

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky



Bakalářská práce

# Chlazení datových center

Bachelor thesis

## Data center cooling

*Mulenko Martin*

*Vedoucí práce: Ing. Jan Novotný, Ph.D.*

*Studijní program: Teoretický základ strojího inženýrství (TZSI)*

*19. června 2015*

## Anotační list

Jméno autora:	Mulenko Martin
Název bakalářské práce:	Chlazení datových center
Title:	Data center cooling
Rok:	2015
Studijní obor:	Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	Bez oboru
Ústav:	Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí práce:	Ing. Jan Novotný, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran: 54 počet obrázků: 42 počet grafů: 6
Klíčová slova:	Datové centrum, chlazení, server, metrika, free cooling, měření teplot, bypass.
Keywords:	Data center, cooling, server, metrics, free cooling, temperature measurement, bypass
Anotace:	Tato práce se věnuje chlazení datových center. Nejprve se této problematice věnuje obecně. Pojednává o různých možnostech chlazení, vnitřní struktuře datových sálů a jejich metrikách. V druhé části, experimentu, je cílem optimalizovat existující náhradní model jednoho serveru tak, aby se snížila teplota jeho vnitřních komponent.
Abstract:	This bachelor thesis focuses on data center cooling. At first, it deals with these problems in general. It discusses various options of cooling, the internal structure of data halls and quality metrics. The main goal of the second part, the experiment, is to optimize an existing surrogate model of a server in order to reduce the temperature of its internal components.

## Poděkování

Rád bych poděkoval panu **Ing. Janu Novotnému, Ph.D.**, vedoucímu mé bakalářské práce, za jeho odborné konzultace, poskytnuté rady a připomínky k mé práci. Také za zázemí v laboratoři, které jsem mohl využívat. Dále panu **Ing. Janu Koubovi** za pomoc při práci v laboratořích.

Velké poděkování si zaslouží moje **rodina** za jejich neustálou podporu při mém studiu.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 19. června 2015

.....

# Obsah

1.	Datová centra.....	1
1.1.	Co jsou to datová centra? .....	1
1.2.	Struktura datového centra .....	2
1.3.	Historie .....	4
1.4.	Chlazení datových center – úvod .....	5
1.5.	Chlazení datových center – možnosti .....	6
1.6.	Další rozdělení chladící metody free cooling .....	8
1.7.	Uspořádání datových center .....	10
1.8.	Rozdělení zatížení serverů a jejich umístění .....	12
2.	Metriky datových center.....	14
2.1.	Základní dělení .....	14
2.2.	Definice vybraných metrik .....	15
2.3.	Shrnutí metrik .....	18
3.	Prostředky použité při experimentu.....	19
3.1.	Termokamera .....	19
3.2.	Termočlánek.....	21
3.3.	3D tiskárna .....	22
3.4.	Rozhraní PuTTY.....	25
3.5.	Software SOLIDWORKS .....	26
4.	Experiment.....	28
4.1.	Popis serveru .....	28
4.2.	Laboratoř.....	29
4.3.	Optimalizace.....	31
4.4.	Způsob měření .....	33
4.5.	Zpracování hodnot .....	34

Chladič číslo 3 - výkon chlazení 100 % .....	35
Chladič číslo 1 - výkon chlazení 100 % .....	39
5. Závěr .....	43
Bibliografie .....	44
6. Příloha .....	47

## Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 - LAKESIDE TECHNOLOGY CENTER, CHICAGO (FORBES, 2015).....	1
OBRÁZEK 2 - STRUKTURA DATOVÉHO CENTRA (ALTRON, 2015) .....	2
OBRÁZEK 3 - DATOVÝ SÁL (ALTRON, 2015) .....	4
OBRÁZEK 4 - NOVÉ DATOVÉ CENTRUM VE ŠVÉDSKÉM LULEÅ (MILLER, 2011) .....	6
OBRÁZEK 5 - ROZLOŽENÍ TEPLoty V ZÁVISLOSTI NA PRŮMĚRNÉ DENNÍ TEPLOTĚ PŘI TEPLOTĚ CHLADÍCÍ VODY 6/12° (CIATIK TRADE S.R.O., 2012).....	7
OBRÁZEK 6 - ROZLOŽENÍ TEPLoty V ZÁVISLOSTI NA PRŮMĚRNÉ DENNÍ TEPLOTĚ PŘI TEPLOTĚ CHLADÍCÍ VODY 14/18° (CIATIK TRADE S.R.O., 2012).....	8
OBRÁZEK 7- ZÁVISLOST VYUŽITELNOSTI FREE COOLINGU NA VNĚJŠÍ TEPLOTĚ (CIATIK TRADE S.R.O., 2012).....	9
OBRÁZEK 8 - HORKÁ/STUDENÁ ULIČKA (CONTEG S.R.O., 2015).....	10
OBRÁZEK 9 - AKTIVNÍ PODLAHA (CONTEG S.R.O., 2015) .....	11
OBRÁZEK 10 - UZAVŘENÁ STUDENÁ ULIČKA [1].....	12
OBRÁZEK 11 - MODULÁRNÍ SYSTÉM (CONTEG S.R.O., 2015) .....	12
OBRÁZEK 12 - NESPRÁVNÉ ROZMÍSTĚNÍ SERVERŮ PODLE ZATÍŽENÍ (KUNST, BENEŠ, & VOLF, 2013).....	13
OBRÁZEK 13 - NÁKLADY NA CHLAZENÍ V ZÁVISLOSTI NA ROZLOŽENÍ ZÁTĚŽE – PŘEKRESLENO DLE (MOORE, CHASE, PARTHASARATHY, & RATNESH, 2005).....	13
OBRÁZEK 14 - RCI INDEX V ZÁVISLOSTI NA VÝKONU OSAZENÉM V DATOVÉM CENTRU; UPRAVENO (MAGNUS K. HERRLIN, 2008) .....	16
OBRÁZEK 15 - ROZVOD VZDUCHU V DATOVÉM CENTRU, PROBLÉM BYPASSU (NOVOTNÝ, MATĚCHA, & NOŽIČKA, UNDESIRABLE EFFECTS OF BYPASS FLOW FIELD IN DATA CENTER FLOW MANAGEMENT, 2014) .....	17
OBRÁZEK 16 – VYZAŘOVÁNÍ (TERMOKAMERA, 2015).....	20
OBRÁZEK 17 - TERMOKAMERA FLIR P640 .....	21
OBRÁZEK 18 - ROZSAHY BĚŽNÝCH TERMOČLÁNKŮ (OMEGA ENGINEERING, 2015) .....	22
OBRÁZEK 19 - 3D TISKÁRNA CUBE PRO (3D SYSTEMS, INC., 2015) .....	24
OBRÁZEK 20 - CUBIFY 3.0 .....	25
OBRÁZEK 21 - PŘÍKAZOVÉ OKNO CLIENTA PUTTY .....	26
OBRÁZEK 22 - SOLIDWORKS .....	26
OBRÁZEK 23 - SKUTEČNÝ SERVER - NÁHRADNÍ MODEL (NOVOTNÝ, NOŽIČKA, & JANSÁ, MODEL OF HEAT SIMULATOR DATA CENTERS, 2014).....	28
OBRÁZEK 24 - POPIS SERVERU.....	29
OBRÁZEK 25 - BLOKOVÉ SCHÉMA EXPERIMENTU.....	29
OBRÁZEK 26 - LABORATOŘ_1.....	30
OBRÁZEK 27 - LABORATOŘ_2.....	30
OBRÁZEK 28 - LABORATOŘ_3.....	31
OBRÁZEK 29 - VIZUALIZACE SERVERU.....	32
OBRÁZEK 30 - DRUHÝ STUPEŇ OPTIMALIZACE_1 .....	33

OBRÁZEK 31 - DETAILNÍ POHLED NA TUNELOVOU UCPÁVKU .....	33
OBRÁZEK 32 - OZNAČENÍ ŽEBER CHLADIČE .....	35
OBRÁZEK 33 - KOMPILACE TŘETÍHO CHLADIČE .....	35
OBRÁZEK 34 - KOMPILACE PRVNÍHO CHLADIČE.....	39
OBRÁZEK 35 - NEZATÍŽENÝ STAV – AUTOKALIBRACE .....	47
OBRÁZEK 36 - DEFINOVANÝ TEPLTNÍ ROZSAH - NEZATÍŽENÝ STAV .....	48
OBRÁZEK 37 - BEZ OPTIMALIZACE - VÝKON CHLAZENÍ 50 % .....	49
OBRÁZEK 38 - BEZ OPTIMALIZACE - VÝKON CHLAZENÍ 100 % .....	50
OBRÁZEK 39 - PRVNÍ STUPEŇ OPTIMALIZACE - VÝKON CHLAZENÍ 50 % .....	51
OBRÁZEK 40 - PRVNÍ STUPEŇ OPTIMALIZACE - VÝKON CHLAZENÍ 100%.....	52
OBRÁZEK 41 - DRUHÝ STUPEŇ OPTIMALIZACE - VÝKON CHLAZENÍ 50%.....	53
OBRÁZEK 42 – DRUHÝ STUPEŇ OPTIMALIZACE - VÝKON CHLAZENÍ 100% .....	54



# 1. Datová centra

## 1.1. Co jsou to datová centra?

Tyto prostory můžeme definovat jako místo pro uložení moderních počítačových technologií a k nim přidružených technologií, jako jsou například telekomunikační a centralizovaná uložení (fyzická i virtuální) pro skladování, šíření nebo řízení dat a informací. Datové centrum může mít podobu (velikost) jednoho datového rozvaděče, jedné skříně či místnosti, až po celé budovy a komplexy. Největší datové centrum se nachází v USA. Jedná se o Lakeside Technology Center v Chicagu a jeho rozloha je 100.000 metrů čtverečních (BusinessIT.cz, 2012). Pro srovnání největší připravované datové centrum v České Republice bude mít rozlohu 4.000 metrů čtverečních a mělo by být dokončeno v roce 2015. Jedno z největších datových center na Slovensku společnosti Benestra má rozlohu 1.100 metrů čtverečních (Benestra, 2015).

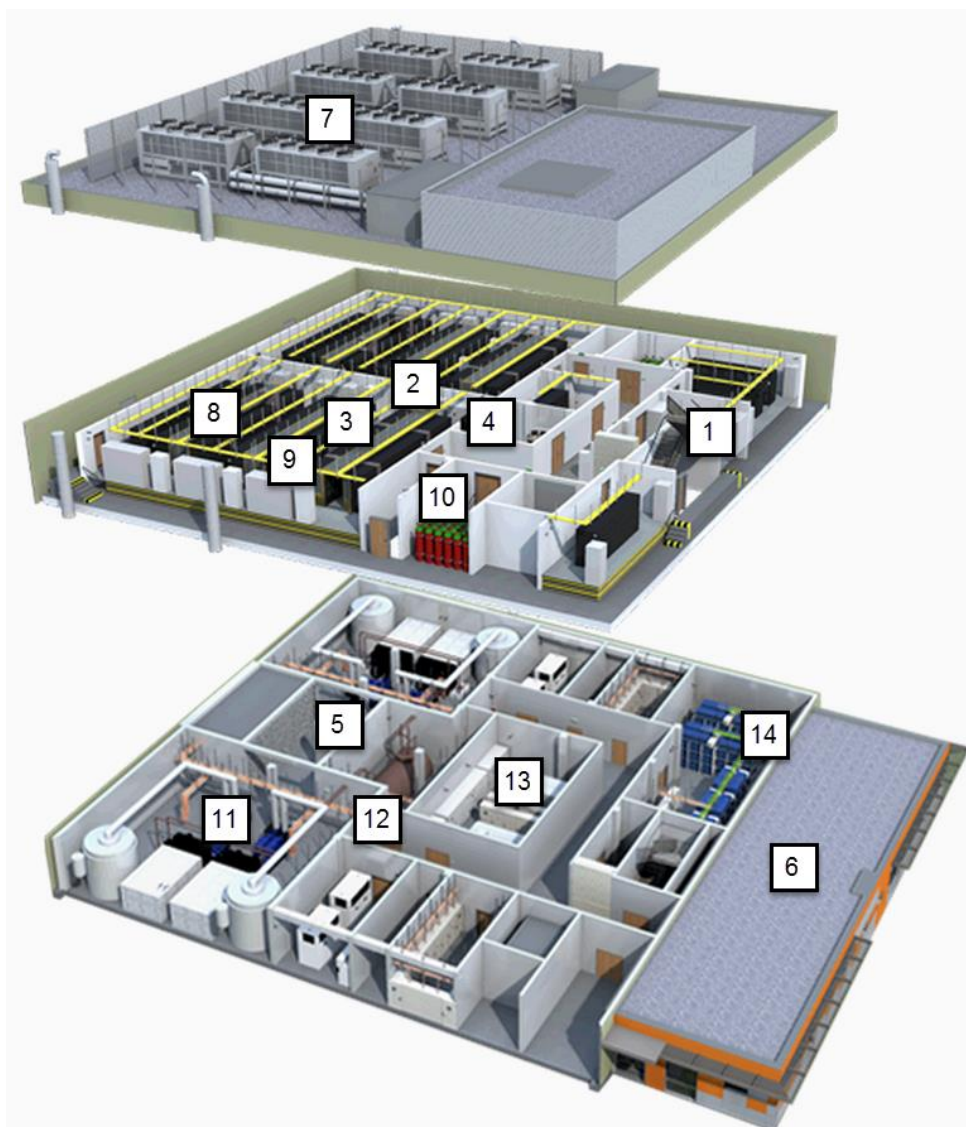
Datová centra střední až velká přímo vyžadují specializovaný přístup při navrhování a konstrukci. Je nutné skloubit velmi mnoho profesních odvětví, jako je například napájení, chlazení, zálohování, řízení, monitoring a další.



Obrázek 1 - Lakeside Technology Center, Chicago (Forbes, 2015)

## 1.2. Struktura datového centra

Datové centrum ve své největší podobě zabírá i celé budovy. Prostory určené pro umístění serverů v těchto budovách se nazývají datové sály (Obrázek 3). Budova může mít jeden, ale i více těchto sálů pro uložení tzv. *racků*. Rack, neboli datový stojan, je typizovaná „skříň“, do které jsou instalovány prvky telefonní a počítačové sítě, jako třeba routery, switche nebo počítačové servery. V datových centrech jsou v těchto stojanech nejčastěji uloženy servery.



Obrázek 2 - Struktura datového centra (Altron, 2015)

## Popis obrázku 2:

1. Datová centra mají sofistikovaný systém ochrany proti nebezpečí zvenčí
2. Centra mají architekturu klasických sálů se stojanovými racky nebo např. modulárními systémy uložení serverů
3. Nová datová centra se staví za již konkrétně známým účelem. Proto je možné navrhnout je přesně dle potřeby s ohledem např. na využití
4. Datové centrum je většinou vybaveno monitorovacím systémem. Především technologickým, jako je přehřátí serverů, výpadek elektrické energie...
5. Jak nové datové centrum, tak vznikající v již stávající budově, je možné navrhnout je s různým systémem chlazení
6. Centrální budova slouží k celkovému monitoringu a řízení všech systémů v datovém centru
7. Systém pro chlazení se nachází zpravidla na střeše budovy centra
8. Samotné datové sály zabírají velkou část plochy center
9. Síťová infrastruktura (datové rozvody nebo rozvody elektrické energie) jsou nezbytnou součástí datových center
10. Bezpečnostní systémy, hlavně požární, zaručují včasné varování a minimalizaci dopadu škod při havárii
11. Záložní zdroje napájení co nejvíce eliminují výpadky v dostupnosti dat při výpadku elektrické energie
12. Samotný systém napájení z rozvodné sítě
13. Další prostory určené např. pro skladování náhradních součástí



*Obrázek 3 - Datový sál (Altron, 2015)*

### 1.3. Historie

Jeden z největších provozovatelů a poskytovatelů datových center na světě je společnost Microsoft, jež provozuje po celém světě desítky datových center pro více než 200 svých cloudových a online služeb. Pojdme se tedy na historii datových center podívat z jejich pohledu, protože lze tuto firmu v celosvětovém měřítku považovat za hlavního hráče na trhu. A to jak v minulosti, tak i dnes.

První datová centra, neboli první generace, začala vznikat již v roce 1989, kdy datová centra hostila klasické servery umístěné v klimatizovaných skříních. Tato generace se nechvalně vyznačovala velmi vysokou spotřebou energie a zejména vysokým indexem Power Usage Effectives (PUE). Tento index sleduje podíl celkového příkonu datového centra k souhrnnému příkonu samotné serverové infrastruktury. Dosahoval až hodnot PUE 2,0, což znamená, že centra spotřebovala ještě jednou tolik energie než samotné servery na jejich chlazení, osvětlení, provoz monitorovacích systémů či napájení počítačů a nástrojů pro jejich zprávu. Běžná hodnota PUE v dnešních moderních centrech je cca 1,4.

Druhá generace přišla, v poměru k dalšímu vývoji, až po delší době. Bylo to v roce 2004 a tento rok znamenal v Microsoftu boom v oblasti výstavby datových center. Stalo se tak s masivním rozšířením internetu a počítačů v domácnostech a jejich nárokům na online uložení. Při takto velkém rozmachu ve stavění se také začalo hledět na nové metriky, jako byla rychlost stavby datového centra nebo náklady na jeho provoz (jejich

snižování). Zástupce této generace najdeme třeba ve státě Washington. Datové centrum v Quincy bylo postaveno jako poslední z tzv. „druhé generace“. Rozkládá se na ploše deseti fotbalových hřišť. Chlazení racků je zde již řešeno vzduchotechnikou v podlaze. Za zmínku stojí, že jako první datové centrum Microsoftu je napájeno z obnovitelných zdrojů (konkrétně z nedaleké vodní elektrárny).

Třetí generace přinesla strukturální změny v datových centrech. Začal se využívat modulární systém, kde jsou servery umístěny v ISO kontejnerech. Vznikl tady i nový, inovační a v té době unikátní systém chlazení venkovním vzduchem. První takovéto centrum vzniklo v Dublinu. Technologie chlazení venkovním vzduchem, která zvýší efektivitu chladicího systému až o 50%, spolu se severským podnebím, dokázala index PUE snížit na hodnotu 1,25.

Čtvrtá a zatím poslední generace přišla v roce 2010. Využila zkušeností s ISO kontejnery, které posunula ještě o úroveň výše. Kontejnery začaly využívat tzv. „plug and play“ komponenty, které lze snadno měnit. Celý kontejner (IT pack) se montuje přímo u výrobce, což snižuje náklady na dopravu a také zvyšuje rychlost připojení racku do datového centra. Toto snížilo náklady na vlastnictví až o 50%. Kontejnery přímo obsahují chladicí systémy i UPS a v datovém centru se tak pouze napojí na napájení. PUE u těchto datových center dosahuje hodnot 1,15 – 1,2 (BusinessIT.cz, 2012).

#### 1.4. Chlazení datových center – úvod

Chlazení datových center je neodmyslitelnou částí jejich struktury. Výpočetní práce jednoho racku dokáže vyprodukovat až 30 kilowatt odpadního tepla (Pojer, 2013), přičemž v datovém centru se nacházejí desítky až stovky racků. Toto chlazení lze provádět hned několika metodami, kde každá má své výhody, nevýhody a specifické použití. Způsob chlazení datového centra ovlivňuje hned několik faktorů, jako je třeba geografická poloha, náročnost na výkon nebo velikost. S těmito faktory souvisí i spotřeba elektrické energie a s ní spojené odpadní teplo, které je nežádoucí.

Pro představu spotřeby je možné uvést výsledek americké Agentury pro ochranu životního prostředí. Podle té byla v roce 2013 spotřebovaná elektrická energie všemi datovými centry na světě rovna 80 terawatthodin, což je pro srovnání 1,5 násobek roční spotřeby města New York. Jednotlivé datové centrum, například nové datové centrum



společnosti Facebook ve švédském Luleå o rozloze 83 tisíc čtverečních metrů, má spotřebu 120 megawatt (Elektro, 2012). Toto teplo je nežádoucí a razantně snižuje životnost počítačových komponent (tuto teorii koriguje metoda chlazení „temperature management“, viz níže).

Pro chlazení využíváme hned několik typů řešení, případně jejich vzájemnou kombinaci. Všechny tyto prostředky nám zvyšují spotřebu elektrické energie, ale šetří životnost jednotlivých komponent centra. Je proto žádoucí nalézt pomocí optimalizace co možná nejlepší poměr mezi teplotou komponent (a tím i jejich životností) a spotřebou energií.



Obrázek 4 - Nové datové centrum ve švédském Luleå (Miller, 2011)

## 1.5. Chlazení datových center – možnosti

Mezi nejrozšířenější systémy patří tzv. *free cooling*. Jedná se o metodu, kterou lze nejefektivněji využít v chladnějších klimatických podmínkách. Můžeme pro představu uvést, že takové podmínky se nachází v místech, kde alespoň třetinu roku padá venkovní teplota pod 13°C.

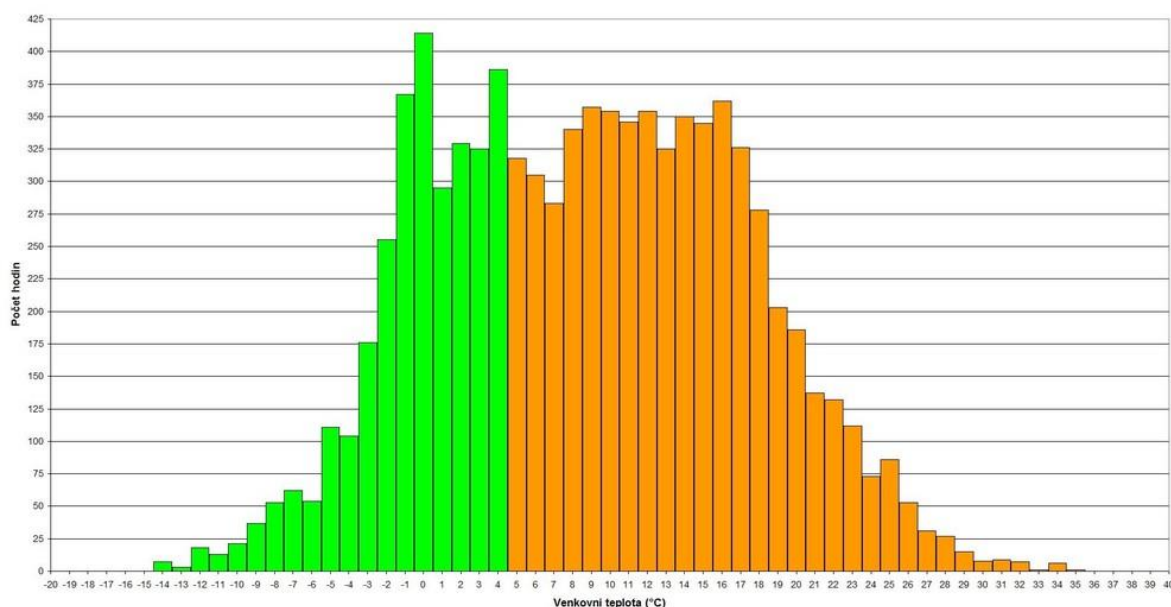
Samotná metoda funguje na principu distribuce médií, nejčastěji vody (tzv. water-side ekonomizer) nebo vzduchu (tzv. fluid-side ekonomizer). Jedná se o přímé chlazení datových center těmito médii. Pro maximální využití této metody je vhodné, aby teplota chladicí vody byla vyšší, než je obvyklé. Běžně se teplota pohybuje kolem 6 – 12 °C, pro tuto metodu je ale výhodnější 14 – 18°C. Tyto teploty jsou velmi závislé na venkovní teplotě a tím pádem na celém návrhu. Použijeme-li vyšší teplotu chladicí tekutiny, díky

teplotnímu spádu budeme moci navrhovat chlazení na 100% už při vyšších venkovních teplotách. Rozdíl ve venkovních teplotách přípustných pro navržení chlazení na 100% v daném případě je až 8°C; teploty jsou brány v klimatu odpovídajícím např. Praze. Z toho všeho je patrné, proč je výhodné používat tuto metodu pro chlazení center v chladnějších klimatických podmínkách, protože teplotní spád nám tak dovolí za stejné energetické náročnosti lepší chlazení datového centra. (CIATIK TRADE s.r.o., 2012)

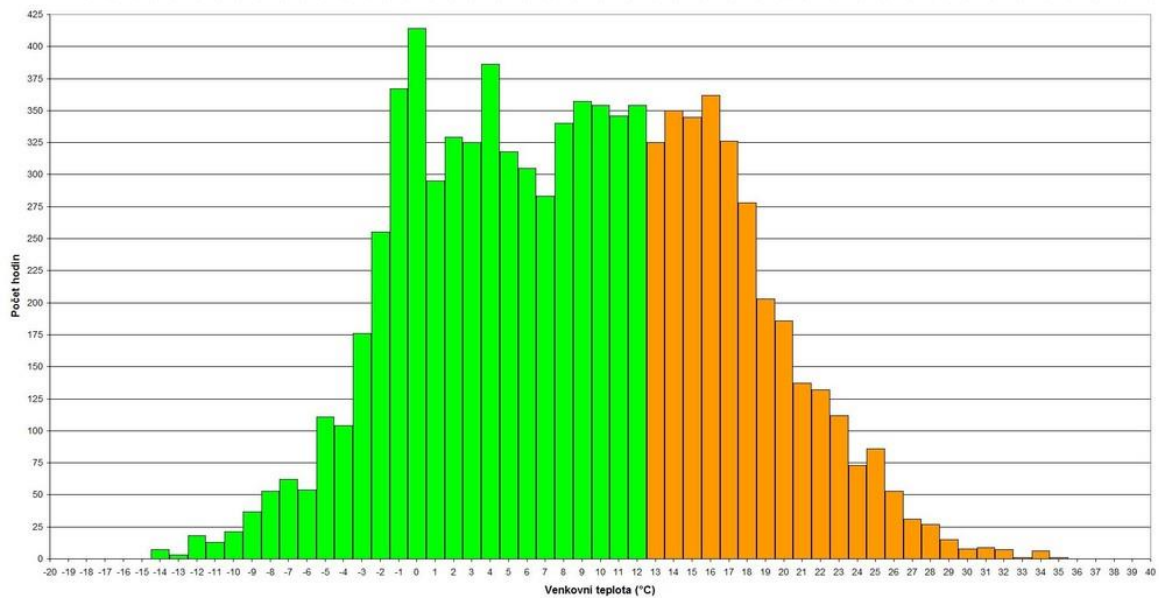
Free cooling pomocí vzduchu (vzduchového ekonomizéru) je ale oproti vodnímu chlazení považován za méně efektivní a nákladnější.

Následující grafy ukazují hodinové rozložení teploty v závislosti na venkovní teplotě. U prvního je teplota chladicí vody 6 – 12 °C a roční využitelnost cca 34%. U druhého je teplota vody 14 – 18 °C a využitelnost cca 64%. Rozdíl je tedy cca 30%. (CIATIK TRADE s.r.o., 2012)

Data o teplotě jsou pro oblast Praha – Ruzyně.



Obrázek 5 - Rozložení teploty v závislosti na průměrné denní teplotě při teplotě chladicí vody 6/12° (CIATIK TRADE s.r.o., 2012)



Obrázek 6 - Rozložení teploty v závislosti na průměrné denní teplotě při teplotě chladicí vody 14/18° (CIATIK TRADE s.r.o., 2012)

Z těchto grafů je patrná využitelnost chlazení. Vzhledem k pracovní teplotě dnešních počítačů je ale možné použít chladicí kapalinu (vodu) například až o teplotě 22-23 °C a tím opět velmi podstatně zvětšit využitelnost chlazení.

## 1.6. Další rozdělení chladicí metody free cooling

- Přímý Free cooling chladivem

Tento systém funguje na principu bypassu a čerpadla chladiva nainstalovaného do systému. Výhoda této metody je snadná regulovatelnost motorů a navýšení rozměrů i hmotnosti systému. Nevýhoda je naopak malý výkon.

- Free cooling vestavěný do jednotky

Zde instalujeme freecoolingový výměník přímo do jednotky. Před kondenzátor naistalujeme další lamelový výměník s nemrznoucí kapalinou. Velkou výhodou je snadná instalace, ale mnoho nevýhod snižuje využití této metody. Jedná se hlavně o tlakové ztráty vzduchu ve ventilátorech a tím pádem nutný větší příkon.

- Oddělený Free cooling CIAT

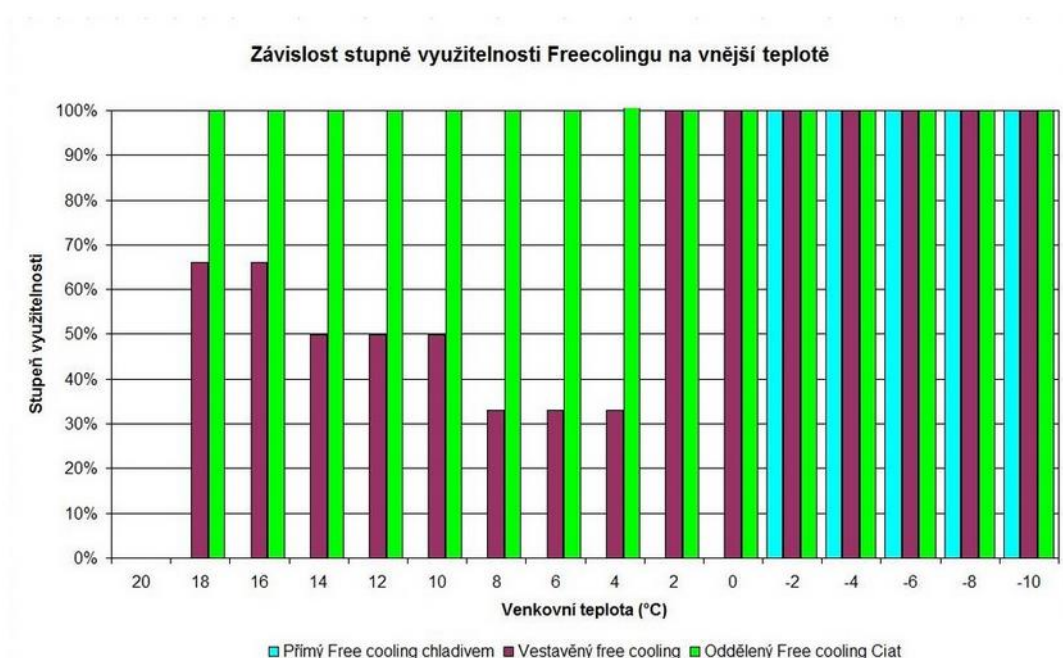
Systém, kde strojní (kompresorové) chlazení a Free cooling jsou rozděleny do dvou různých jednotek. Tyto jednotky tvoří vizuálně jeden celek, ale jsou propojeny pouze



komunikačním kabelem a rozvodem ochlazované kapaliny. Kapalina vchází nejprve do jednotky Free coolingu, kde se ochladí nebo přechladí (záleží na vnějších podmínkách) a poté vstoupí do strojního chlazení, kde se případně podle potřeby ještě dochladí.

Nevýhodou tohoto systému je ale větší hmotnost a také větší nároky na místo vzhledem k větším rozměrům, než u jednoduchých systémů. Na rozdíl od vestavěného Free coolingu se ventilátory řídí podle požadavků právě Free coolingové části a v případě vhodných podmínek je Free cooling využíván na maximální výkon a není ničím omezován. Z těchto důvodů je efektivita chodu při souběžném chlazení maximální a tomu odpovídají vysoké úspory na spotřebované energii.

(CIATIK TRADE s.r.o., 2012)



Obrázek 7- Závislost využitelnosti Free coolingu na vnější teplotě (CIATIK TRADE s.r.o., 2012)

- *Stored cooling* (Kunst, Beneš, & Volf, 2013)

Jedná se o princip „úložného chlazení“, neboli uložení energie pro chlazení. Opět jsou výhodná užití této technologie v chladnějších podmínkách. Jedná se o uchování např. ledu ve vyspělých mrazírnách, kdy i přes náklady na toto uchování poskytnou výsledný kýžený efekt chlazení serverů v rámci únosných nákladů. Lze využít i jiná média, jako například síran sodný nebo jiné systémy (solární nebo tepelné).

- *temperature management*

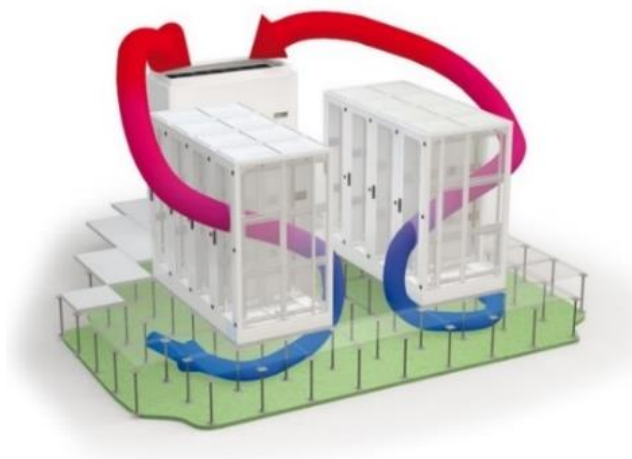
Jak již bylo zmíněno, pasivní možnost chlazení může být také tzv. *temperature management*. Jedná se spíše o filosofii, kde díky malému umělému zvýšení teploty dojde k velkému ušetření vstupní energie. Tato metoda je zatím kontroverzní, protože je nesnadné optimalizovat poměr mezi životností a spotřebou elektrické energie.

Nově vznikajícím a zajímavým řešením jsou „úsporné procesory“. Jedná se o vícejádrové procesory. Jsou schopny řešit větší množství požadovaných úkonů, ale šetří energii a teplo, a to podle různých výrobců až o 40% (Kunst, Beneš, & Volf, 2013).

## 1.7. Uspořádání datových center

- Horká/studená ulička

Tato metoda je nejrozšířenějším řešením ve středních a větších datových centrech. Metoda vlastně zabraňuje mísení horkého vzduchu, který místnost opouští a studeného, který do prostoru naopak přichází. Toto mísení je nanejvýš nežádoucí, protože způsobuje celkové ohřívání vzduchu procházejícího ventilátory, a tím narušuje koncept navržený pro daný systém. Výsledkem je neefektivní chlazení a přehřívání.



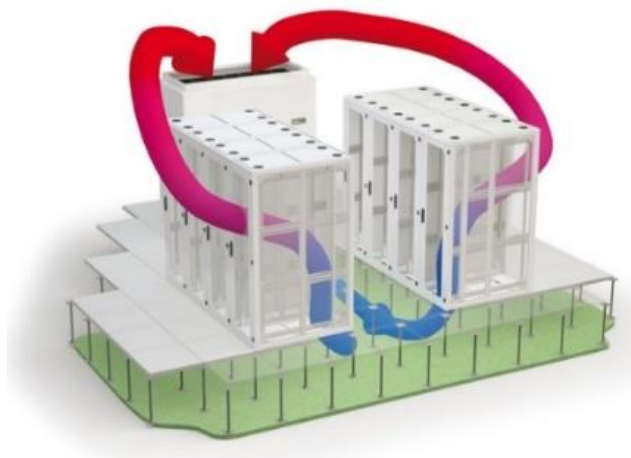
Obrázek 8 - Horká/studená ulička (Conteg s.r.o., 2015)

Základ metody je rozložení racků (systém pro uložení IT technologie a kabeláže v přehledném a kompaktním prostředí) v místnosti tak, aby tvořily uličky. Ty pak musí být koncipovány tak, aby záda racků a jejich čela směřovala vždy k sobě. Nasávání studeného

vzduchu pak bude probíhat v jedné uličce a výfuk teplého naopak v druhé. To zabrání jeho mísení.

- Aktivní podlaha

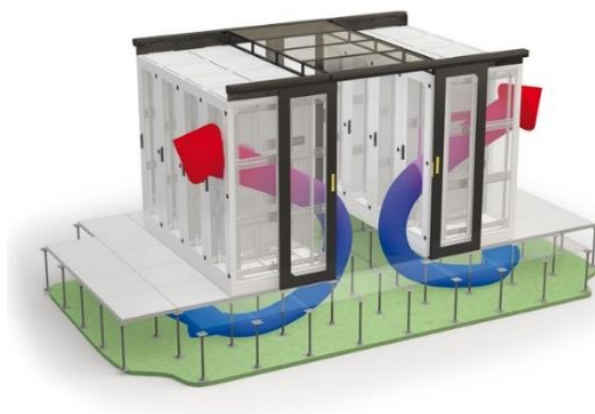
Jedná se v podstatě o přídavný subsystém k horké/studené uličce. Jde v principu o to, že v dvojité podlaze je pomocí perforovaných dlaždic vzduch přiváděn přesně na požadované místo a horký vzduch je naopak odváděn dvojitým stropem. Tento systém je opět možno vylepšit ještě o další subsystémy.



Obrázek 9 - Aktivní podlaha (Conteg s.r.o., 2015)

- Uzavřená studená ulička

Další modulací prvního případu je studená ulička, která je fyzicky oddělena od okolních prostor, což umožní redukci studeného vzduchu k určeným serverům. V jiném subsystému je možno oddělit horké uličky od zbytku centra pomocí tzv. *komínků*. To umožní rychlejší a přímější ochlazení vzduchu přes dvojitý strop a jeho přivedení zpět do studené uličky.



Obrázek 10 - Uzavřená studená ulička [1]

- Modulární systém

Jedná se o systém, kde architektura poskytuje maximální energetickou efektivitu. Jednotlivé bloky (moduly) mohou pracovat s různými teplotami a hustotami tepelné zátěže. Největší výhodou je právě flexibilita při kombinování a nastavování parametrů jako je teplota, počet racků nebo velikost.

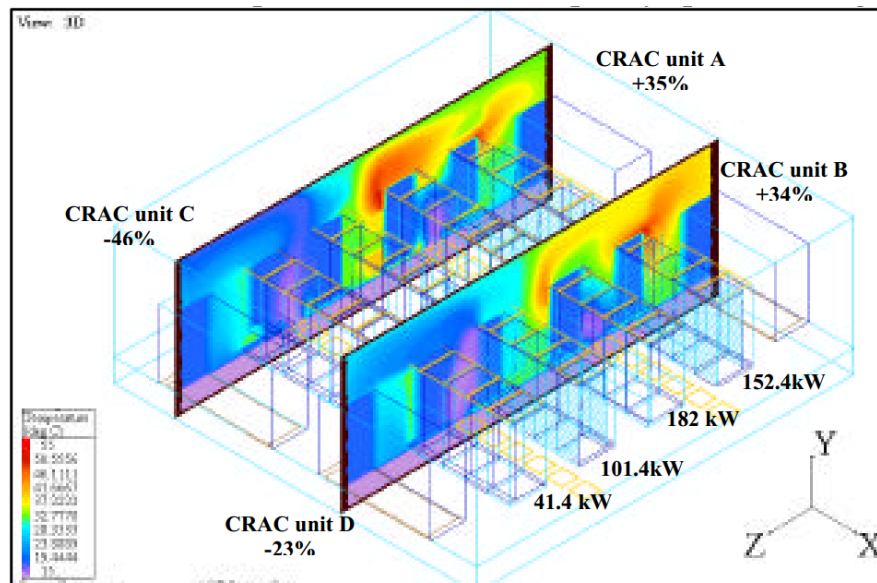


Obrázek 11 - Modulární systém (Conteg s.r.o., 2015)

## 1.8. Rozdělení zatížení serverů a jejich umístění

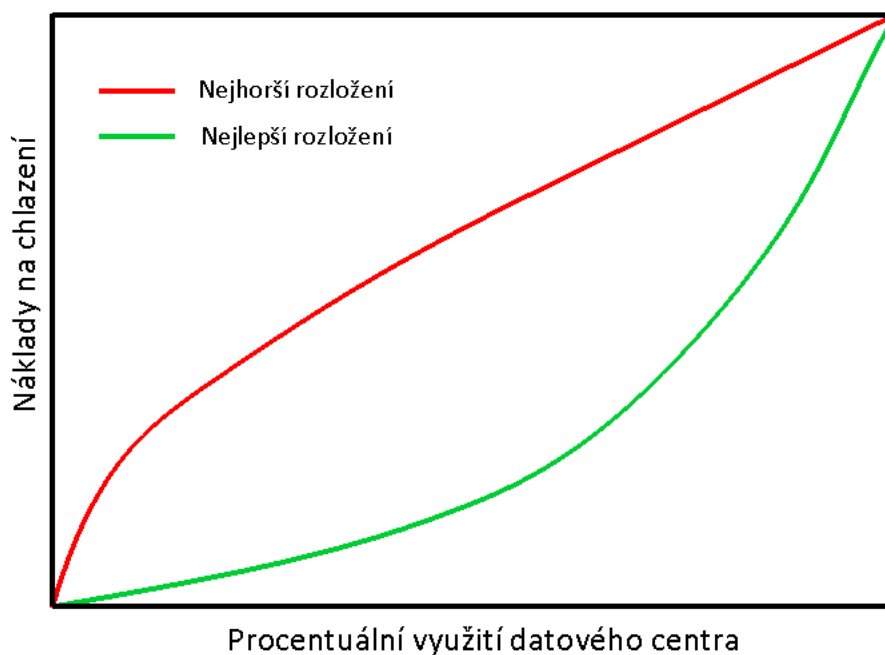
K optimálnímu chlazení datových center může sloužit také správné rozložení výkonu. Pokud datové centrum bude vypnuto nebo bude pracovat na 100%, existuje pouze jedno řešení. Pokud ale bude výkon datového centra proměnný, je jeho rozložení důležité. Mohl by totiž nastat stav, kde v jedné části centra bude výkon serverů výrazně převyšovat jiné. Chladicí systém navržený pro stabilní výkon (teplotu) datového centra

potom nebude ve vytíženější části dostačovat, zatímco v ostatních částech, kde výkon serverů je naopak menší, bude předimenzován (Kunst, Beneš, & Volf, 2013).



Obrázek 12 - Nesprávné rozmístění serverů podle zatížení (Kunst, Beneš, & Volf, 2013)

Z následujícího grafu můžeme vyčíst, jaký je rozdíl mezi nejhorším a nejlepším rozložením výkonu serverů. Sklony křivek se liší v jednotlivých případech datových center, ale čím lépe je centrum navrženo, tím se zelená křivka posouvá doprava (Kunst, Beneš, & Volf, 2013).



Obrázek 13 - Náklady na chlazení v závislosti na rozložení zátěže – překresleno dle (Moore, Chase, Parthasarathy, & Ratnesh, 2005)

Řešení problému s nesprávným rozložením zátěže serverů lze kompenzovat modulárním systémem, kde jednotlivé servery umístíme do samostatného kontejneru s vlastním chlazením a odvodem tepla pomocí horké/studené uličky. (Kunst, Beneš, & Volf, 2013)

## 2. Metriky datových center

Definice pojmu metrika

Metrika je přesně vymezený ukazatel nebo hodnotící kritérium. V oblasti užití pro datová centra se nejčastěji využívá k hodnocení úrovně efektivnosti provozu jednotlivých subsystémů nebo datového centra jako celku. Metriky můžeme sdružovat do určitých skupin podle využití (tepelné, ekonomické,...) a tuto skupinu potom nazýváme „*portfolio metrik*“.

### 2.1. Základní dělení

- Metriky efektivity
  - Účinnost infrastruktury DC (Data center infrastructure Efficiency) – DciE
  - Efektivita využívání energie (Power usage effectiveness) – PUE
  - HVAC system effectiveness – HVAC
  - Space, Wats and performance – SwaP
  - Data center energy productivity – DceP
- Tepelné metriky
  - Teplota DC (Data Center temperature) – T
  - British Thermal Unit – BTU
  - Výkon proudění vzduchu (Airflow performance index):
    - Rack Cooling Index - RCI HI, RCILO
    - Return temperature Index – RTI
    - Supply Heat Index – SHI
    - Return Heat Index – RHI
    - Recirkulace vzduchu (Recirculation Index) – RI
    - Capture Index – CI

- Efektivita chlazení systému (Cooling system efficiency metrics):
  - Data center cooling system efficiency – CSE
  - Airflow efficiency – AE
  - Cooling system sizing – CSS
  - Air economizer utilization – AEU
  - Water Economizer utilization – WEU

## 2.2. Definice vybraných metrik

- PUE – Power Usage Effectiveness

Jedná se o koeficient poměru celkové spotřeby elektrické energie ke spotřebě hardwarového vybavení. Výsledná hodnota ukazuje, jak efektivní datové centrum je jako celek a zároveň jak velký je prostor ke zlepšení efektivity. Hodnota PUE 1,0 je ideální stav, kterého není možné dosáhnout. Jde o stav, kde by byla veškerá spotřebovaná energie použita pouze na provoz hardwaru. Dnešní běžná datová centra mají hodnotu PUE pohybující se kolem 1,4. Čím vyšší index PUE je, tím horší a pravděpodobně zastaralejší je datové centrum (Kunst, Beneš, & Volf, 2013). Rovnice pro vyjádření tohoto koeficientu je (Křížek, 2012):

$$PUE = \frac{\text{Celkový příkon pro datové centrum}}{\text{Energie potřebná pro IT zařízení}}$$

- DCiE – Data Center Infrastructure Efficiency (Křížek, 2012)

Jde o metriku efektivity, konkrétně o účinnost infrastruktury datového centra. Tuto metriku můžeme definovat:

$$DCiE = \frac{\text{Energie potřebná pro IT zařízení}}{\text{Celkový příkon pro datové centrum}} = \frac{1}{PUE}$$

- SWaP – Space, Watts and Performance (Křížek, 2012)

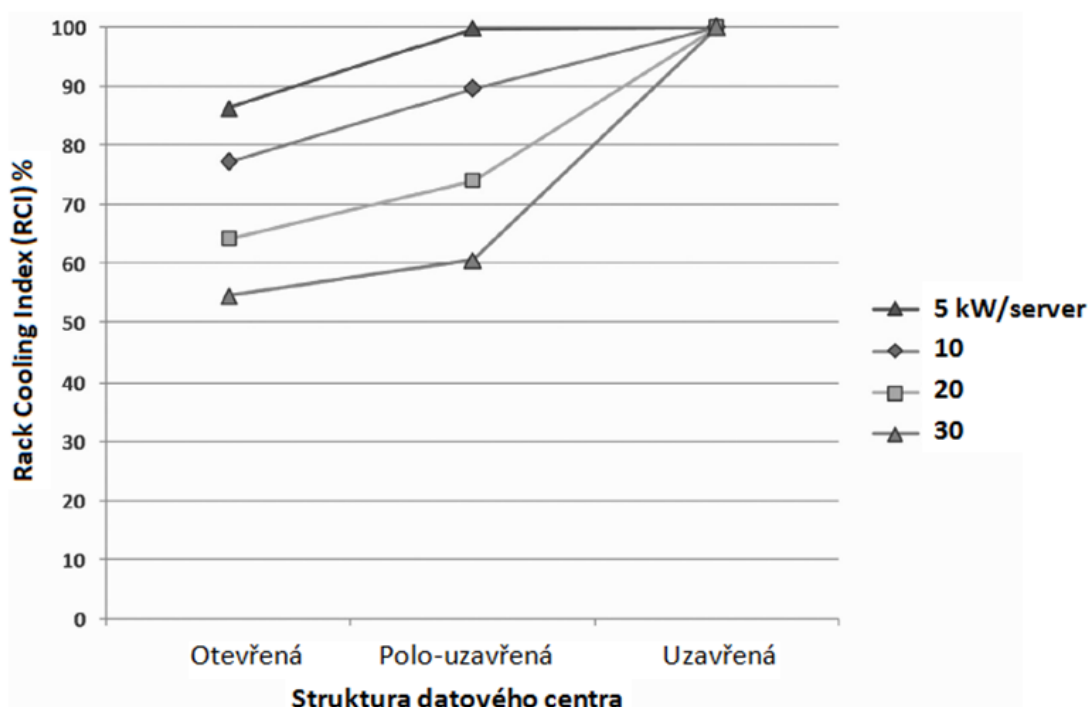
Metriku definuje rovnice:

$$SWaP = \frac{\text{výkon}}{\text{prostor} \cdot \text{spotřebovaná energie}}$$

- RCI – Rack Cooling Index

Tento index je měřítko toho, jak efektivně se servery chladí s ohledem na průmyslové tepelné normy. RCI index má dvě části popisující teplotní stav v horní (HI) a dolní (LO) části teplotního rozsahu.  $RCI_{HI}$  Je definován následujícím vztahem (Magnus K. Herrlin, 2008).

$$RCI_{HI} = \left[ 1 - \frac{\text{Celkové odvedené teplo}}{\text{maximální přípustné odvedené teplo}} \right] \cdot 100 \text{ [%]}$$



Obrázek 14 - RCI index v závislosti na výkonu osazeném v datovém centru; upraveno (Magnus K. Herrlin, 2008)

- RTI – Return Temperature Index

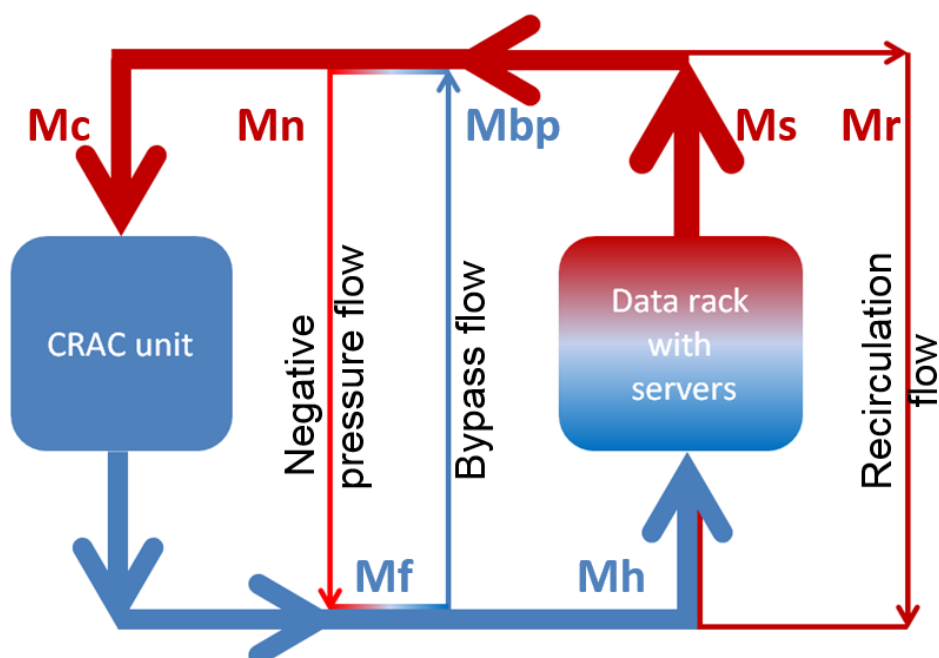
Index je měřítkem energetické náročnosti chladicího systému. Odchylky od hodnoty 100% nám ukazují poklesy výkonnosti. Můžeme ho vyjádřit následujícím vztahem:

$$RTI = \left[ (T_{odvedené} - T_{přivedené}) / \Delta T_{zařízení} \right] \cdot 100 \text{ [%]}$$

Všechny teploty jsou brány jako vážený průměr všech naměřených teplot. V případě recirkulace v systému je hodnota RTI vyšší než 100 %, v případě, že se v systému vyskytne bypass, je naopak nižší než 100%.



Kombinace metrik RTI a RCI nám poskytuje příležitost objektivně stanovit celkový výkon klimatizačního systému budovy datového centra (Magnus K. Herrlin, 2008) (Novotný, Matěcha, & Nožička, Undesirable effects of bypass flow field in data center flow management, 2014)



Obrázek 15 - Rozvod vzduchu v datovém centru, problém Bypassu (Novotný, Matěcha, & Nožička, Undesirable effects of bypass flow field in data center flow management, 2014)

- Ze schématu [13] je možné odvodit tyto další metriky: ByPass ratio (BP), Recirkulation ratio (R) a Balance ratio (BAL) (Novotný, Matěcha, & Nožička, Undesirable effects of bypass flow field in data center flow management, 2014). Abychom mohli tyto metriky určit, musíme si nejprve ze schématu (Moore, Chase, Parthasarathy, & Ratnesh, 2005) definovat následující parametry:
  - CRAC flow ( $M_c$ ): jedná se o celkový hmotnostní tok chladicí jednotkou
  - Bypass air flow ( $M_b$ ): chladicí vzduch, který projde mimo nebo skrz rozvaděč, aniž by byl využit, smíchá se s již ohřátým vzduchem a vstupuje do CRAC jednotky
  - Recirkulation air flow ( $M_r$ ): Je vzduch, který byl použit k ochlazení serverů, následně smíchán s nově ochlazeným vzduchem a opětovně použit ke chlazení
  - Negative pressure flow ( $M_n$ ): Opětovně nasávaný vzduch způsobený nepříznivými tlakovými poměry v datovém centru (tzv. Venturiho effect)

Na základě těchto definic můžeme napsat vztahy pro jednotlivé metriky:

- ByPass ratio:  $BP = Mb/Mc$
- Recirkulation ratio:  $R = Mr/Mc$
- Balance ratio:  $BAL = Mc/Ms$

### 2.3. Shrnutí metrik

Metriky jsou definicí, která popisuje datová centra. Velkou nevýhodou je jejich velký počet a počet modifikací jednotlivých metrik. Také vývoj technologií způsobuje, že některé metriky jsou již zastaralé. Ze všech metrik je zřejmě nejčastěji využívána metrika PUE. Je pro ucelený obrázek o efektivitě datového centra pravděpodobně nejsrozumitelnější (Křížek, 2012).

### 3. Prostředky použité při experimentu

#### 3.1. Termokamera

##### Teorie a princip měření

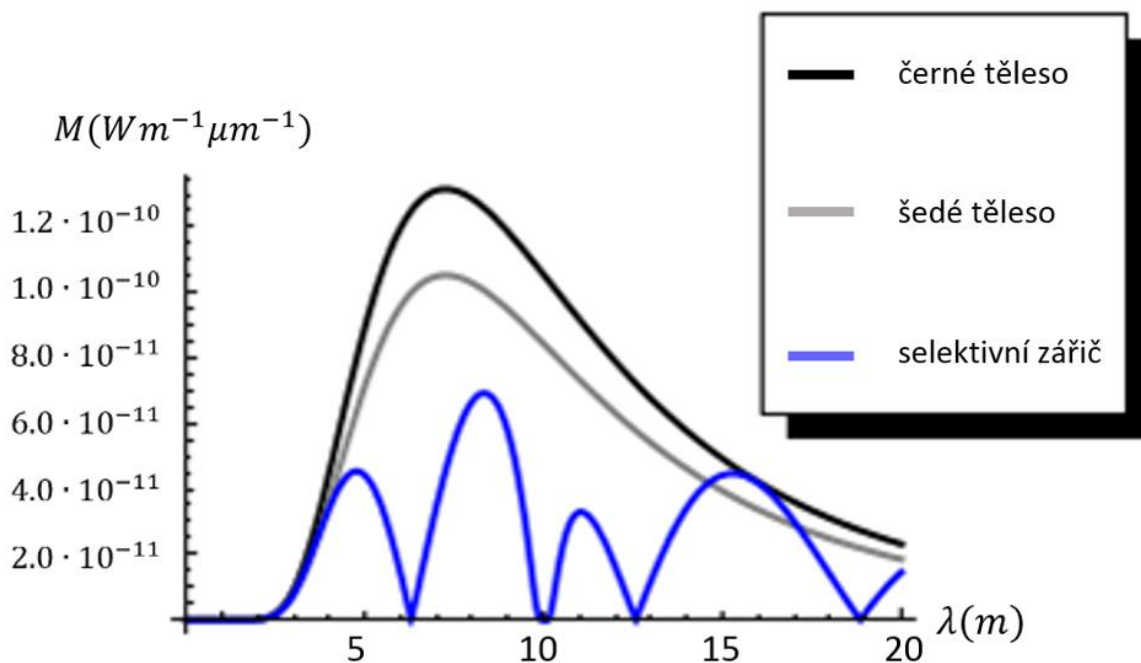
Při experimentu bylo zapotřebí měřit plošnou teplotu celého serveru, bodové snímače teploty proto nebyly vhodné. Použitím termokamery jsem mohl snímat celou plochu serveru a dostávat tak ucelené informace o teplotě v jakémkoli místě.

Měření termokamerou je bezdotykové měření teploty, protože nedochází k fyzickému kontaktu mezi měřenou plochou (objektem) a samotným měřicím přístrojem. Princip měření vychází z termického pohybu částic. Tento jev je zdrojem elektromagnetického záření. Intenzita tohoto elektromagnetického záření je závislá na povrchové teplotě objektu, který toto záření vydává, a proto lze s její pomocí stanovit právě povrchovou teplotu objektu. Toto záření nazýváme „tepelné záření“, aby bylo odlišeno od dalších druhů elektromagnetických záření, které vznikají z odlišných příčin. Teoreticky je možné změřit teplotu jakéhokoli tělesa s teplotou vyšší než je absolutní nula, což jsou prakticky všechny známé věci v našem vesmíru, protože v tu chvíli vydává elektromagnetické záření. Jsme tedy limitováni pouze technikou.

Tepelné záření těles formuloval v roce 1900 Max Planck a nazýváme ho proto „Planckův vyzařovací zákon“. Dříve byly definovány i další vztahy, které se tento jev snažily popsat. Jedná se o Stefan-Boltzmannův zákon, který definuje pouze celkovou vyzářenou energii, ale nikoliv rozložení této energie do jednotlivých vlnových délek. Wienův posunovací zákon zase určuje pouze tu vlnovou délku, kde je vyzařující záření tělesa maximální a opomíjí intenzitu vyzařování mimo toto maximum. Plně dokázal popsat tepelné záření až právě výše zmíněný Planckův vyzařovací zákon. Stanovuje, kolik energie je vyzářeno na jednotlivých vlnových délkách a říká, že intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou povrchové teploty tělesa.

Nezanedbatelnou veličinou při řešení tepelného záření je „emisivita“. Emisivitu můžeme chápat jako efektivitu nebo účinnost vyzařování. Nejvyšší emisivitu má tzv. černé těleso. To pohlcuje veškeré záření, které na něj dopadá. Reálná tělesa mají emisivitu vždy menší než jedna. Pro představu můžeme říci, že reálné těleso se shodnou povrchovou

teplotou, jakou by mělo černé těleso, vyzáří méně tepelného záření. Dále můžeme definovat tzv. šedé těleso, kdy emisivitu považujeme za konstantní a nezávislou na vlnové délce. Tento případ také není reálný, protože emisivita na vlnové délce u reálných objektů závislá je. Tyto objekty pak nazýváme tzv. selektivní zářiče. V grafu můžeme vidět rozdíl ve vyzařování právě u tří výše uvedených případů, neboli černého a šedého tělesa a selektivního zářiče.



Obrázek 16 – vyzařování (Termokamera, 2015)

## Konstrukce

Konstrukci termokamery můžeme z většinové části popsat jako klasickou videokameru či fotoaparát. Rozdíl je v objektivu, kde je promítáno dopadající tepelné záření na tzv. detektor záření. Tady dochází ke změření jeho intenzity a převodu na digitalizovanou formu a následně finální snímek, který se nazývá „termogram“. Na něm je patrné rozložení teploty po ploše nebo plochách objektu.

Můžeme rozlišit dva základní typy lišící se v druhu detektoru. Ten slouží k převodu infračerveného záření na elektrický signál. Jedná se o tepelný nebo fotonový detektor. Tepelný je rozšířenější, protože je cenově dostupnější a má široký spektrální rozptyl. Fotonový má naopak omezený spektrální rozptyl, ale vysokou citlivost a pořizovací cenu. Výsledný termogram musí být ještě upraven pomocí dalších algoritmů, aby byly potlačeny

negativní vlivy. Jedná se například o autokalibraci kamery, korekci obrazu nebo potlačení šumů. U termokamery můžeme sledovat několik základních parametrů. Je to teplotní a spektrální rozsah, přesnost stanovení teploty, teplotní citlivost, optické parametry (rozlišení, ostření,...) a další funkce (měření dalších veličin, teplotní alarm).

V mém případě jsem použil poskytnutou termokameru Flir P640. Parametry kamery jsou vypsány níže.



Obrázek 17 - Termokamera Flir P640

- Rozlišení detektoru: 640 x 480
- Typ detektoru: nechlazený mikrobolometr
- Teplotní rozsah: -40 až 500 °C
- Citlivost detektoru: 0,03 °C
- Frekvence: 30 Hz
- Přesnost:  $\pm 2$  °C nebo  $\pm 2$  %

### 3.2. Termočlánek

Pro ověření správnosti dat z termokamery, tzn. vyloučení přílišného vlivu nežádoucích faktorů, jsem použil termočlánek připojený k jedné části serveru. Sloužil k nastavení maximálního rozsahu teplot na termokameře tak, aby byly výsledky co nejpresnější a nejnázornější.

Termočlánek je zařízení určené ke kontaktnímu snímání teploty. Tvoří ho dva různé kovy, zpravidla drátky, spojené do jednoho bodu. Tento spoj po vystavení změnám teploty

vytváří napětí uvnitř drátků v závislosti na měřené teplotě. Toto se nazývá Peltier-Seebeckův jev neboli termoelektrický jev. Jde o přímou přeměnu rozdílu teplot na elektrické napětí a naopak.

Termočlánků je velké množství druhů a každý typ je určen pro jiný teplotní rozsah nebo pracovní podmínky. Nejčastější typy jsou označeny jako J, K, T nebo E. Tyto základní a běžně nejpožívanější typy mají teplotní rozsah  $-200^{\circ}\text{C}$  až  $1250^{\circ}\text{C}$  a přesnost měření více než  $1^{\circ}\text{C}$ .

Teplotní rozsahy běžných termočlánků			
Kalibrace	Teplotní rozsah	Standardní přesn.	Výběrová přesn.
<b>J</b>	$0^{\circ}\text{C}$ až $750^{\circ}\text{C}$ ( $32^{\circ}\text{F}$ až $1382^{\circ}\text{F}$ )	Více než $2.2^{\circ}\text{C}$ nebo 0.75%	Více než $1.1^{\circ}\text{C}$ nebo 0.4%
<b>K</b>	$-200^{\circ}\text{C}$ až $1250^{\circ}\text{C}$ ( $-328^{\circ}\text{F}$ až $2282^{\circ}\text{F}$ )	Více než $2.2^{\circ}\text{C}$ nebo 0.75%	Více než $1.1^{\circ}\text{C}$ nebo 0.4%
<b>E</b>	$-200^{\circ}\text{C}$ až $900^{\circ}\text{C}$ ( $-328^{\circ}\text{F}$ až $1652^{\circ}\text{F}$ )	Více než $1.7^{\circ}\text{C}$ nebo 0.5%	Více než $1.0^{\circ}\text{C}$ nebo 0.4%
<b>T</b>	$-250^{\circ}\text{C}$ až $350^{\circ}\text{C}$ ( $-328^{\circ}\text{F}$ až $662^{\circ}\text{F}$ )	Více než $1.0^{\circ}\text{C}$ nebo 0.75%	Více než $0.5^{\circ}\text{C}$ nebo 0.4%

Obrázek 18 - Rozsahy běžných termočlánků (OMEGA engineering, 2015)

Konstrukce může být provedena svařením dotýčných drátků do jednoho bodu/kuličky. Tento způsob je velmi rychlý a dostupný. Výhodou je možnost vyrobit velmi malé provedení, a tak zkrátit odezvu na minimum. Nevýhoda je ale v možnosti použití. Termočlánek je nechráněný a náchylný na poškození. Nelze jej požit v kombinaci s kapalinami z důvodu koroze nebo pro kovy, které jsou často používány jako uzemnění jiných systémů. Druhý způsob je takzvaná termočláneková sonda. V tomto případě je sonda umístěna do pláště, což je vlastně trubička nejčastěji z nerezové oceli. Výhodou je velká chemická odolnost. (OMEGA engineering, 2015)

### 3.3. 3D tiskárna

#### Princip 3D tisku

V dřívějších experimentech na podobné téma byly použity ucpávky z nevyhovujících materiálů, nebo byla cesta obráběním kovu příliš náročná a nákladná.

Moderní technologie 3D tisku, která byla pro mě v laboratořích dostupná, umožnila využít snadné a rychlé tvorby a úpravy modelu a následného vytisknutí z plastu, který velmi dobře odolával teplotám uvnitř serveru.

3D tisk je aditivní postup tvorby součástek (produktů). Na rozdíl od obrábění, kde se materiál ubírá, zde je přidáván. Před tiskem se nejdříve vytvoří v CAD systému model budoucího produktu. Ten je buď vytvořen celý najednou nebo je rozdělen na části, které se po vytisknutí spojí dohromady například lepením. CAD model je poté příslušným softwarem přenesen na požadovaný formát a odeslán k vytisknutí přes USB flash disk nebo prostřednictvím internetu.

Nanáší se v tenkých vrstvách, které se pohybují v řádech několika desetin nebo až setin milimetru (3D Systems, Inc., 2015). Objem objektu může být tvořen úplným vyplněním, častěji je ale užíváno určitého typu mřížky. To znamená, že v objektu jsou vytvořena žebra a je tedy z jisté části dutý. Aniž by ztratil mechanické vlastnosti, je výrobek velmi lehký. Nejčastěji se v dnešní době užívá 3D tisk pomocí plastů. Základní rozdělení tohoto materiálu je při užití v 3D tisku na tzv. ABS a PLA plast.

ABS, neboli Acrylonitrile butadiene styrene, je nejčastěji užívaný materiál z kategorie plastů. Je levný (1 kg materiálu stojí cca 800,- Kč) a má oproti PLA (Polylactic acid) lepší tepelnou odolnost. Nevýhodou je nutnost použít při tisku tepelně vyhřívanou podložku. PLA se hodí na větší objekty, které jsou určeny spíše pro vizuální, než funkční, účely. Při teplotách přesahujících 60 °C ztrácí pevnost a začíná být vláčný. Třetí materiál, který je možné využít je například PS (Polystyren). Účel tohoto materiálu je čistě podpurný. Využívá se jako podklad pro vytisknutí hlavní konstrukce objektu. Plastové materiály se pro tisk dodávají z velké většiny ve formě struny, která je naváděna do trysky a pomocí té je nanášena na pracovní plochu. (Průša, 2015)

Další materiály pro 3D tisk v dnešní době mohou být například sklo, sádra, písek, keramika, vosk nebo kov. Právě kov je po plastu nejrozšířenější. Ten je dodáván ve formě prášku, ale proběhly už i experimenty s tekutým kovem, kdy za pomoci slitiny galia a india bylo dosaženo velmi dobrých výsledků pro praktické využití. Oproti tomu tisk například ze skla je zatím užíván čistě pro estetické účely. 3D tisku je předvídána velká budoucnost a

to až do takové míry, že bude možné tisknout jídlo z konzumovatelných materiálů nebo pomocí kmenových buněk tisknout lidské orgány. (Science World, 2015)

V mém případě jsem pro tisk ucpávek použil dostupnou tiskárnu firmy 3D Systems®, model CUBE PRO. Tiskárna se nachází v laboratořích Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky Fakulty strojní ČVUT. K tisku byl jako materiál použit barevný plast.



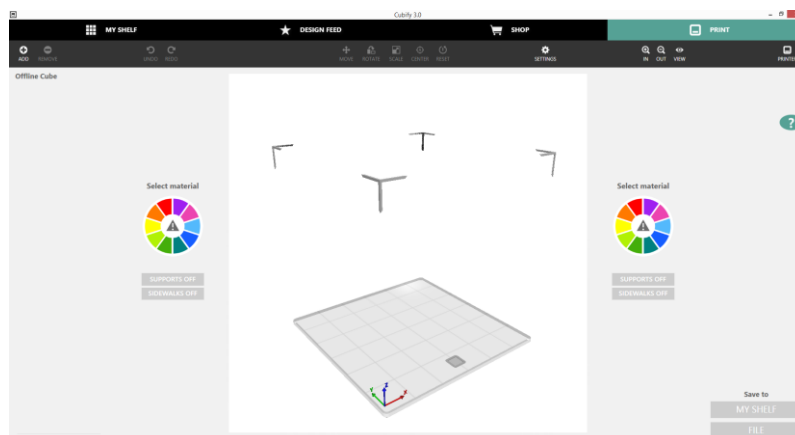
Obrázek 19 - 3D tiskárna CUBE PRO (3D Systems, Inc., 2015)

Základní technické specifikace tiskárny:

- Vnější rozměry: 57,8(š) x 59,1(v) x 57,8(d) cm
- Hmotnost: 44 kg
- Maximální velikost výrobku: 20,04(š) x 23(v) x 27,04(d) cm
- Rozlišení osy Z: 0,1 mm
- Tloušťka vrstvy: 0,07 – 0,3 mm
- Maximální operační teplota: 280 °C



Pro převedení modelů z CAD programu SOLIDWORKS byl použit formát *.stl*. Následné zpracování proběhlo v programu 3D tiskárny *Cubify\_3.0*.



Obrázek 20 - Cubify 3.0

### 3.4. Rozhraní PuTTY

K ovládání výkonu serveru bylo zapotřebí připojení PC s odpovídajícím rozhraním. Jako toto rozhraní jsem zvolil PuTTY, protože je jednoduché na obsluhu a funkčně dostačující.

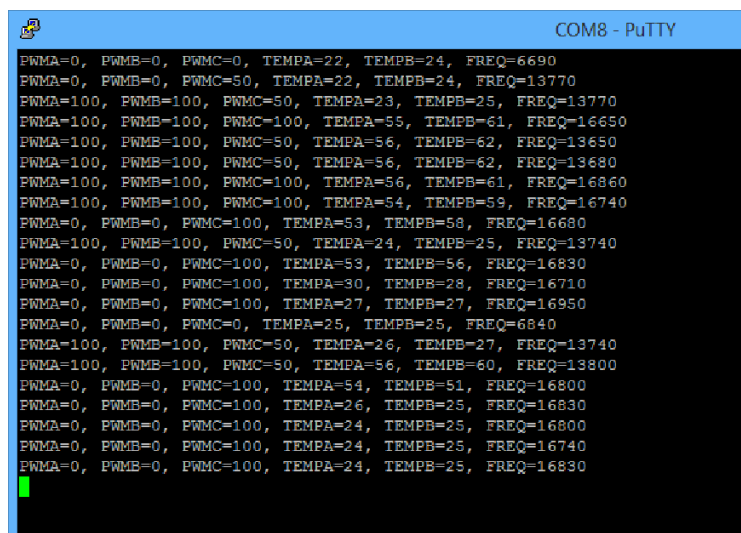
PuTTY je SSH klient pro propojení dvou PC nebo PC a periferních zařízení, jako například v našem případě počítače a serveru. Jedná se o volně dostupný software pod ochranou MIT licence (svobodná licence pod záštitou Massachusettského technologického institutu).

Příkazy pro ovládání serveru:

- |             |                                                  |
|-------------|--------------------------------------------------|
| SPWMA_1_100 | Spuštění výkonu pamětí na serveru „1“ na 100%    |
| SPWMB_1_100 | Spuštění výkonu procesorů na serveru „1“ na 100% |
| SPWMC_1_100 | Spuštění výkonu chlazení na serveru „1“ na 100%  |
| SPWMA_1_0   | Vypnutí výkonu pamětí na serveru „1“             |
| SPWMB_1_0   | Vypnutí výkonu procesorů na serveru „1“          |
| SPWMC_1_0   | Vypnutí výkonu chlazení na serveru „1“           |

GALL\_1                      Zobrazení základních parametrů serveru – úroveň výkonu a teploty chlazení, procesorů a paměti a frekvence měření

Pozn.: První číslice v příkazu označuje pořadové číslo serveru. V našem případě se jednalo o první server. Jelikož byl zapojen pouze jeden server, lze použít místo číslice „1“ i číslo „0“, které se používá pro příkaz pro všechny servery zapojené do systému.

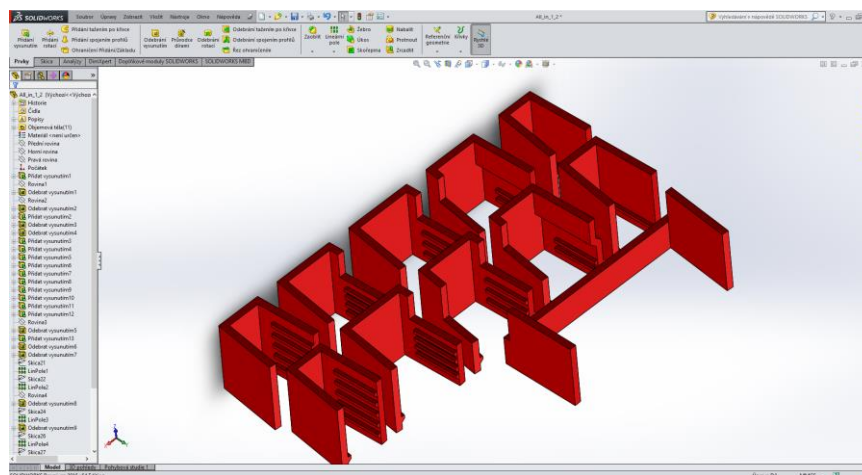


```
COM8 - PuTTY
FWMA=0, FWMB=0, FWMC=0, TEMPA=22, TEMPB=24, FREQ=6690
FWMA=0, FWMB=0, FWMC=50, TEMPA=22, TEMPB=24, FREQ=13770
FWMA=100, FWMB=100, FWMC=50, TEMPA=23, TEMPB=25, FREQ=13770
FWMA=100, FWMB=100, FWMC=100, TEMPA=55, TEMPB=61, FREQ=16650
FWMA=100, FWMB=100, FWMC=50, TEMPA=56, TEMPB=62, FREQ=13650
FWMA=100, FWMB=100, FWMC=50, TEMPA=56, TEMPB=62, FREQ=13680
FWMA=100, FWMB=100, FWMC=100, TEMPA=56, TEMPB=61, FREQ=16860
FWMA=100, FWMB=100, FWMC=100, TEMPA=54, TEMPB=59, FREQ=16740
FWMA=0, FWMB=0, FWMC=100, TEMPA=53, TEMPB=58, FREQ=16680
FWMA=100, FWMB=100, FWMC=50, TEMPA=24, TEMPB=25, FREQ=13740
FWMA=0, FWMB=0, FWMC=100, TEMPA=53, TEMPB=56, FREQ=16830
FWMA=0, FWMB=0, FWMC=100, TEMPA=30, TEMPB=28, FREQ=16710
FWMA=0, FWMB=0, FWMC=100, TEMPA=27, TEMPB=27, FREQ=16950
FWMA=0, FWMB=0, FWMC=0, TEMPA=25, TEMPB=25, FREQ=6840
FWMA=100, FWMB=100, FWMC=50, TEMPA=26, TEMPB=27, FREQ=13740
FWMA=100, FWMB=100, FWMC=50, TEMPA=56, TEMPB=60, FREQ=13800
FWMA=0, FWMB=0, FWMC=100, TEMPA=54, TEMPB=51, FREQ=16800
FWMA=0, FWMB=0, FWMC=100, TEMPA=26, TEMPB=25, FREQ=16830
FWMA=0, FWMB=0, FWMC=100, TEMPA=24, TEMPB=25, FREQ=16800
FWMA=0, FWMB=0, FWMC=100, TEMPA=24, TEMPB=25, FREQ=16740
FWMA=0, FWMB=0, FWMC=100, TEMPA=24, TEMPB=25, FREQ=16830
```

Obrázek 21 - Příkazové okno klienta PuTTY

### 3.5. Software SOLIDWORKS

Pro tvorbu veškerých 3D modelů, jak pro realizaci projektu, tak pro tvorbu dokumentace, jsem požil software SolidWorks.



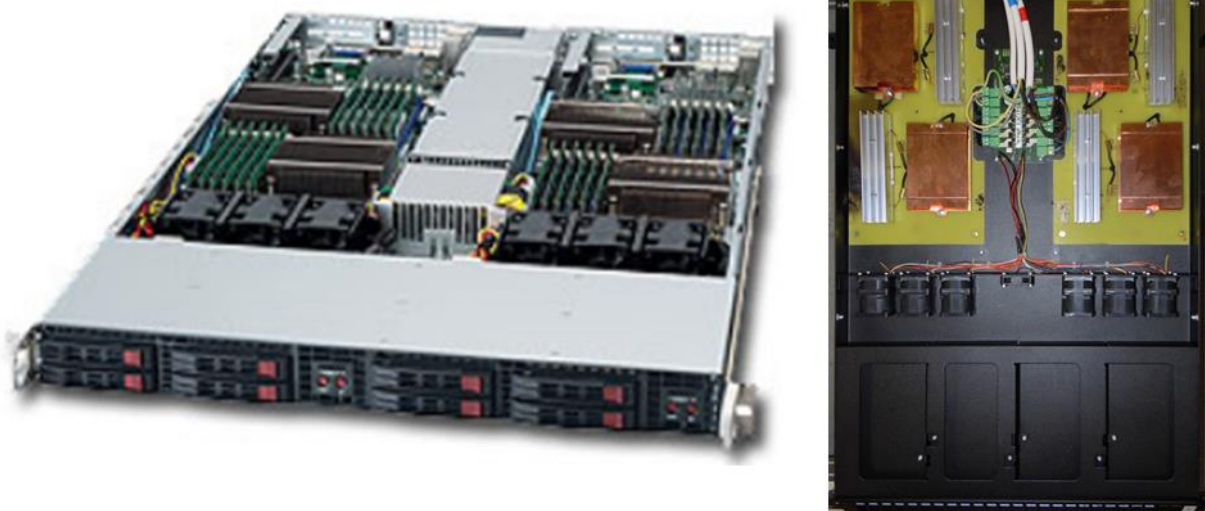
Obrázek 22 - SolidWorks

Jedná se o parametrický 3D CAD systém. Je to nástroj pro návrh, analýzy, správu dat a technické ilustrace, který zvyšuje produktivitu a pomáhá konstruktérům navrhovat lepší výrobky. Je možné připojit k němu velké množství doplňkových modulů pro analýzy a simulace modelů nebo jiné druhy zaměření, jako třeba návrhy elektrických obvodů. Pro tuto práci bylo využito základní prostředí 3D modelování a převod do formátu .stl z nativního formátu. (3E Praha Engineering, a.s., 2015)

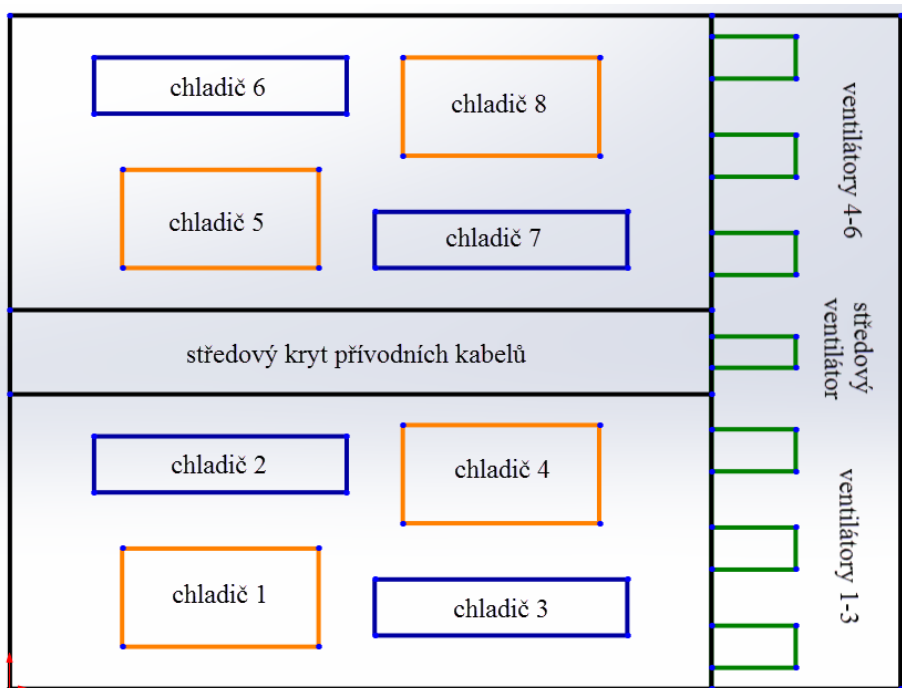
## 4. Experiment

### 4.1. Popis serveru

Z experimentálního datového centra postaveného v laboratořích Fakulty strojní na ČVUT byl vyjmut jeden server. V serveru jsou nahrazeny paměti a procesory. Místo nich jsou instalovány chladiče obdobného tvaru a vlastností. Na obrázku níže je zachycena skutečná podoba serveru (vlevo) a jeho provedení pomocí zjednodušujících prvků, neboli chladičů (vpravo). Paměťové moduly jsou nahrazeny hliníkovými topnými tělesy o výkonu 100 W. Procesory nahradily topné desky s odporovými spirálami o výkonu 150 W. Výška serveru je shodná s původním serverem Supermicro 1026TT, tedy 1U. Ve středu se nachází řídicí jednotka, která umožňuje plynulou regulaci výkonu v rozsahu 10 – 100 %. Na vstupu jsou simulovány 4 pevné disky. Celkový instalovaný tepelný výkon je 1000 W.



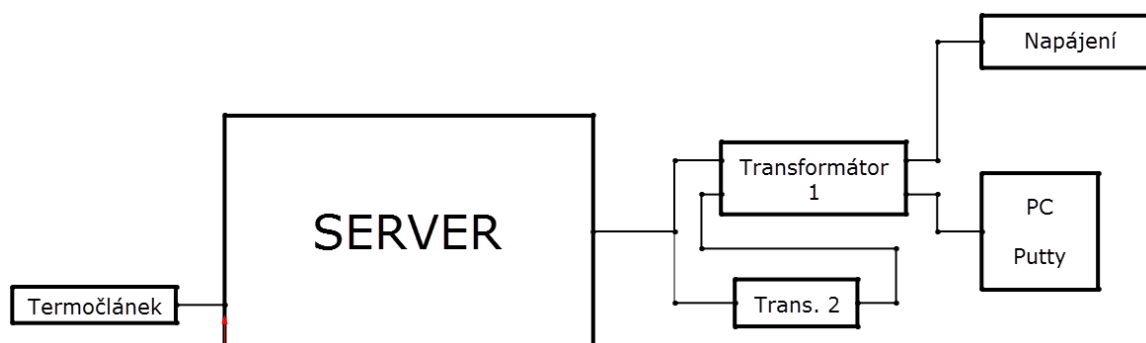
Obrázek 23 - Skutečný server - náhradní model (Novotný, Nožička, & Jansa, Model of heat simulator data centers, 2014)



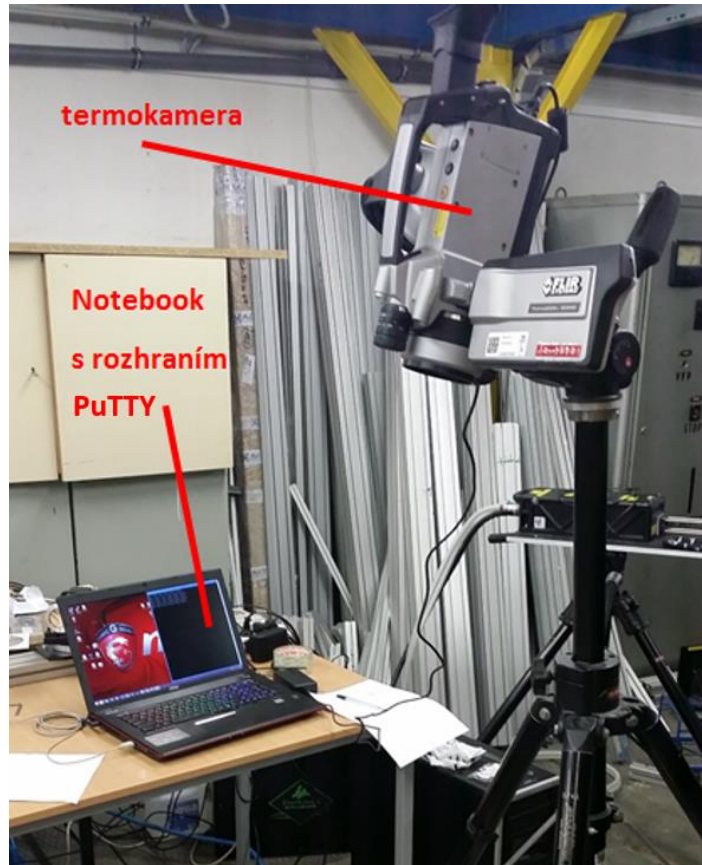
Obrázek 24 - popis serveru

## 4.2. Laboratoř

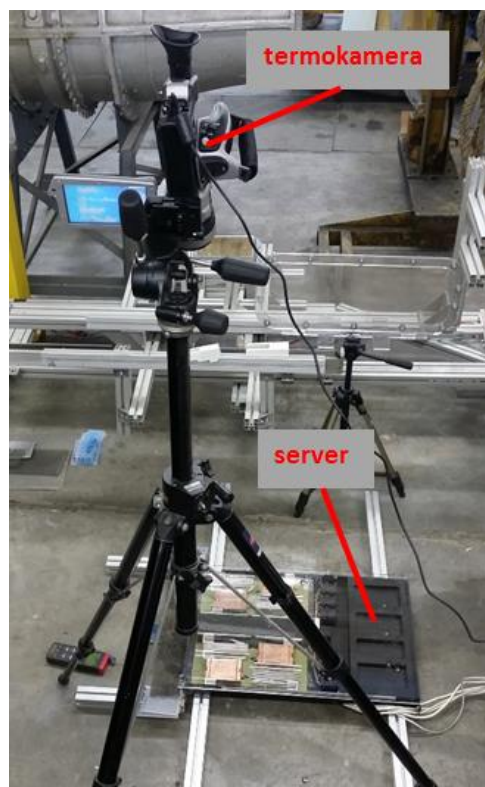
V laboratořích Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky Fakulty strojní ČVUT bylo vytvořeno vhodné prostředí pro měření teplot serveru. Pro co nejmenšího ovlivnění okolními zdroji tepla a světla bylo místo konání experimentu zvoleno v co nejvíce stíněné části laboratoře. Obrázek 25 je znázorněním blokového schématu experimentu. Další obrázky 26 - 28 dokumentují fyzickou podobu pracoviště.



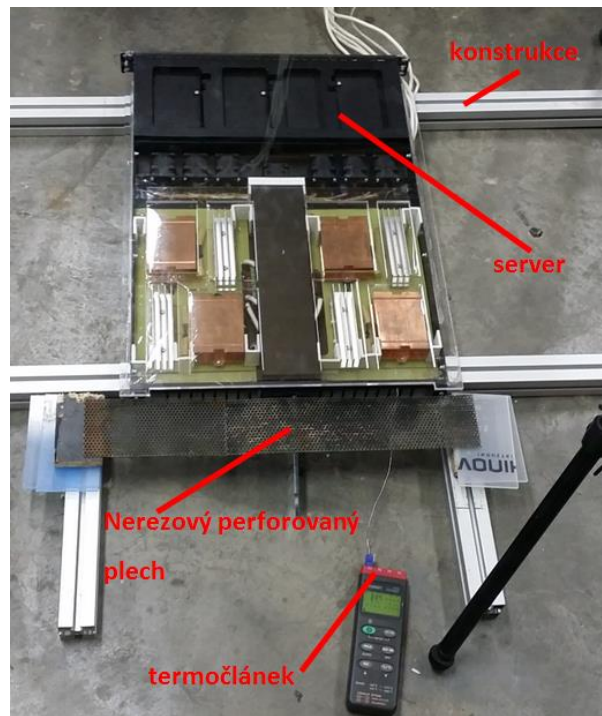
Obrázek 25 - Blokové schéma experimentu



Obrázek 26 - Laboratoř\_1



Obrázek 27 - Laboratoř\_2



Obrázek 28 - laboratoř\_3

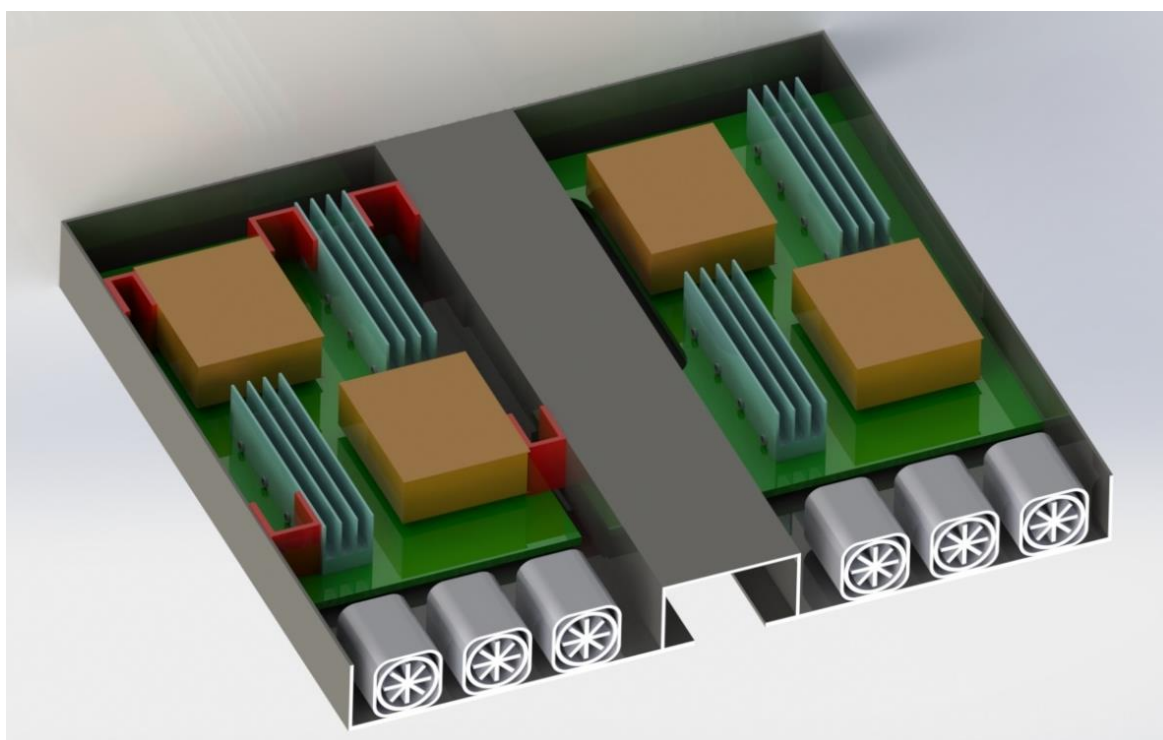
### 4.3. Optimalizace

Účelem práce bylo pokusit se o optimalizování chlazení jednotlivých komponent tak, aby rozložení tepla bylo rovnoměrnější a výsledné teploty na chladičích menší. Způsob, kterým jsem se rozhodl tohoto efektu docílit, spočíval v usměrnění proudu vzduchu z ventilátorů do jednotlivých míst serveru pomocí ucpávek. Už v dřívějších letech byly snahy o tuto optimalizaci, a to pomocí ucpávek z různých materiálů, jako například polystyren nebo různé pěny. Tato řešení ale nevyhovovala, protože nebyla dostatečně adaptivní na malé rozměry uvnitř serveru nebo ucpávky podléhaly zkáze, jelikož nebyly dostatečně odolné vůči vysokým teplotám. Nové řešení do tohoto problému vnesla v poslední době stále dostupnější technologie 3D tisku. Ta umožnila navrhnout vysoce přesné ucpávky, které by odpovídaly geometrickým požadavkům serveru. Další výhodou při užití této metody k řešení problému byla rychlost a flexibilita při změnách na geometrii ucpávek, která byla nutná pro co nejlepší optimalizaci. Díky použitým materiálům, konkrétně ABS plastu, jsou ucpávky také odolné vůči vysokým teplotám, které v serveru při delším provozu panují.



Nejdříve bylo nutné server osadit novým a výkonnějším ventilátorem ve středové části. Tento ventilátor zajišťuje chlazení řídicí jednotky, která sice neovlivňuje teplotní podmínky kolem samotných sledovaných komponent, ale je důležitá pro stabilní chod serveru při delším provozu a její přehřívání je nežádoucí.

Poté byl proveden prvotní návrh, kde se počítá s pěti jednotlivými ucpávkami, a ověřena kompatibilita vytisknutých kusů s geometrií serveru. Tento návrh podal první výsledky o snaze optimalizovat chlazení a rozložení teplot v severu. Výsledky ale nebyly uspokojivé, protože k vyššímu ochlazení komponent (hlavně v zadní části serveru) sice došlo, ale hliníkové komponenty vykazovaly velké tepelné vyzařování. Toto vyzařování bylo nejpatrnější za ucpávkami, které nedokonale směřovaly proud vzduchu. Následující obrázek ukazuje situaci bez optimalizace (pravá polovina) a situaci po první optimalizaci (levá polovina).

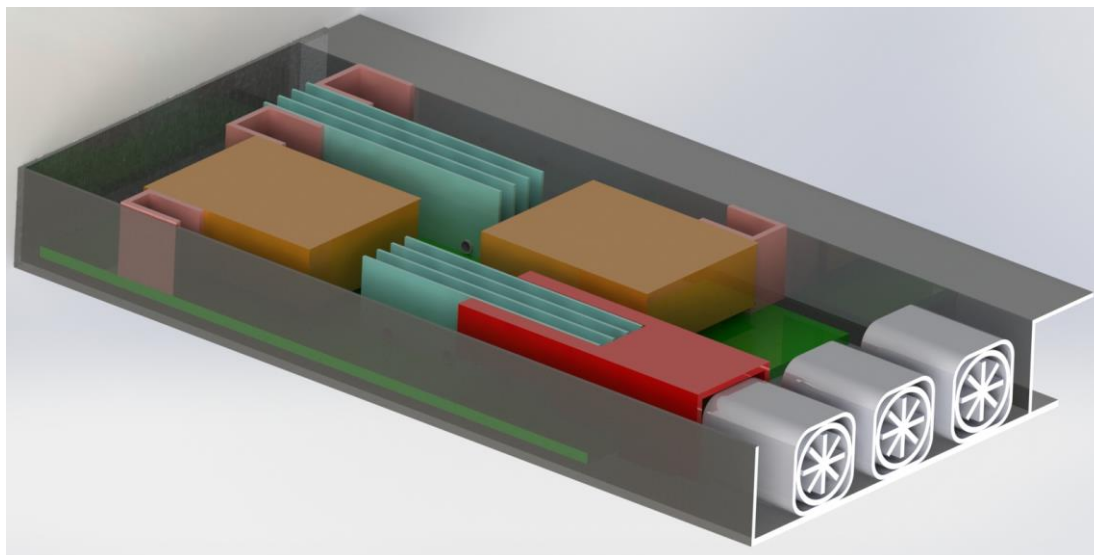


Obrázek 29 - vizualizace serveru

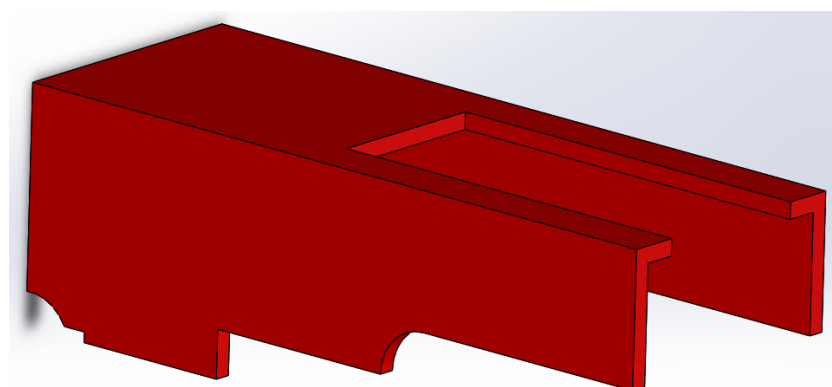
Výše zmíněný nedostatek jsem se snažil odstranit v dalším návrhu optimalizace, kde jedna jednoduchá ucpávka z každé poloviny serveru byla odstraněna a nahrazena tunelovou ucpávkou speciálně navrženou pro daný komponent. Ta měla odklonit celý



proud vzduchu z jednoho ventilátoru právě na nejvytíženější chladič. Zbylé dva chladiče pracovaly stejně, jako v případě první optimalizace. Tento způsob se ukázal jako nejlepší řešení a rozložení teploty v serveru bylo výrazně lepší, než jak tomu bylo před optimalizací. Na Obrázek 30 je vidět užití tunelové ucpávky místo jednoduché.



Obrázek 30 - Druhý stupeň optimalizace\_1



Obrázek 31 - detailní pohled na tunelovou ucpávku

#### 4.4. Způsob měření

Pro zjištění rozložení teplot v jednotlivých místech serveru jsem se rozhodl použít termokameru. Ta je schopna zachytit celou plochu serveru najednou a při správné kalibraci zachytit dostatečně citlivě změny teplot. Pro zobrazení teplotního pole, které vychází ze serveru spolu s vyfukovaným vzduchem, byla sestavena jednoduchá síť z nerezového pletiva. Ta byla umístěna vertikálně před server. Tento způsob měření bohužel nebylo možné použít, protože termokamera nebyla schopna detekovat teploty

na síti. Na vině byla malá tloušťka jednotlivých vláken pletiva a malé rozlišení termokamery. Měřitelné výsledky přinesl až pokus se sice řidším pletivem, které ale mělo silnější jednotlivá vlákna. To jsem umístil horizontálně před výfukovou část serveru do poloviny jeho výšky.

Aby bylo možné relevantně zachytit teploty uvnitř serveru bez ovlivnění prouděného vzduchu, bylo nutné vytvořit alternativní víko místo původně osazeného kovového. Z plexisklové desky bylo vyříznuto víko s otvory umístěnými nad sledovanými chladiči, protože plexisklo by odstínilo všechny teplotní projevy. Zároveň byly tyto otvory potaženy z vnitřní strany pečící folií, aby neunikal proud vzduchu určený pro sledované komponenty, ale byly viditelné teplotní změny.

Jako kontrolní měření byl ještě na jedno místo nejvzdálenějšího chladiče připojen termočlánek, který fungoval jako porovnávací hodnota pro výsledky z termokamery a také sloužil pro její prvotní kalibraci.

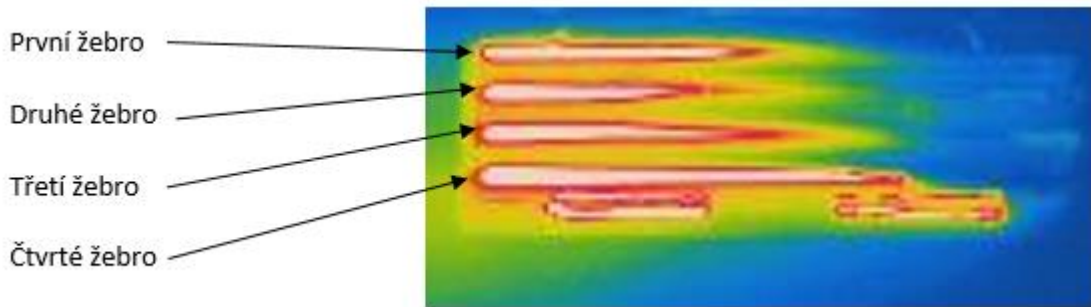
Samotný chod serveru byl řízen z notebooku pomocí rozhraní *PuTTY*, které umožňuje pomocí jednoduchých příkazů variabilně měnit výkon všech tří regulovatelných součástí serveru tedy výkonové části, do které spadají náhradní modely za paměti a procesory, a větráků neboli chlazení. Dále je možné také zobrazit okamžitý stav zatížení a teplot jednotlivých komponent.

#### 4.5. Zpracování hodnot

Z jednotlivých termosnímků byla sestavena kompozice vždy jednoho chladiče ve všech třech stupních optimalizace. V té jsem si vždy definoval rovinu řezu, ve které jsem podle teplotní stupnice z termokamery odečetl teplotu v tímto řezem přesně definovaném místě. Tyto roviny jsem zvolil tři, protože teplota po délce chladiče není konstantní. Více rovin by zpřesňovalo celý pohled na výsledky měření, ale pro náš případ je to dostačující počet.

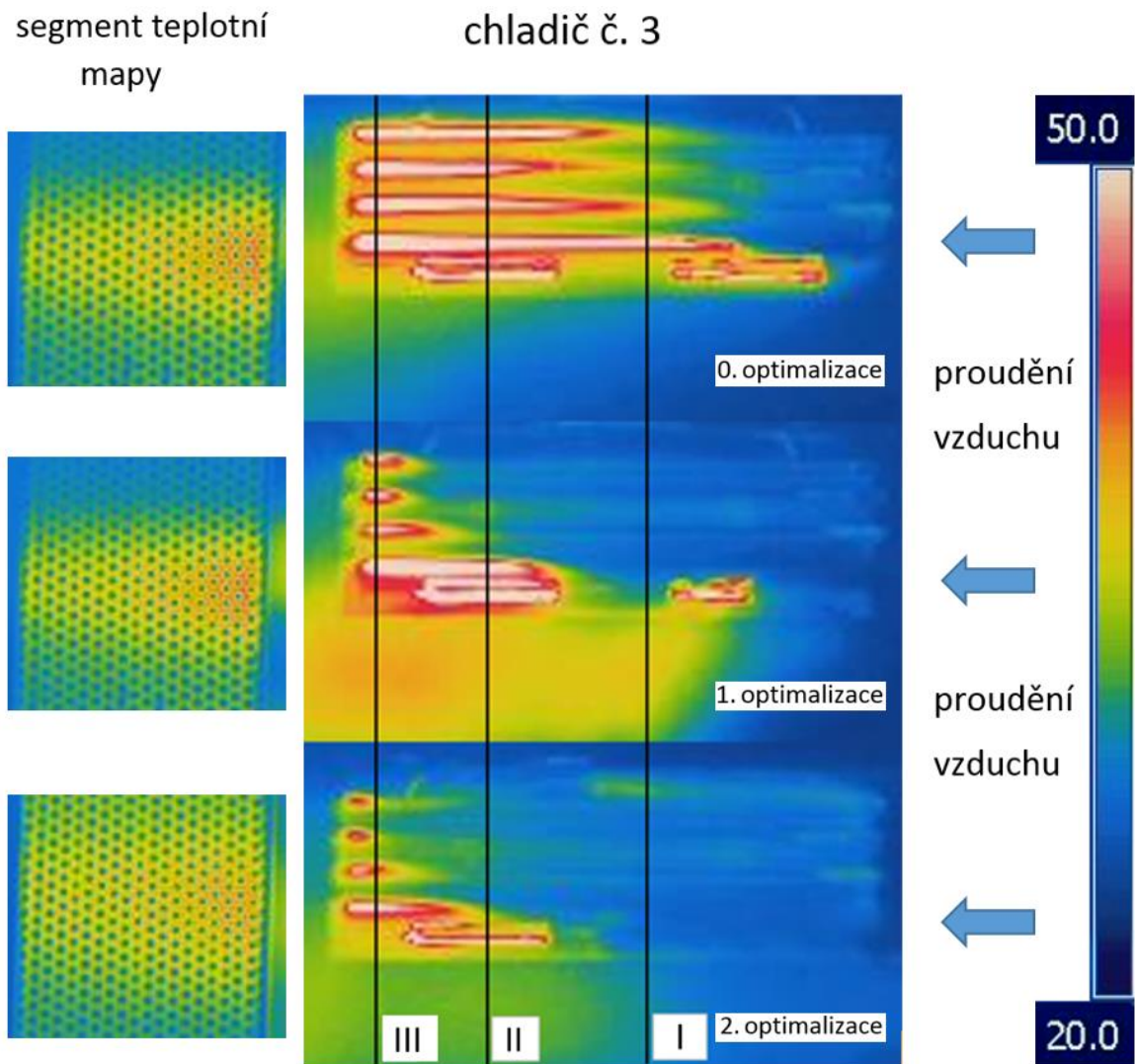
Pomocí odečtených teplot v jednotlivých místech byly vytvořeny grafy, ve kterých je vynesena závislost teploty na stupni optimalizace na předem definovaných místech chladiče. Tyto grafy nám ukazují, jak stupeň optimalizace ovlivnil teplotu v daném místě chladiče. V ideálním případě by křivky s rostoucím stupněm optimalizace měly klesat.

Žebra hliníkového chladiče, který představuje funkci paměťového modulu.



Obrázek 32 - Označení žebor chladiče

Chladič číslo 3 - výkon chlazení 100 %

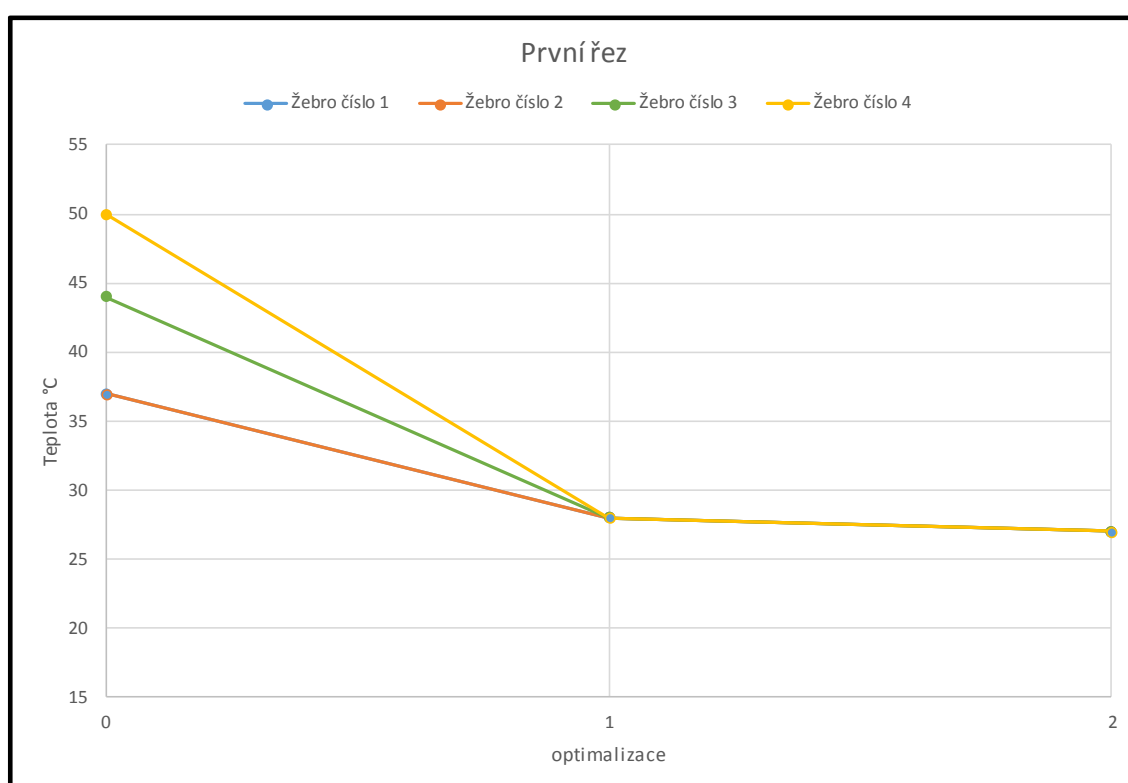


Obrázek 33 - Kompilace třetího chladiče

Na Obrázek 33 je kompilace chladiče číslo tři ve všech třech stupních optimalizace. Svislé čáry zobrazují zvolené řezy, ve kterých zkoumáme teplotní změny oproti předešlým variantám. Tyto řezy jsou označeny římskými číslicemi I – III.

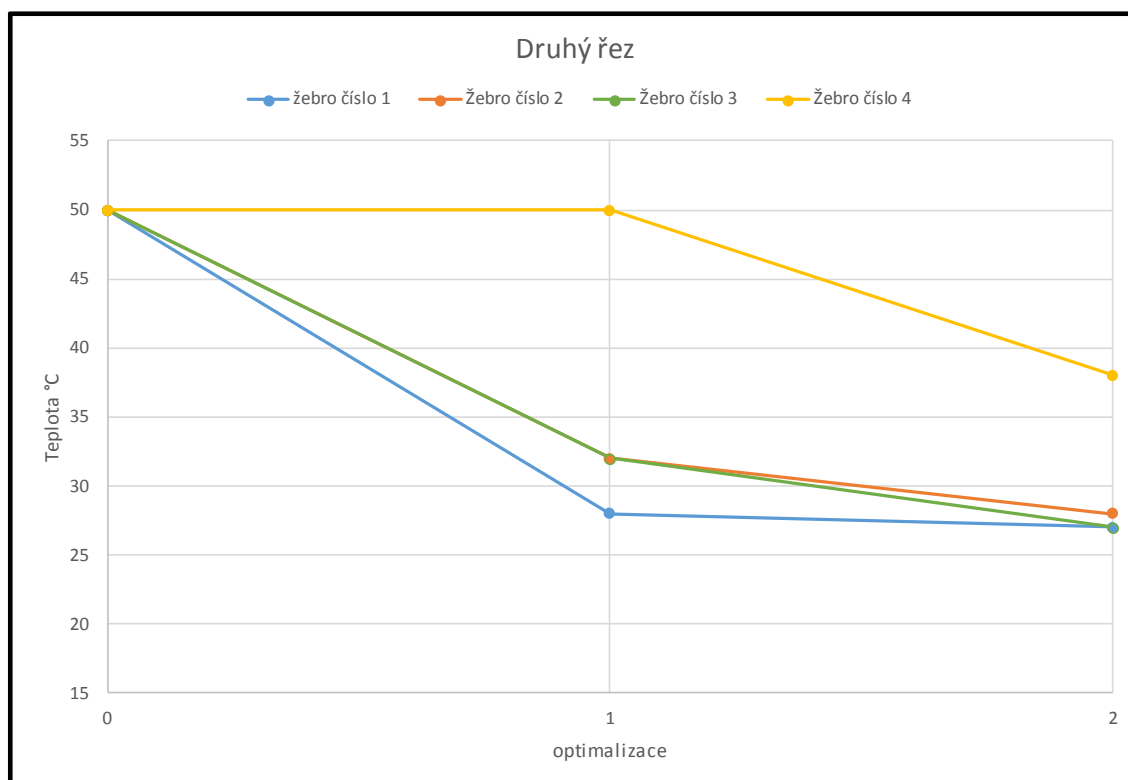
V levé části jsou segmenty z teplotní mapy, která následovala bezprostředně po výfuku vzduchu ze serveru. Zde je i pouze vizuálně vidět pokles teploty. V pravé části obrázku se nachází teplotní škála, při které byly termoscopy pořízeny.

Následující tři grafy zobrazují teplotní poměry právě v těchto řezech.



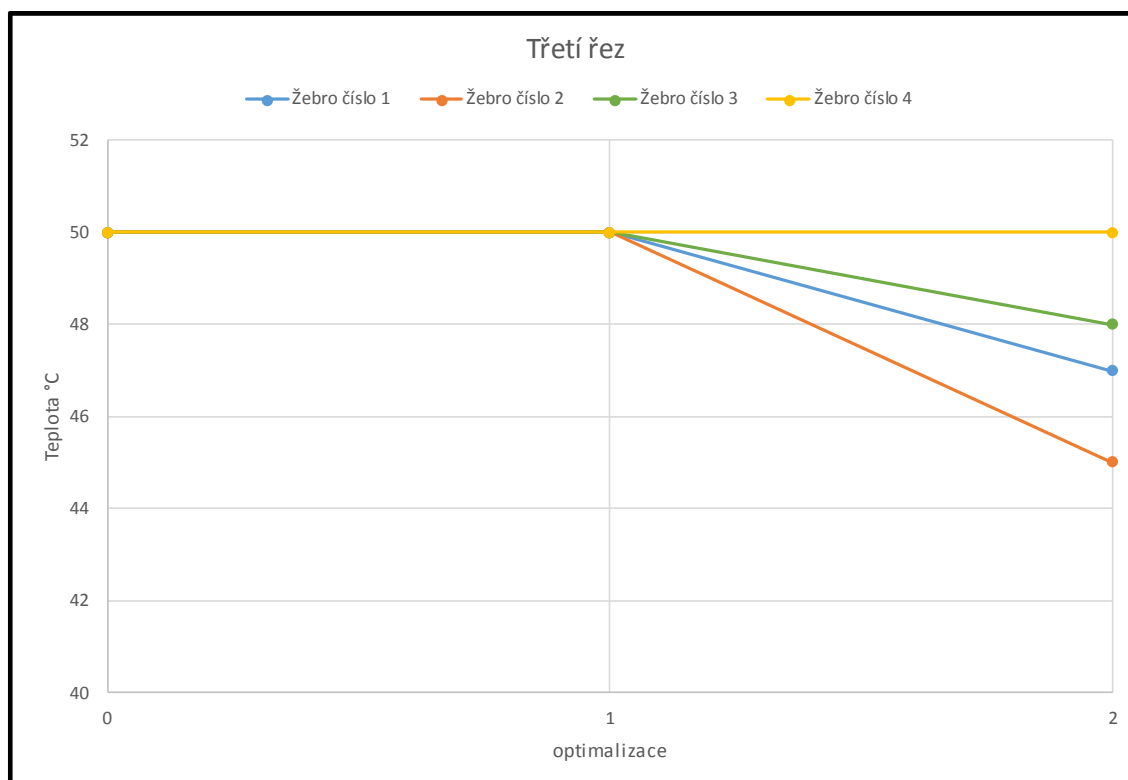
Graf 1 - Chladič č.3\_první řez - výkon chlazení 100%

Graf zobrazuje situaci zhruba v polovině chladiče. Ani ve stavu bez optimalizace zde již hodnoty nedosahují maxima na všech žebrech. Již první optimalizace ale dokázala snížit všechny teploty na jednu hodnotu 28 °C, což je požadovaný, ideální stav. Druhá optimalizace už pouze nepatrně zlepšila výsledek na teplotu 27 °C.



*Graf 2 - Chladič č.3\_druhý řez - výkon chlazení 100%*

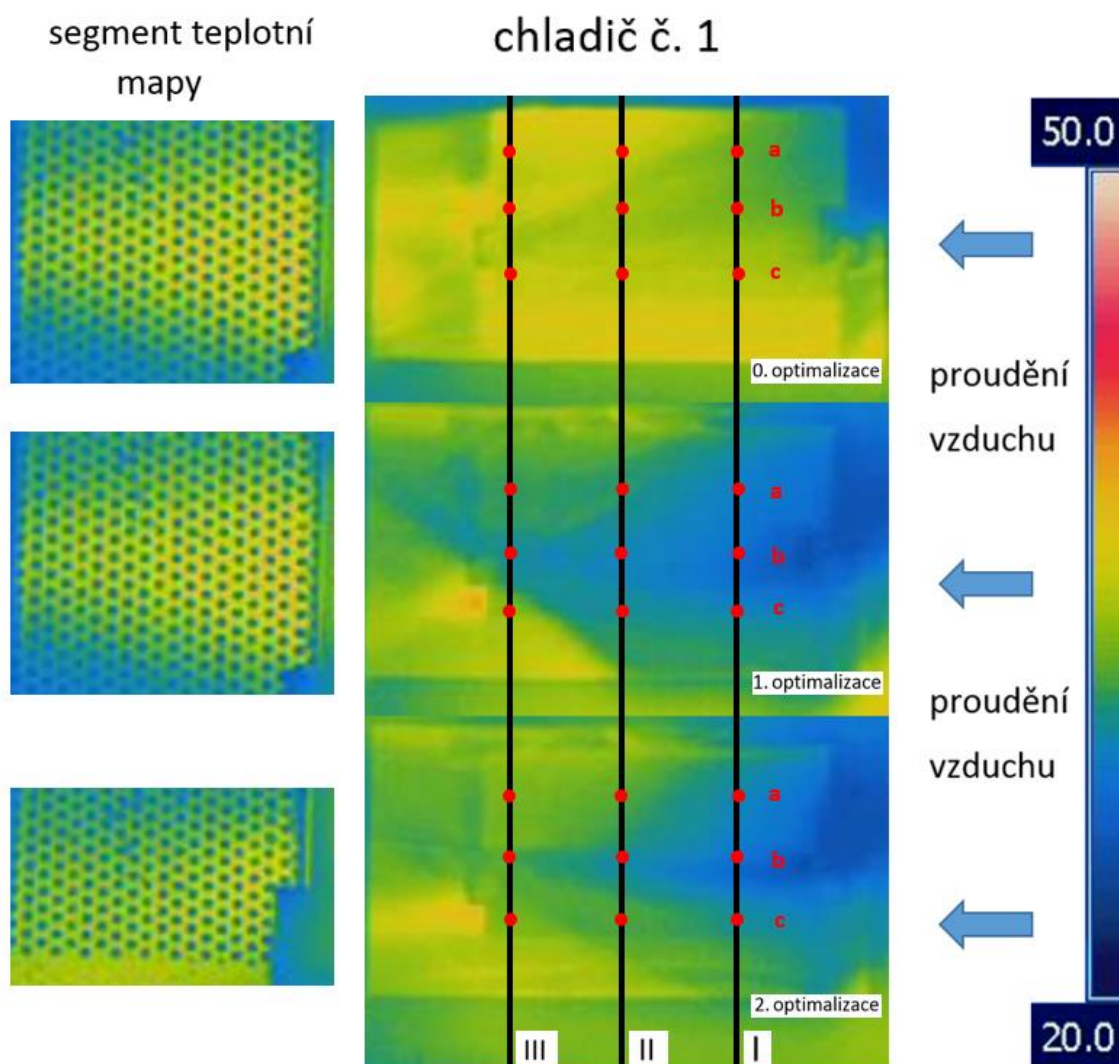
Graf 2 zobrazuje situaci ve druhém řezu. Zde již první optimalizace na žebrech 1 – 3 vykazuje výrazné zlepšení na hodnotu 28 – 32 °C; na žebro číslo čtyři není detekována změna. Ve druhé optimalizaci je patrné zlepšení situace na čtvrtém žebro, kde jsme dosáhli snížení teploty na hodnotu 38 °C.



Graf 3 - Chladič č.3\_třetí řez - výkon chlazení 100%

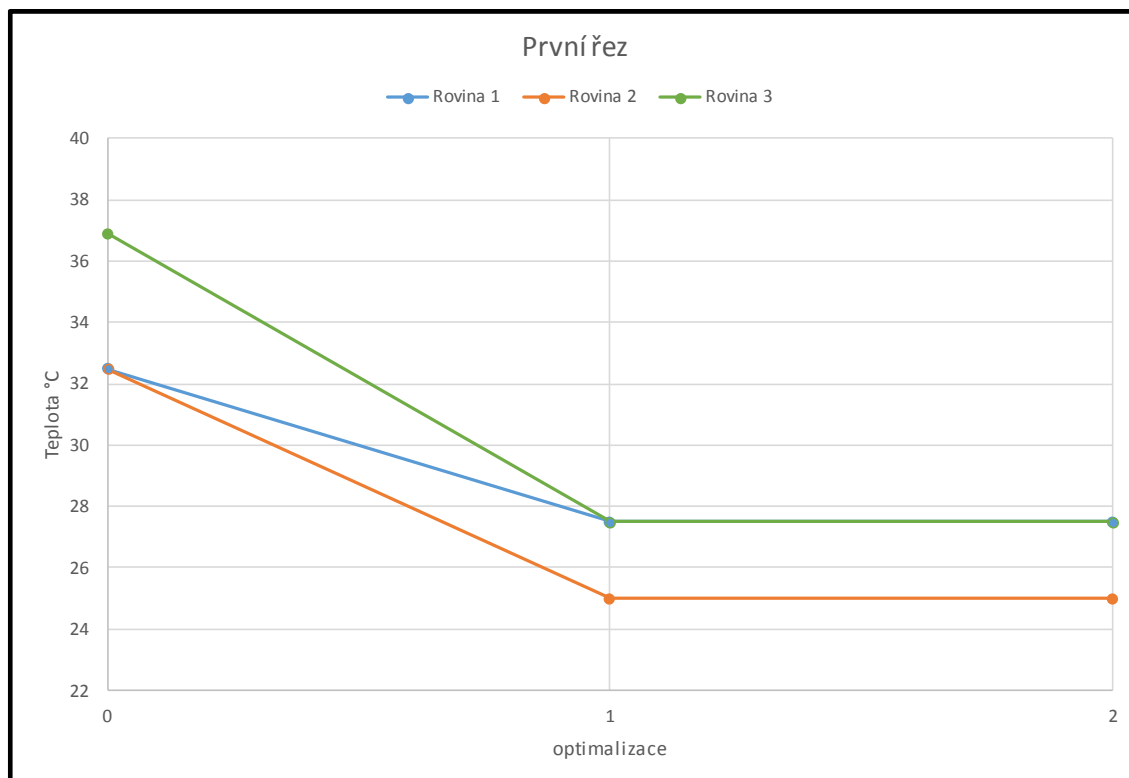
Z Graf je patrné, že v prvním řezu, neboli na konci třetího chladiče, nebyla detekována žádná teplotní změna v porovnání původního stavu a první optimalizace; teplota činí 50 °C. Ve druhé optimalizaci je již situace lepší o několik jednotek stupňů; teplota chladiče zde padá na jednotlivých žebrech na 45 - 48 °C. Nejhůře chlazené čtvrté žebro je i ve druhé optimalizaci na maximu své teploty, tedy na 50 °C.

Chladič číslo 1 - výkon chlazení 100 %



Obrázek 34 - Kompilace prvního chladiče

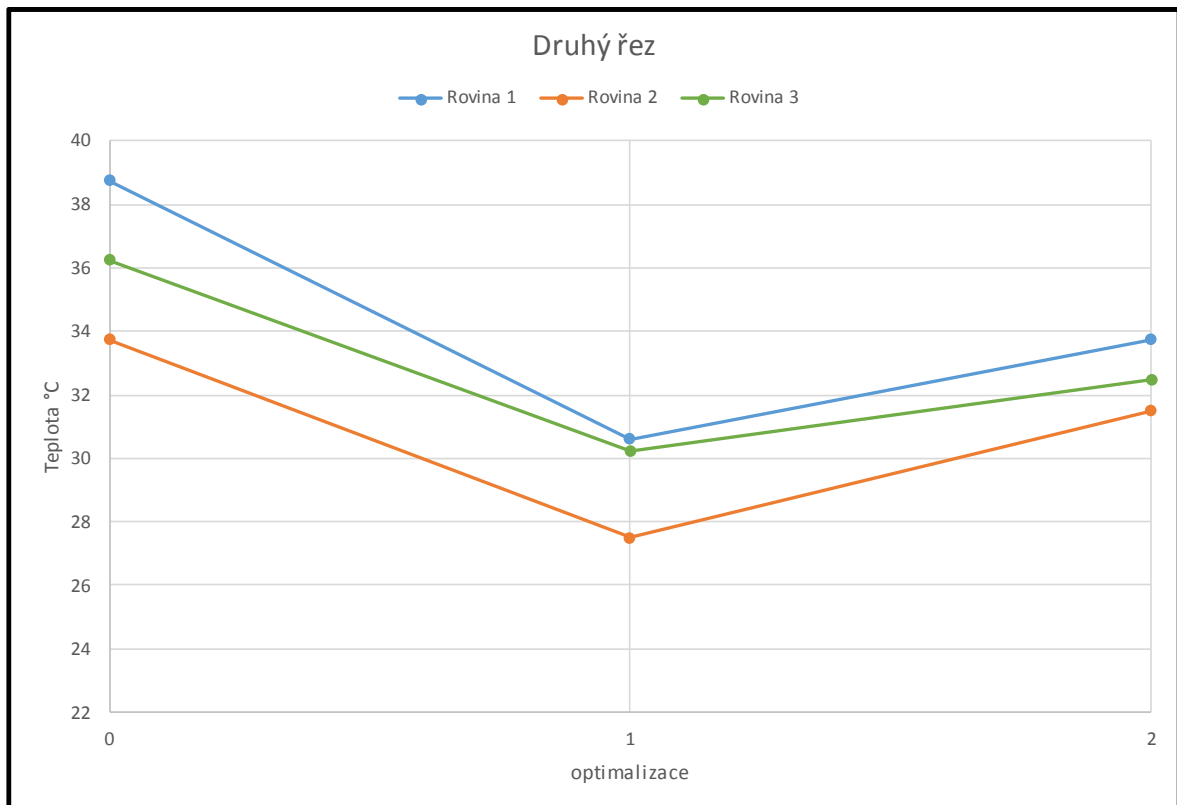
Na výše uvedeném obrázku 34 vidíme kompilaci teplotních charakteristik prvního chladiče. Jedná se o náhradu procesoru, tedy chladiče bez žeber. Proto jsem si definoval nejen roviny řezu označené I – III, ale také pomocné roviny označené a – c. Tento postup vytvořil síť bodů, ze kterých bylo možné sestavit následující grafy 4 - 6. Změny teplot zde nejsou tak patrné, jako u chladiče č.1, ale i tento modul dobře reflektuje změny teplotních poměrů v serveru způsobené optimalizacemi.



Graf 4 - Chladič č.1\_první řez - výkon chlazení 100%

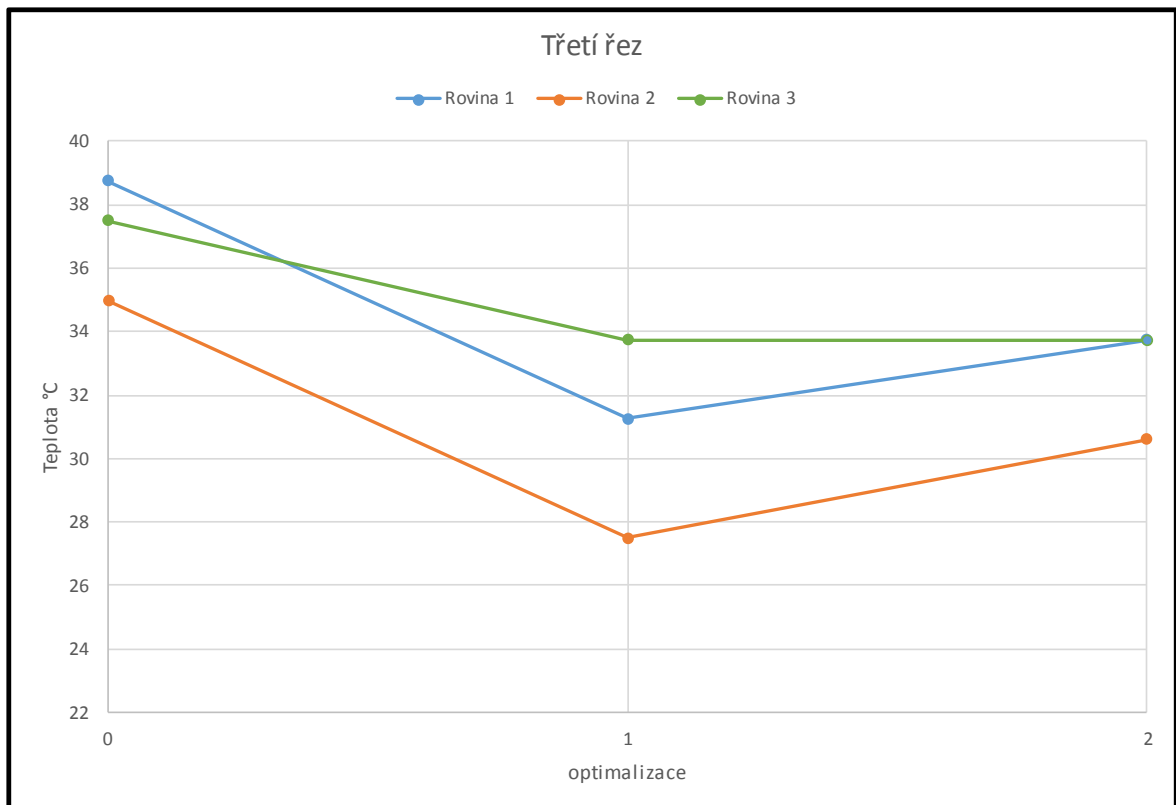
V grafu 4 vidíme velké snížení teploty hned první optimalizací, a to až o 10 stupňů. Nové hodnoty jsou 25/27 °C z původních 32,5/37 °C. Z grafu je také patrné, že druhá optimalizace již neměla na teploty vliv.





Graf 5 - Chladič č.1\_druhý řez - výkon chlazení 100%

V místě druhého řezu přinesla první optimalizace pokles teplot průměrně o 5 °C. Druhá optimalizace situaci sice mírně zhoršila, ale užitek z této optimalizace pro celý server dokumentuje třetí chladič, který je popsán výše, a proto nám nárůstek teplot v řádu jednotek stupňů v tomto případě nevadí.



Graf 6 - Chladič č.1\_třetí řez - výkon chlazení 100%

Třetí řez dokumentuje obdobné chování teplot, jaké nastalo ve druhém řezu. I zde můžeme konstatovat, že mírný nárůst teplot ve třetím řezu je v porovnání s užítkem v celém serveru zanedbatelný.

## 5. Závěr

V první části bakalářské práce jsem se teoreticky věnoval tématu chlazení datových center. Obsahem rešerše je základní definice datových center, jejich historie, uspořádání v moderní době nebo zatížení jednotlivých sekcí center. Další část, která úzce navazuje na první, je detailnější zkoumání metrik datových center. Po výčtu metrik nejčastěji používaných v dnešní době k hodnocení datových center, jsem se věnoval více těm metrikám, které souvisí s dalším průběhem mé práce, jako například metriky popisující chlazení nebo proudění kapalin v centru.

V další části jsem popsal server nacházející se v laboratořích ČVUT a zobrazil jej pomocí fotografií přímo z pracoviště, schematicky a pomocí 3D vizualizace.

Pro vnitřní optimalizaci serveru jsem v CAD programu vytvořil ucpávky, které jsem vytiskl na 3D tiskárně. Po změření teplot v serveru jsem mohl zjistit nedostatky této první varianty. Dospěl jsem k závěru, že by bylo lepší navrhnout pro druhou optimalizace nové ucpávky s lepší geometrií. V důsledku toho jsem některé jednoduché ucpávky nahradil tunelovými, což zvýšilo efekt chlazení. Server byl řízen pomocí notebooku s rozhraní PuTTY.

V průběhu práce bylo navrženo několik způsobů odečtu teplot ze serveru. Po zvážení dostupných variant jsem se rozhodl snímat teplotu serveru termokamerou pomocí vrchního pohledu a jako kontrolní měření použít termočlánek přiložený k jednomu chladiči serveru. Při snímání teploty bylo použito alternativní víko serveru. Měření probíhalo ve dvou výkonových rovinách chlazení, a to 50 % a 100 %.

Díky navrženým optimalizacím se v některých částech podařilo snížit teplotu z původních 50 °C na 27 °C, což je úbytek teploty o 54%. V žádném místě naproti tomu nedošlo vlivem mého zásahu ke zvýšení teploty více než o jednotky stupňů.

V příloze přikládám kompletní okomentované snímky z jednotlivých měření.

## Bibliografie

- 3D Systems, Inc. (7. Květen 2015). *CubePro*. Načteno z Cubify.com:  
<http://cubify.com/cubepro>
- 3E Praha Engineering, a.s. (15. červen 2015). *Solidworkd*. Načteno z 3epraha:  
<http://www.3epraha.cz/solidworks>
- Altron. (23. Duben 2015). *altronds.cz*. Načteno z Řešení: <http://www.altronds.cz/pevne-datove-centrum/>
- Benestra. (23. Duben 2015). *Dátové centrum*. Načteno z Benestra:  
<http://www.benestra.sk/siet/datove-centra>
- BusinessIT.cz. (2012). *Moderní datová centra*. Bispiral s.r.o. Načteno z BusinessIT:  
[http://www.businessit.cz/ebooks/datova\\_centra.pdf](http://www.businessit.cz/ebooks/datova_centra.pdf)
- CIATIK TRADE s.r.o. (9. červenec 2012). *Co je to vlastně Free cooling*. Načteno z tzbinfo:  
<http://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/8799-co-je-to-vlastne-free-cooling>
- Conteg s.r.o. (22. Duben 2015). *Datová centra Conteg*. Načteno z Conteg.cz:  
<http://www.conteg.cz/design-datovych-center>
- Elektro. (18. Květen 2012). *odbornecasopisy.cz*. Načteno z Elektro - časopis pro elektrotechniku: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/abb-brno-dodavatelem-pro-obri-datove-centrum-spolecnosti-facebook-u-severniho-polarniho-kruhu--446>
- Forbes. (23. Duben 2015). *Forbes*. Načteno z Forbes:  
<http://www.forbes.com/pictures/eimh45mddm/lakeside-technology-center/>
- Křížek, A. (2012). *Nové metriky datových center*. Data center world conference & expo. Altron.
- Kunst, J., Beneš, J., & Volf, R. (ISSN 1805-613X. Vol 2, No 2 2013). Optimalizace nákladů na provoz datového centra. *AIP Scholaris*, stránky 8-22.

- Magnus K. Herrlin, P. (2008). Airflow and Cooling Performance of Data Centers: Two Performance Metrics. V A. S. Heating, *ASHRAE Transaction* (stránky 182-187).
- Marcel, K. (2005). *Měření teploty - senzory a měřící obvody*. Praha: nakladatelství BEN - technická literatura.
- Miller, R. (27. Listopad 2011). *Facebook Goes Global With Data Center in Sweden*. Načteno z Data center Knowledge: <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2011/10/27/facebook-goes-global-with-data-center-in-sweden/>
- Moore, J., Chase, J., Parthasarathy, R., & Ratnesh, S. (2. Březen 2005). *Unix*. Načteno z Making Scheduling "Cool":: [http://static.usenix.org/event/usenix05/tech/general/full\\_papers/moore/moore\\_html/](http://static.usenix.org/event/usenix05/tech/general/full_papers/moore/moore_html/)
- Netguru. (23. Duben 2015). *Kam kráčíš, datové centrum?* Načteno z Netguru.cz: <http://www.netguru.cz/odborne-clanky/kam-krai-datove-centrum.html>
- Novotný, J., Matěcha, J., & Nožička, J. (2014). *Undesirable effects of bypass flow field in data center flow management*. Prague: Department of Fluid Dynamics and Thermodynamics, Faculty of Mechanical Engineering, CTU in Prague.
- Novotný, J., Nožička, J., & Jansa, J. (2014). Model of heat simulator data centers. Praha: Department of Fluid Dynamics and Thermodynamics, Faculty of Mechanical Engineering, CTU in Prague.
- OMEGA engineering. (7. Květen 2015). *Termočlánky - snímače pro měření teploty*. Načteno z omeganeg.cz: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>
- Pojer, M. (17. Prosinec 2013). Co všechno dokáže ovlivnit horký vzduch? *MM Průmyslové spektrum*, str. 74.
- Průša, J. (7. Květen 2015). *Výběr 3D tiskárny*. Načteno z Josefprusa.cz: <http://josefprusa.cz/vyber-3d-tiskarny/>

Science World. (7. Květen 2015). *3D tisk ze skla, písku i kmenových buněk*. Načteno z  
Science World: <http://www.scienceworld.cz/aktuality/3d-tisk-ze-skla-pisku-i-kmenovych-bunek/>

Termokamera. (23. Duben 2015). *Termokamera.cz*. Načteno z  
<http://www.termokamera.cz/>

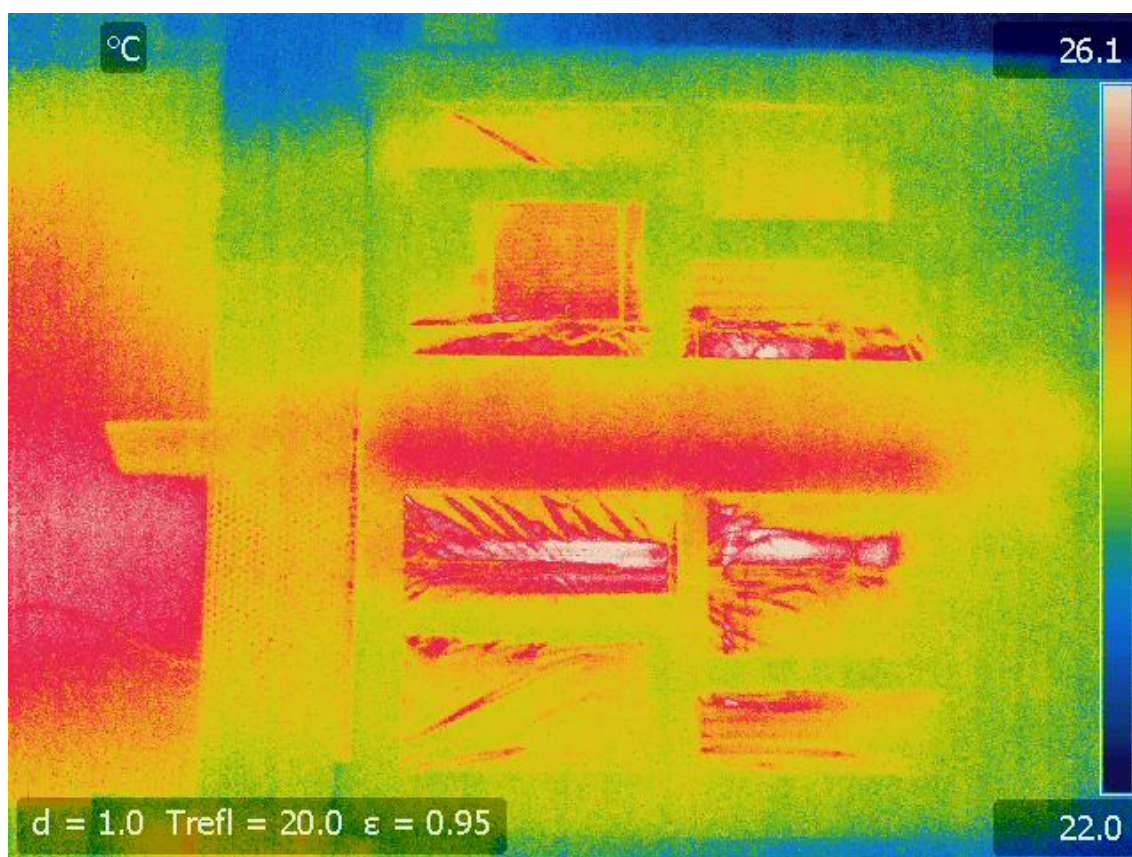
Vladimír, L. (2005). *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. Praha: nakladatelství BEN -  
technická literatura.

## 6. Příloha

### Měření

Nejprve byla provedena autokalibrace při nezatíženém stavu, jak je patrné z Obrázek 35. Ta ale není z hlediska výsledků příliš průkazná. Je zde vidět, jak folie nebo plexisklo, ovlivňuje teplotní výstup, i když nijak výrazně. Teplotní rozsah je v tomto případě pouze 4,1 °C, a proto změny v barevném spektru odpovídají pouze jednotkám stupňů. Povrchové teploty všech součástí jsou přitom stejné.

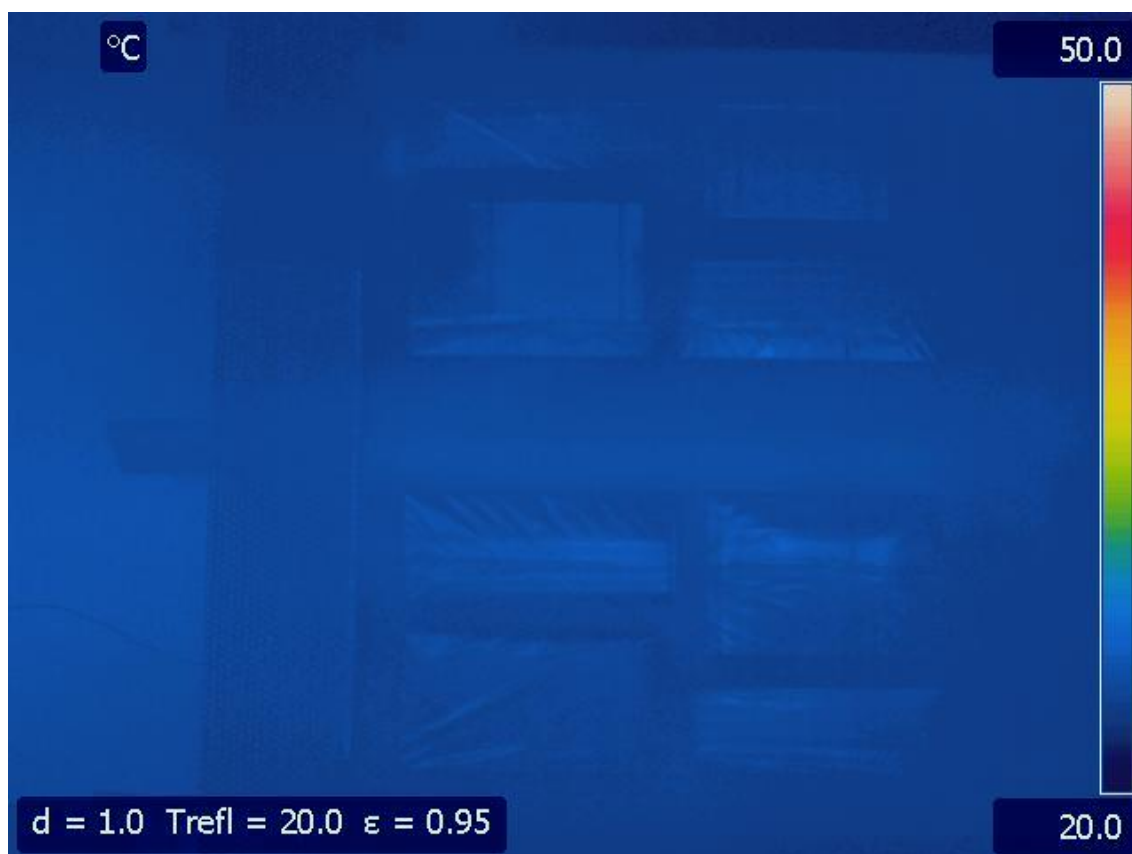
Kontrolní teplota z termočlánku: 23,6 °C



Obrázek 35 - nezatížený stav – autokalibrace

Obrázek 36 pořízený také v nezatíženém stavu, ale omezený z obou stran hraničními teplotami (20 °C v případě spodní a 50 °C v případě horní hranice) nám již udává referenční nulový stav pro odečtení relevantních hodnot z pozdějších měření. Jak je totiž patrné z minulého snímku, materiály použité pro krytí i materiály jednotlivých komponent měření lehce zkreslují.

Kontrolní teplota z termočlánku: 23,6 °C

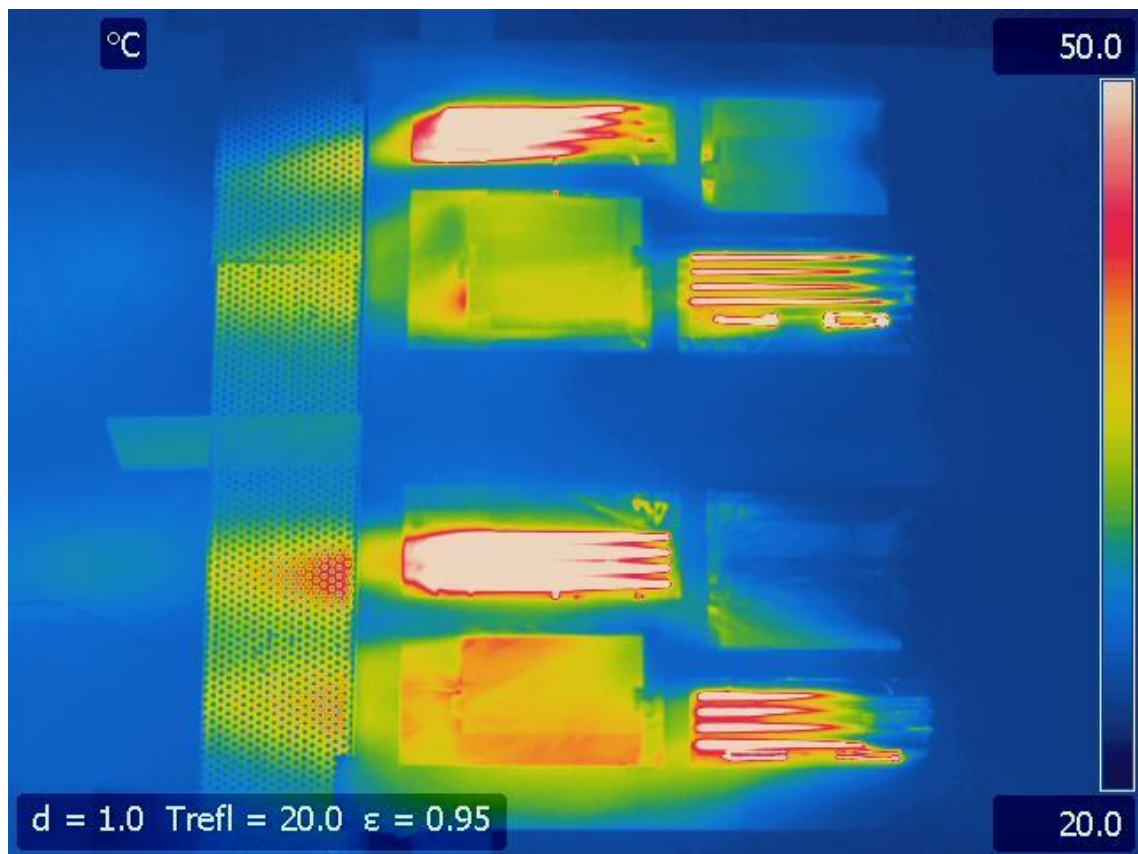


Obrázek 36 - definovaný teplotní rozsah - nezatížený stav



Po zapnutí chlazení na polovinu výkonu byl pořízen Obrázek 37. Jedná se o stav serveru bez optimalizace, označován jako „stupeň optimalizace 0“. Je zde vidět značné přehřívání chladičů nahrazujících paměti. Dostáváme se zde na teploty přesahující 50 °C na značně velké ploše komponent.

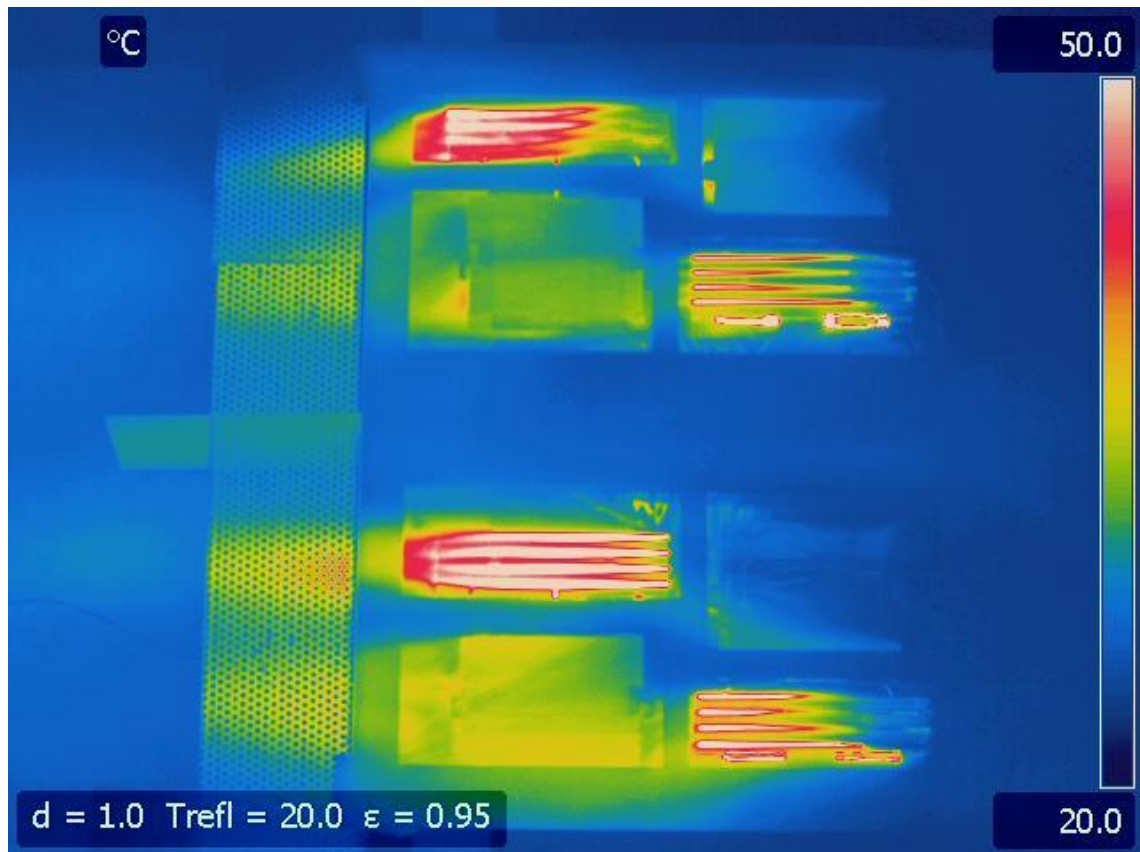
Kontrolní teplota z termočlánku: 47,3 °C



Obrázek 37 - bez optimalizace - výkon chlazení 50 %

Při stejném stavu, ale zvýšení výkonu chlazení na 100%, je na Obrázek 38 patrné snížení teploty, a to jak na komponentech, tak na teplotní mapě. I zde jsou teploty přesahující 50°C jasně patrné, i když v menším množství.

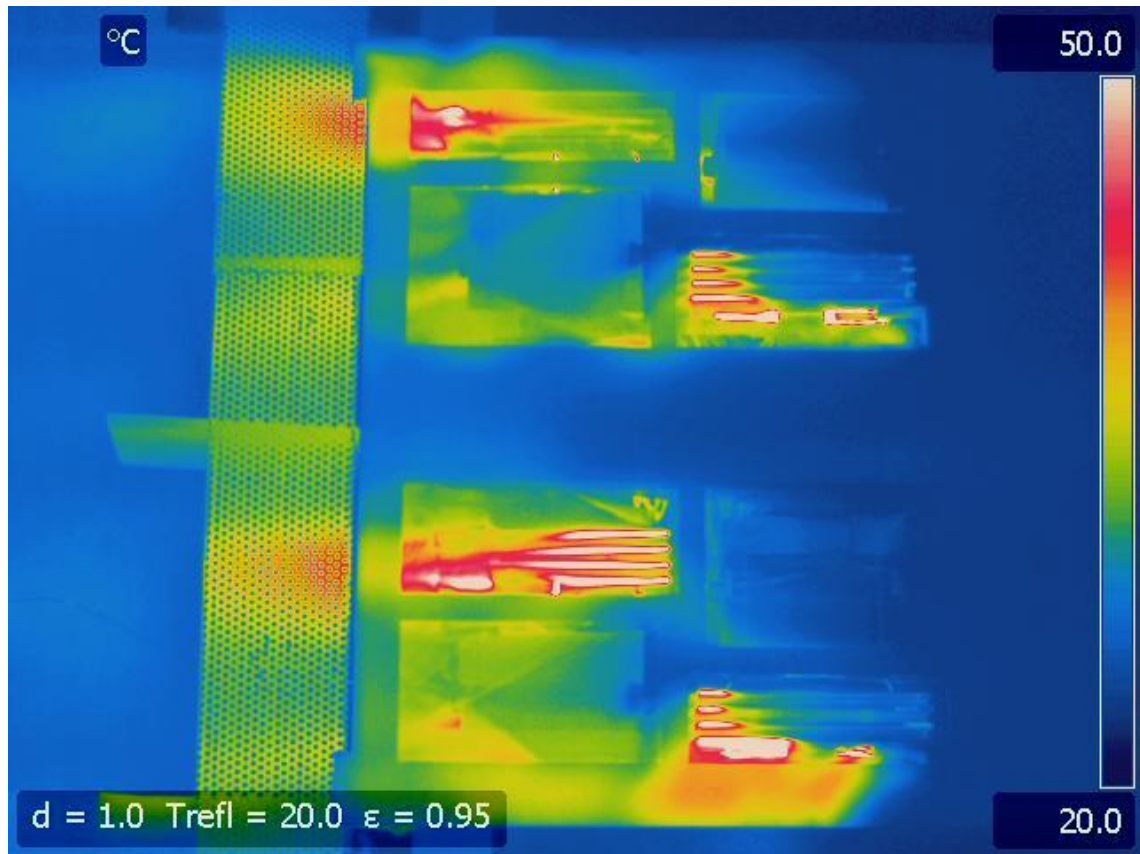
Kontrolní teplota z termočlánku: 41,5 °C



Obrázek 38 - bez optimalizace - výkon chlazení 100 %

Obrázek 39 ukazuje rozložení teplot při prvním stupni optimalizace při ventilátorech spuštěných na 50 % výkonu. Zde je zlepšení oproti Obrázek 37 dobře patrné.

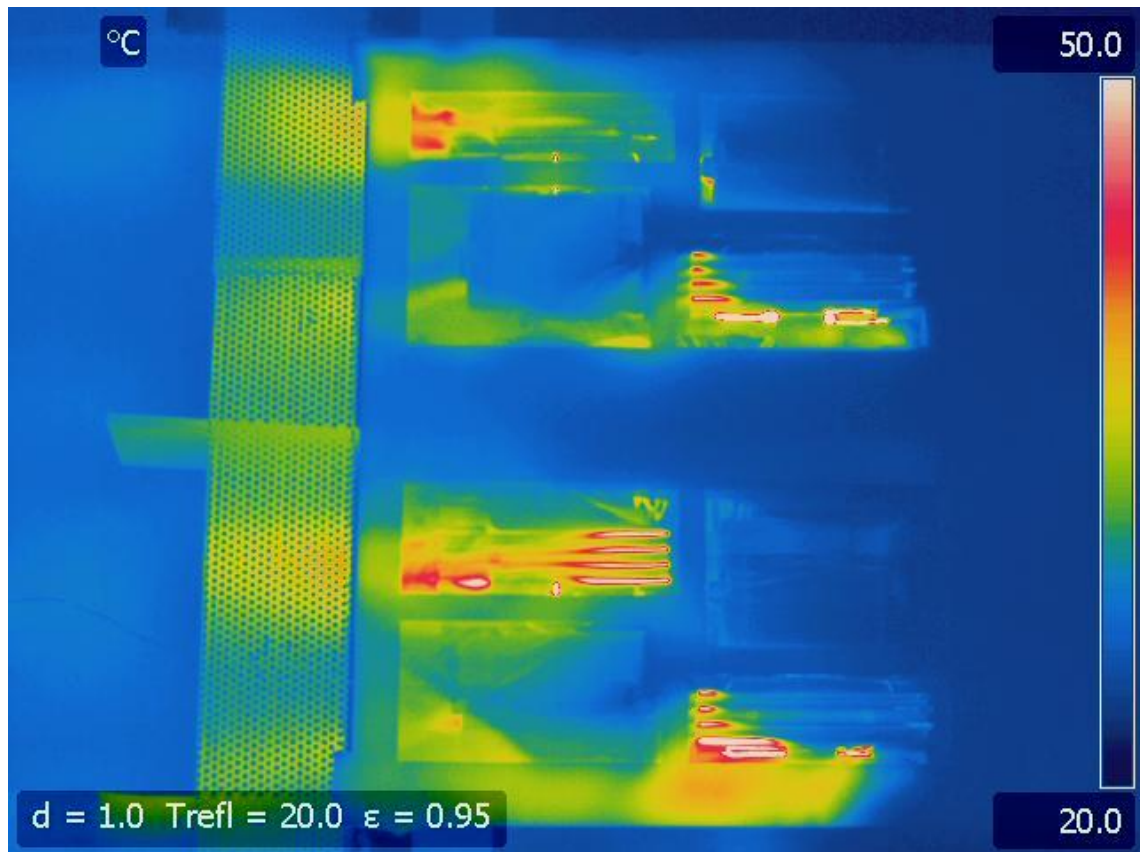
Kontrolní teplota z termočlánku: 36,9 °C



Obrázek 39 - první stupeň optimalizace - výkon chlazení 50 %

Obrázek 40 ukazuje situaci při první optimalizaci a výkonu chlazení na 100%. Situace je znatelně lepší než u sestavy bez optimalizace, ale zejména chladiče 2,3,6 a 8 vykazují stále vysoké teploty (kolem 50 °C).

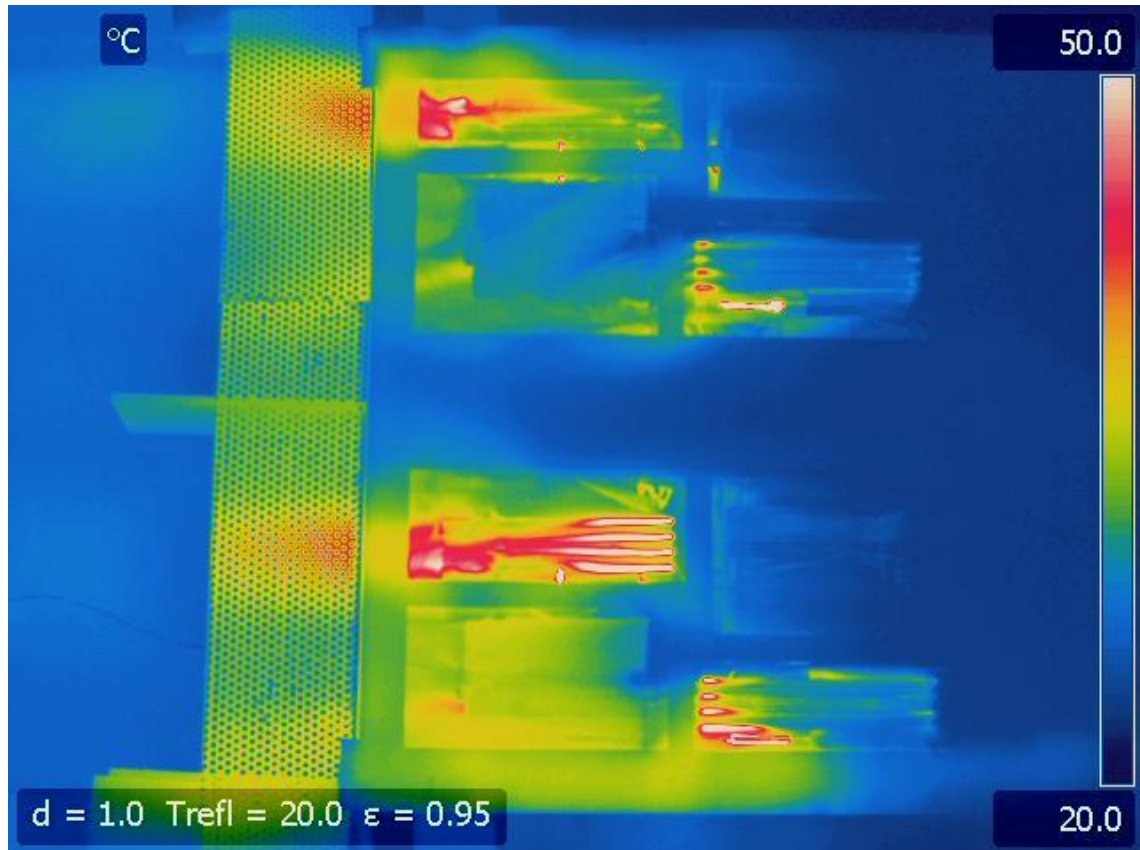
Kontrolní teplota z termočlánku: 33,7 °C



Obrázek 40 - první stupeň optimalizace - výkon chlazení 100%

Druhá optimalizace přinesla zlepšení za použití dvou tunelových ucpávek, každá v jedné polovině serveru. Jak je patrné z Obrázek 41, zlepšení nastalo u chladičů 3 a 7. Ostatní moduly nebyly při stejných podmínkách negativně ovlivněny.

Kontrolní teplota z termočlánku: 39,6 °C

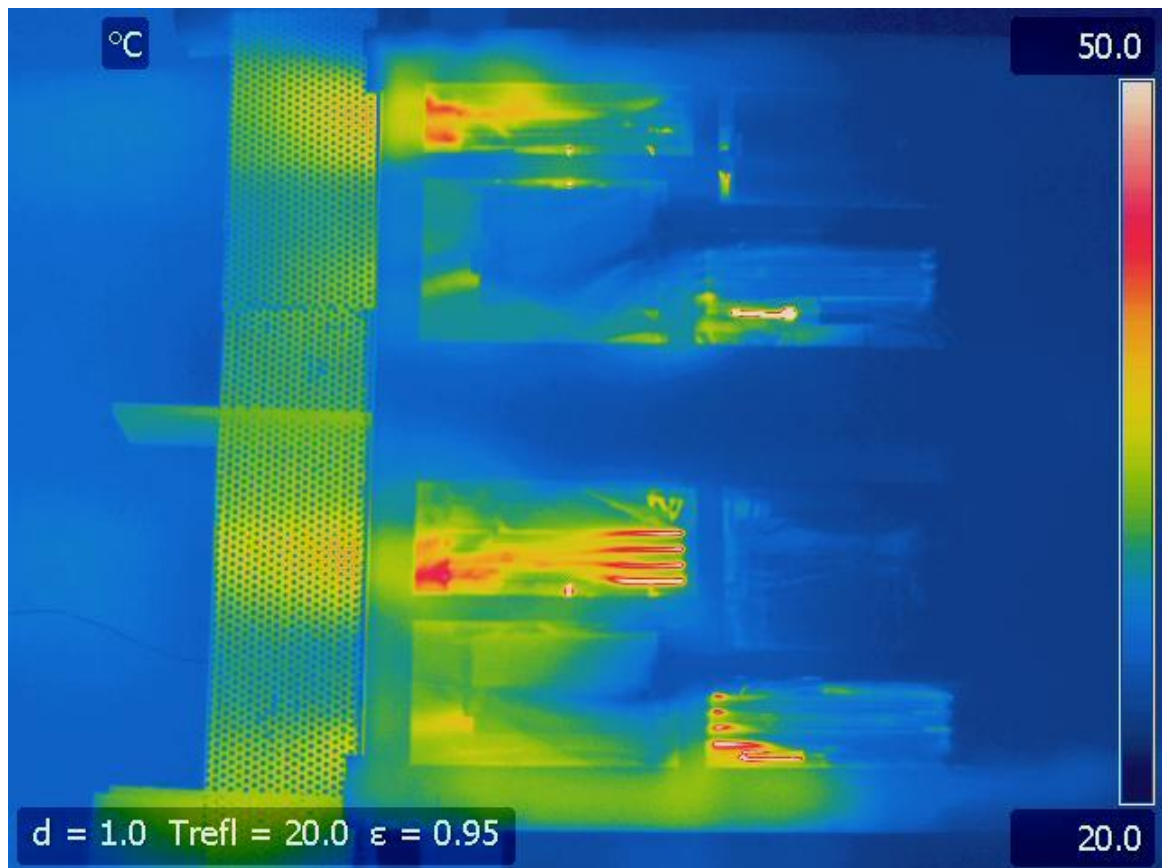


Obrázek 41 - druhý stupeň optimalizace - výkon chlazení 50%



Obrázek 42 ukazuje poslední fázi experimentu, kde se nám při výkonu ventilátorů na 100% podařilo zajistit, že na většině chladičů je teplota maximálně na 40°C, výjimečně vyšší. Žádný komponent není výrazně přetěžován vysokou teplotou. V teplotní mapě za serverem nejsou pozorovatelné žádné výkyvy do vysokých teplot proudících ze serveru. Toto řešení je pro nás přijatelné a optimalizace číslo dvě byla shledána vhodnou.

Kontrolní teplota z termočlánku: 35,6 °C



Obrázek 42 – druhý stupeň optimalizace - výkon chlazení 100%