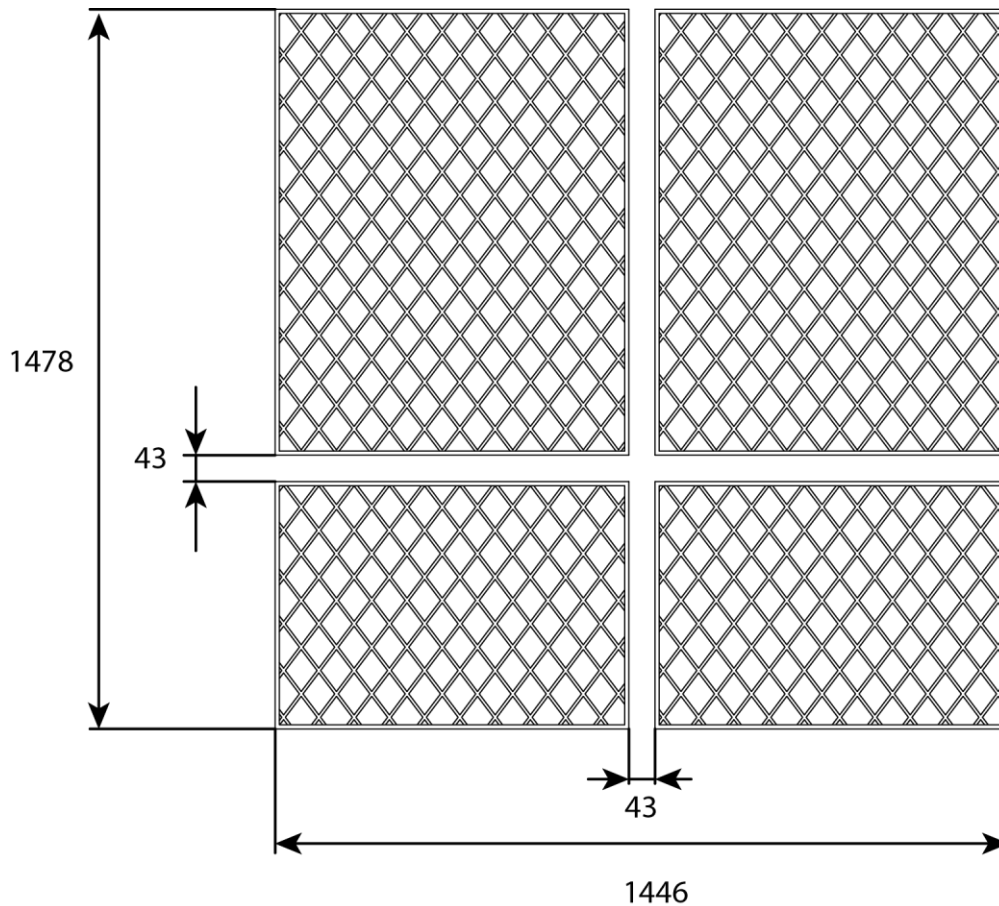
9.2 Popis gridové chladicí výplně

Gridová výplň má tvar mřížky dle obr. 3. Výška výplně je 24 mm (okraj výplně). Vlastní oka výplně mají výšku 4 mm (stěna oka má tvar písmena T).



Obr. 3: Jedna část gridové výplně

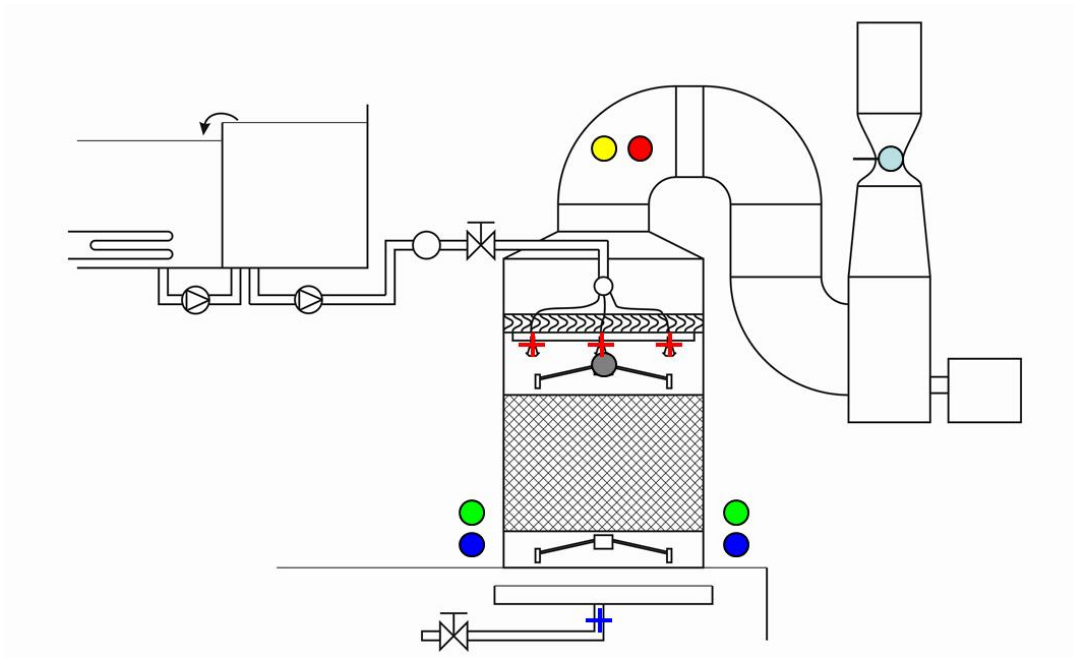
Pro potřeby experimentálního standu byla gridová výplň složena do jedné vrstvy z 3 kusů gridové výplně. 1 kus gridové výplně byl rozříznut na stejné 2 půlky a složen dle obr. 4. Takto vznikla jedna vrstva gridové výplně používaná během experimentů. Jednotlivé kusy gridové výplně byly vzájemně spojeny pomocí spojek.



Obr. 4: Patro gridové výplně požadovaných rozměrů


9.3 Nastavení experimentu


Gridové výplně byly měřeny pod úhlem. Vyskládány byly nad sebe v 7 patrech, tak že mezery mezi jednotlivými kusy byly nad sebou a mezi jednotlivé vrstvy byly vloženy distanční trubky. Problémem při naklonění výplně byla jejich nepřiliš pevná konstrukce, v místech spojení jednotlivých částí, protože se především kvůli tíze vody prohýbali. Avšak tento faktor nebude mít, dle analyzovaných výsledků zásadní podíl na účinnosti chlazení.




Obr. 5: Schéma tratě


Parametry vzduchu


průtok 

vstupní teplota 


výstupní teplota 


vstupní vlhkost 


výstupní vlhkost 

statický tlak nad výplní 

Parametry vody

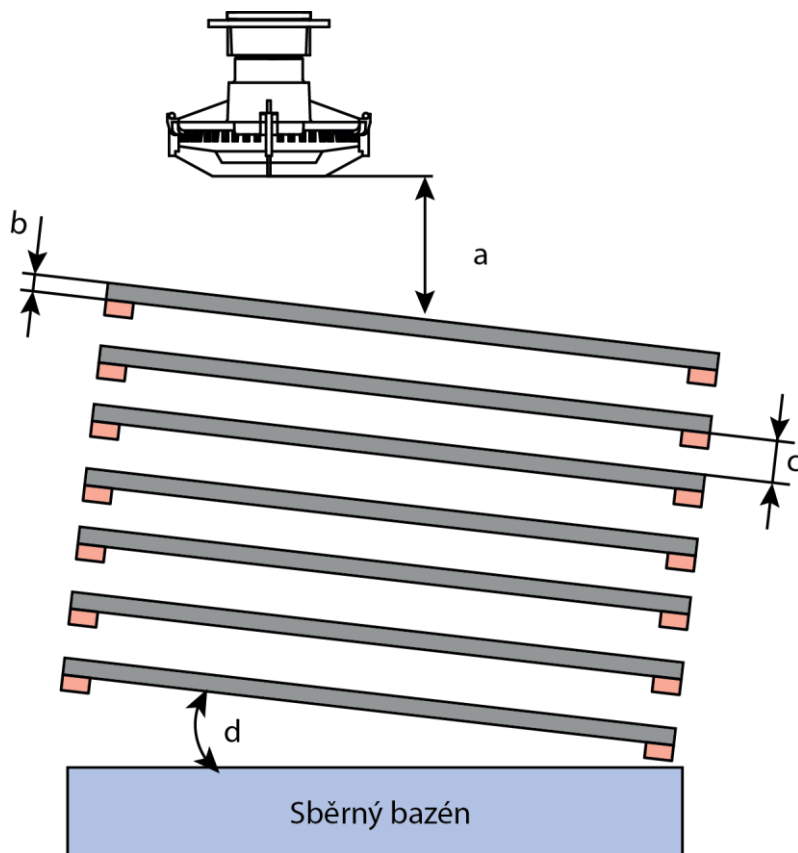
průtok 

vstupní teplota 

výstupní teplota 



Obr. 6: Fotografie tratě



a	150 mm
b	24 mm
c	440 mm
d	17°

Obr. 7: Schéma uspořádání gridových výplní

9.4 Měření

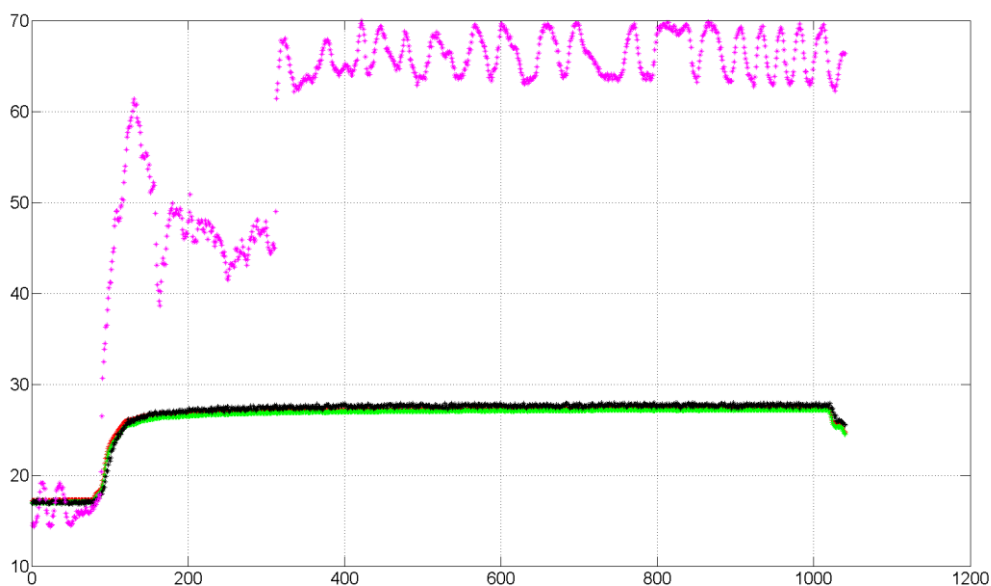
Měření proběhlo pro tři různé průtoky vzduchu, při konstantním průtoku vody. Délka měření byla necelých 20 minut. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9: Naměřené hodnoty

m_a [kg/s]	m_w [kg/s]	T_{ai} [°C]	T_{ao} [°C]	T_{wb} [°C]	T_{wi} [°C]	T_{wo} [°C]	p_b [Pa]
4,3050366	7,29682706	17,84785	26,90858	11,12591633	35,2057	29,5424803	97812,09
5,0559219	7,1937328	15,3471603	25,51896	10,0364955	35,01141	28,8439358	98221,08
5,9252474	7,40028013	15,1671003	21,43899	11,78348825	28,30478	24,1120023	99082,88

9.5 Vyhodnocení a výsledky

Naměřené hodnoty byly zpracovány v programu MATLAB.



Obr. 8: Graf naměřených hodnot v čase

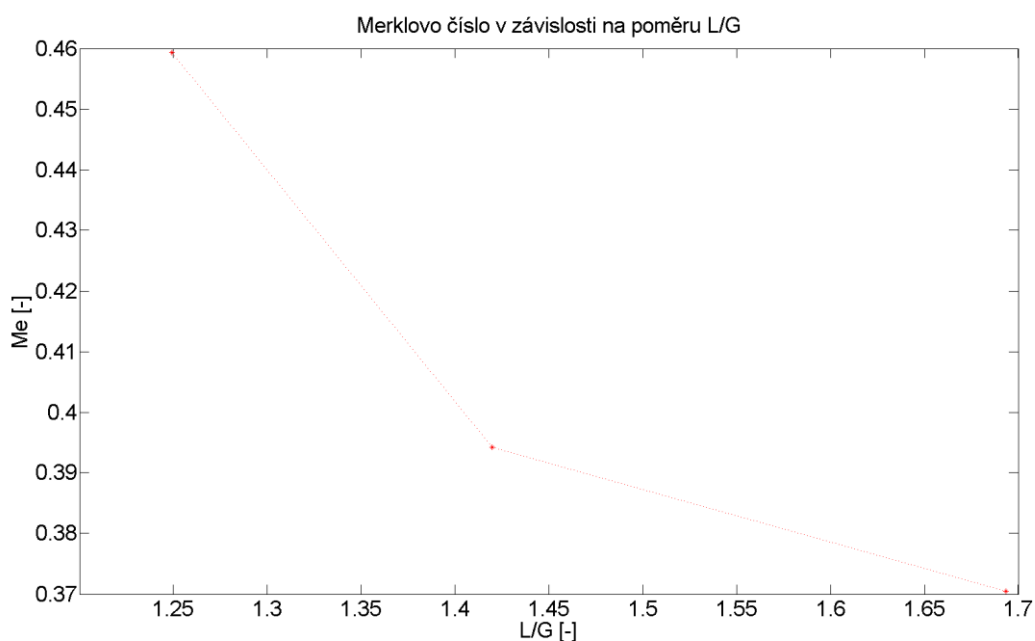
Z grafu je patrné, že jedno z čidel neměřilo správně, důvodem může být poškození nebo nesprávné nastavení čidla. Z toho důvodu je použito několik dalších čidel. Nesprávné hodnoty tedy neuvažujeme. Použijeme hodnoty, kdy bylo měření ustálené, zvolíme si časový úsek, např. 400-800. Takto postupujeme u všech naměřených dat. Tento faktor nám ovlivňuje chybu výsledku.

V následující tabulce je vyhodnoceno měření. Pro jednotlivé body je uvedené merkelovo číslo a hodnota poměru průtoku L/G dále je uvedené sdělené teplo na straně vody i vzduchu a je vypočtena chyba na sděleném teple.

Tabulka 10: Vypočtené hodnoty

L/G [1]	Me [1]	error [1]	$\Delta t [^{\circ}\text{C}]$	$\rho_{\text{airout}} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$\rho_{\text{airin}} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	$\rho_{\text{waterin}} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
1,69331	0,370443	-14,0133	24,07607	1,1265159	1,168128	993,961
1,419753	0,394201	-11,9203	24,96581	1,1377568	1,183204	994,0279
1,249069	0,459344	-3,06769	16,52345	1,1625228	1,193018	996,1465

$h_{\text{in}} [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$	$h_{\text{out}} [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$	$\Delta Q_{\text{water}} [\text{kW}]$	$\Delta Q_{\text{air}} [\text{kW}]$
0,0057768	0,021413002	181,3144	208,9437514
0,005708	0,018983169	194,3809	218,9091923
0,0074694	0,014599379	134,4126	138,2703522



Obr. 9: Graf Merkelova čísla v závislosti na poměru L/G

10 Závěr

Cílem této práce byl rozbor norem a návrh měření, které s nimi bude v souladu. Dále pak aplikace výpočtových postupů na experimentální měření gridových výplní za účelem získání Merkelova čísla.

První část práce se zabývá normami, jejich rozbohem a porovnáním. Následuje aplikování požadavků měření na návrh chladicí věže, která bude reálně fungovat v rámci laboratoře ČVUT v Praze. Návrh je v souladu s evropskými normami, americké normy jsou jen pro srovnání.

Druhá část se zabývá výpočtovým postupem a jeho aplikací na měření gridových výplní. Cílem je získání Merkelova čísla na poměru L/G. Výplně byly měřeny při náklonu 17° celkem v 7 patrech. Měření probíhalo pro 3 různé průtoky vzduchu při stejném průtoku vody. Aplikováním výpočtu pomocí Chebyshevovy metody jsem získal Merkelovo číslo, které dosahovalo největších hodnot při největším průtoku vzduchu. Poměr L/G byl opačný, tedy největších hodnot při nejmenším průtoku. Výsledky jsou zobrazeny v grafu (Obr. 9).

Seznam použité literatury:

- [1] EN 13741, *Thermal performance acceptance testing of mechanical draught series wet towers*, 2003

- [2] EN 14705, *Heat exchangers – Method of measurement and evaluation of thermal performances of wet cooling towers*, 2005

- [3] CTI Code ATC – 105 (00), *Acceptance test code for water cooling towers*, 2003

- [4] CTI Bulletin STD-146, *Standard for Water Flow Measurement*, 2008

- [5] ASME PTC-19.3, *Thermowell Calculation Guide*, 1974

- [6] ASME PTC-19.6, *Electrical measurements in power circuits*, 1955

- [7] DIN 1947, *Wärmetechnische abnahmemessungen an naßkühltürmen*, 1989-05

- [8] D. G. Kröger: *Air-cooled Heat Exchangers and Cooling Towers (Volume I., II.)*, 2004

- [9] Mikyška L., Šebek J.: *Chladící věže provoz a údržba*, SNTL, Praha, 1989