

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**ZVYŠOVÁNÍ VÝKONU VÝMĚNÍKŮ
V PC TECHNICE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Petr Havránek

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Havránek** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **476083**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Zvyšování výkonu výměníků v PC technice

Název bakalářské práce anglicky:

Heat transfer increasment in PC heat exchangers

Pokyny pro vypracování:

Zvyšování výkonu v našich PC jde ruku v ruce také s vyšším odběrem ztrátového tepla. Velice moderní metodu chlazení jednotlivých částí je použití vodního okruhu s výměníky tepla. Zpracujte rešerši možností chlazení komponent, jejich cenové porovnání a navrhnete další možnosti zvýšení výkonu výměníků. Navrhnete vlastní výměník s pomocí metody 3D tisku.

Seznam doporučené literatury:

Podle doporučení vedoucího práce a vlastní rešerše.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Stanislav Solnař, ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2021**

Ing. Stanislav Solnař
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Jméno a Příjmení

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Stanislavu Solnaři za jeho trpělivost a cenné rady, díky kterým bylo možné tuto práci dotáhnout do úspěšného konce.

Anotační list

Jméno autora: Petr

Příjmení autora: Havránek

Název práce česky: Zvyšování výkonu výměníků v PC technice

Název práce anglicky: Heat transfer increasment in PC heat exchangers

Rozsah práce: počet stran: 44

počet obrázků: 27

počet tabulek: 5

počet příloh: 1

Akademický rok: 2020/2021

Jazyk práce: cz

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Solnař

Anotace česky: Bakalářská práce se zabývá tepelnými výměníky ve vodním okruhu používané pro chlazení PC techniky. V první části je tématem problematika metod sdílení tepla a jeho bilance. Následně je provedeno shrnutí a porovnání jednotlivých metod používaných pro chlazení osobních počítačů. V druhé části práce je navržen model tepelného výměníku, který je vyroben pomocí 3D tisku. Pro porovnání charakteristik vytištěného modelu s konvenčně vyráběným výměníkem je provedeno měření tlakových ztrát a tepelného výkonu. Naměřené hodnoty dvou výměníků jsou spolu porovnány.

Klíčová slova: tepelný výměník, vodní okruh, PC technika, 3D tisk

Anotace anglicky: Bachelors's thesis deals with heat exchangers in water cooling loops used in computer technologies. In the first section, the topic are manners of heat transfer and its balance. Afterwards, there is a summary and comparison of individual kinds of cooling systems used for personal computers. In the second part of the thesis a model of a heat exchanger is created and then printed using 3D printer. For the purpose of comparing properties of the printed heat exchanger and an ordinarily manufactured one, a measurment of heat power and pressure loses has taken place. The measured quantities for both heat exchangers were compared to each other.

Klíčová slova anglicky: heat exchanger, water cooling loop, PC technology, 3D print

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAKŮ	2
1. ÚVOD	3
2. SDÍLENÍ TEPLA.....	4
2.1. KONDUKCE	4
2.2. KONVEKCE	4
2.3. RADIACE.....	5
3. BILANCOVÁNÍ TEPLA	6
4. METODY CHLAZENÍ.....	6
4.1. HEATSINK.....	7
4.2. VENTILÁTOR	8
4.3. VODNÍ OKRUH	9
4.4. HEAT PIPES	10
4.5. ALTERNATIVNÍ METODY CHLAZENÍ	11
4.5.1. OLEJOVÉ AKVÁRIUM.....	11
4.5.2. KOMPRESOROVÉ CHLAZENÍ.....	13
4.5.3. PELTIERŮV ČLÁNEK.....	13
4.6. SHRNUTÍ METOD CHLAZENÍ	15
5. KONSTRUKCE VODNÍHO OKRUHU.....	16
5.1. VODNÍ BLOK.....	16
5.2. HADIČKY.....	18
5.3. FITINKY.....	19
5.4. EXPANZNÍ NÁBOBA	20
5.5. ČERPADLO.....	20
5.6. TEPELNÝ VÝMĚNÍK.....	22
6. PRAKTICKÁ ČÁST.....	24
6.1. POROVNÁVANÉ VÝMĚNÍKY	24
6.2. MĚŘENÍ.....	27
6.2.1. PRŮBĚH.....	28
6.2.2. NAMĚŘENÉ HODNOTY.....	30
6.2.3. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	33
7. ZÁVĚR	38
ZDROJE.....	40
SEZNAM OBRÁZKŮ	44

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAKŮ

\dot{q} – hustota tepelného toku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]

λ – součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

d – tloušťka stěny [m]

α – součinitel přestupu tepla [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]

T – termodynamická teplota [K]

ε – emisivita [-]

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)

ρ – hustota látky [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

c_p – měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

U – elektrické napětí [V]

α' – termoelektrický (Seebeckův) koeficient [$\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$]

P – tepelný výkon [W]

\dot{m} – hmotnostní tok [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]

A – plocha kontrolního průřezu [m^2]

v – rychlost proudění [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

1. ÚVOD

V dnešním světě se setkáváme s výpočetní technikou na každém kroku. Najdeme jí v mobilních telefonech, v dopravních prostředcích, ve výrobních strojích v továrnách a samozřejmě i v osobních počítačích. S vývojem těchto technologií ale rostou i nároky na jejich údržbu a jejich chlazení, protože významná část příkonu se přeměňuje na teplo.

Největší podíl na produkci odpadního tepla mají primárně procesory a grafické karty. S postupným vývojem mají tyto součásti stále větší výkon, což vede k většímu množství vyprodukovaného tepla. Obvody jsou převážně křemíkové, mají tedy i jistá omezení co se týče teploty. Při přílišném zahřátí se zhoršují polovodičové vlastnosti a může dojít ke zkrácení životnosti nebo k úplnému poškození komponenty, jejich chlazení je tedy nezbytné.

Pro tento účel je možné využít různé způsoby chladičů, ať už pasivních nebo aktivních. Za pasivní chladič můžeme považovat tepelný výměník, který může fungovat sám o sobě nebo zapojen například do vodního okruhu. Za aktivní chladičí součást můžeme považovat například ventilátor, který způsobuje odvod horkého vzduchu ze skříně a přívod chladnějšího vzduchu z okolí. Často je využíváno kombinací těchto způsobů, mluvíme pak o kombinovaném chlazení [1].

2. SDÍLENÍ TEPLA

Při procesu chlazení je využíváno přenosu tepla. Rozlišujeme celkem tři způsoby: kondukce neboli vedení, konvekce neboli proudění a radiace neboli záření. Při chlazení PC se setkáme především s kondukcí a konvekcí.

2.1. KONDUKCE

Při vedení tepla dochází předávání energie mezi molekulami v materiálu. Při zvyšování teploty se jejich kmitavý pohyb zrychluje, čímž se zvýší množství kinetické energie, které si mezi sebou předávají. Ke kondukcí dochází v případě, kdy jedna stěna tělesa má vyšší teplotu než stěna druhá. Při chlazení PC se vedení využívá například při přenosu tepla výměníkem.

Tento proces je popsán Fourierovým zákonem:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T$$
$$\text{grad } T = \frac{T_2 - T_1}{d}$$

Se součinitelem tepelné vodivosti λ se můžeme setkat ve dvou tvarech. Pokud předpokládáme, že ke kondukcí dochází v homogenním materiálu, součinitel λ je ve formě skaláru. Pro anizotropní materiály, jako například dřevo nebo vláknový kompozit, kdy je tepelná vodivost různá v jednotlivých směrech, je tento součinitel ve formě tenzoru. Jeho velikost se pro jednotlivá skupenství výrazně liší. Pro často využívané kovy v tepelných výměnících, tedy hliník a měď, se hodnota λ pohybuje v okolí $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pro porovnání, pro nerezovou ocel je součinitel tepelné vodivosti roven přibližně $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, pro uhlíkovou ocel $40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [2] [3].

2.2. KONVEKCE

Ke sdílení tepla prouděním dochází mezi pevným tělesem a okolní kapalinou nebo plynem. Tento způsob přenosu tepla dělíme na dva způsoby. K volné konvekci dochází, když je pevné těleso v kontaktu s tekutinou, ať už ustáleném stavu, nebo v pohybu. Při nucené konvekci daná tekutina proudí kolem jeho stěn. Při přenosu tepla z chladící kapaliny do výměníku,

stejně tak z výměníku do okolního vzduchu, je tekutina v pohybu, je tedy využíváno obou konvekčních jevů. Proces konvekce je popsán Newtonovo ochlazovacím zákonem:

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_s - T_o)$$

Součinitel přestupu tepla α není materiálová konstanta, závisí na charakteristikách proudění a na termofyzikálních vlastnostech materiálu stěny a okolní látky. Pro nucenou konvekci je tento součinitel v rozmezí $50 - 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pro kapaliny a $5 - 15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ pro plyny. Pro volnou konvekci je hodnota α je několikanásobně nižší, má tedy na přenosu tepla menší podíl, který ale není zanedbatelný [2] [3].

2.3. RADIACE

Přenos energie zářením probíhá prostřednictvím elektromagnetického vlnění, nikoliv kontaktem atomů a molekul. Každé zahřáté těleso vyzařuje svou plochou vlny o různých vlnových délkách. Radiace má největší efekt v rozmezí vlnové délky $10^{-7} - 10^{-4} \text{ m}$. Množství vyzařené energie je popsáno Stefan-Boltzmannovým zákonem:

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Emisivita ε je poměr záření povrchu daného tělesa a záření ideálně černého tělese, je tedy vždy menší než 1. Tato hodnota je závislá především na použitém materiálu a jeho povrchových úpravách.

Těleso může zářivý výkon samozřejmě i přijímat. Celkovou hustotu dopadajícího zářivého toku na povrch tělese můžeme označit E_I . Veličinu E_I je možné rozdělit na tři části. První část se odrazí od povrchu, veličinu označím E_R . Poměr E_R/E_I vyjadřuje poměrnou odrazivost R . Druhá část je tělesem pohlcena, označím E_A . Podíl E_A/E_I vyjadřuje poměrnou pohltivost, značeno A . Poslední zavedenou veličinou je E_D vyjadřující množství energie, které tělesem prošlo. Podíl E_D/E_I nazýváme poměrnou propustností [2] [3].

$$R = \frac{E_R}{E_I} \quad A = \frac{E_A}{E_I} \quad D = \frac{E_D}{E_I}$$

$$E_I = E_R + E_A + E_D \rightarrow R + A + D = 1$$

3. BILANCOVÁNÍ TEPLA

Při bilancování tepla pro naše využití můžeme předpokládat látku se zanedbatelnou teplotní roztažností, tedy pevný materiál nebo kapalinu. Pro bilanci vnitřní energie v látce využíváme Fourier-Kirchoffovu rovnici:

$$\rho c_p \left(\frac{\delta T}{\delta t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \lambda \nabla^2 T + 2\mu \bar{\Delta} : \bar{\Delta} + \dot{Q}^{(g)}$$

$\frac{\delta T}{\delta t}$ – akumulace tepla v kontrolním objemu, v případě stacionární úlohy je tento člen nulový

$\vec{u} \cdot \nabla T$ – konvektivní přívod tepla

$\lambda \nabla^2 T$ – konduktivní přívod tepla

$2\mu \bar{\Delta} : \bar{\Delta}$ – teplo vzniklé disipací mechanické energie vlivem tření v proudící látce

$\dot{Q}^{(g)}$ – výkon vnitřního objemového zdroje

Jedná se o parciální diferenciální rovnici druhého řádu, která slouží především k výpočtům teplotního pole, tedy určení teploty v závislosti na čase a na souřadnicích. Pro její řešení je potřebné k úloze určit příslušné počáteční a okrajové podmínky [2] [3].

4. METODY CHLAZENÍ

V současné době není využívána pouze jedna metoda chlazení. Neexistuje univerzální chladicí systém, který by bylo možné aplikovat pro všechna zařízení. Různé chladiče se liší svým principem, tepelným výkonem, konstrukcí, výrobními a provozními náklady a životností. I pro výpočetní techniku je několik využívaných druhů chlazení. Pro klasifikaci jednotlivých metod je nutné rozlišovat aktivní a pasivní chlazení. V případě pasivního chlazení není dodávána do systému dodatečná energie, spoléhá se pouze na samovolně probíhající termodynamické děje. Při aktivním chlazení je nutné do systému dodávat elektrickou energii.

4.1. HEATSINK

Chladič, označovaný jako „heatsink“, je tepelný výměník odvádějící teplo ze součásti do okolního prostředí, nejčastěji do vzduchu. Jedná se o pasivní chladič, u kterého je využíváno procesu volné konvekce, tedy přenosu tepla z ohřátého tělesa do okolního prostředí. Tento způsob chlazení není vhodný pro komponenty náročné na chlazení z důvodu nižšího tepelného výkonu. Mezi jeho výhody patří nízká pořizovací cena, velmi jednoduchá údržba a tichost celého procesu.

Důležitým faktorem ovlivňující tepelný výkon heatsinku je tzv. teplosměnná plocha, což je plocha výměníku, která je v kontaktu s okolním prostředím, může tedy svým povrchem sdílet teplo. Pro zvýšení výkonu je možné plochu zvětšovat, typicky pomocí tenkých hliníkových destiček odvádějících teplo z jádra výměníku. To ovšem vede ke zvětšování celé komponenty a zvyšování její hmotnosti, což je samozřejmě nežádoucí. Takovýto chladič bývá umístěn uvnitř počítačové skříně, musí se tedy dbát na omezený prostor, do kterého se dá usadit. Zároveň výměník bývá umístěn přímo na ochlazované součásti, běžně na procesoru, který je uložen na základové desce, která obě komponenty částečně nese. Ovšem základová deska není stavěna na větší hmotnostní zátěže, při jejím prohnutí by mohlo dojít k přerušení jemných obvodů a poškození celého dílu. Proto se v případě vyšších požadavků na chlazení ustupuje od zvětšování heatsinku a volí se jiné metody [4] [5] [6] [7].



Obrázek 1, Heatsink FX70

4.2. VENTILÁTOR

Chlazení pomocí ventilátoru považujeme za čistě aktivní metodu chlazení. V dnešní době už není obvyklé se setkat se samotným ventilátorem. Běžně bývá v kombinaci s tepelným výměníkem usazeným na ochlazované součásti. V takovém případě mluvíme o kombinovaném chladiči.

Ventilátor má dvojí funkci. Vlivem proudícího vzduchu je vyvoláván proces nucené konvekce, která navyšuje tepelný výkon celého chladičského systému. Ventilátor zároveň odvádí ohřátý vzduch mimo PC skříň a přivádí studený vzduch z okolí, čímž napomáhá chlazení ne jedné komponenty, ale celého počítače.

Nevýhoda chlazení ventilátorem je vysoká hlučnost při vyšších teplotách součástí a nutná pravidelná údržba. Nasávaný chladný vzduch větrákem z prostoru mimo skříň s sebou přináší i prach, který se může usazovat na větráku i uvnitř PC. Problémová může být obzvláště vrstva prachu na radiátoru v případě kombinovaného chlazení. Tento nános funguje jako tepelná



Obrázek 3, Ventilátor Delta Tri Blade



Obrázek 2, Kombinovaný chladič NOCTUA NH-D15

izolace a zabraňuje přenosu tepla konvekcí. Zároveň tato metoda přináší jistá omezení, co se týče umístění počítače. Pokud je v blízkém okolí jiný zdroj tepla, jako například jiná elektronika nebo topení, tak nasávaný vzduch z okolí přichází ke komponentám už ohřátý, což způsobuje snížení tepelného výkonu chlazení [4] [5] [6] [7].

4.3. VODNÍ OKRUH

Vodní chlazení je čím dál tím víc populární způsob chlazení. Jeho tepelný výkon může být několikanásobně vyšší než předchozí metody, takže je hojně využíváno na chlazení náročnějších a výkonnějších komponent.

Při této metodě jsou na chlazených částech umístěny tzv. vodní bloky, kterými je teplo odváděno z dané součásti a sdíleno s chladící kapalinou, která následně proudí soustavou hadiček do tepelného výměníku. Tento výměník má stejnou funkci jako v předchozích případech. Pokud je umístěn uvnitř počítačové skříně, má u sebe ventilátory, které vytváří proud vzduchu okolo jeho stěn, je tedy vyvolávána nucená konvekce, a odvádí ohřátý vzduch mimo PC. Druhé, méně obvyklé, použití vodního chlazení je s tepelným výměníkem umístěným vně počítačové skříně. V takovém případě není ventilátor nutný. Teplo sdílené se vzduchem je tímto způsobem odvedeno mimo počítač, proud vzduchu by tedy měl za následek pouze proces nucené konvekce, která navyšuje chladící výkon. V takovém případě záleží na množství odpadního tepla produkovaného danou komponentou nebo na preferenci samotného uživatele.

Proudění chladící kapaliny je zajišťováno malým čerpadlem. To může být umístěno buď na vodním bloku nebo v případě většího chladícího systému v expanzní nádobě.

Nejčastěji se můžeme setkat s vodním okruhem k ochlazení procesoru, vzhledem k jednoduchému zavedení vodního bloku, ale s postupem času se dostává do oblíbenosti i vodní chlazení grafické karty, respektive jejího čipu. V případě velkého množství odpadního tepla produkujícího grafickou kartou i procesorem je používán jeden větší okruh pro obě komponenty najednou.

Nespornou výhodou této metody chlazení je tichý provoz a nenáročná údržba. Jediná součást vykonávající mechanickou práci, tedy jediná část, která může vytvářet hluk, je čerpadlo, ale vzhledem k jeho velikosti a malému hmotnostnímu toku kapaliny je hlučnost minimální. V neposlední řadě je vodní chlazení oblíbené kvůli jeho cenové dostupnosti [4] [5] [6] [7] [8].

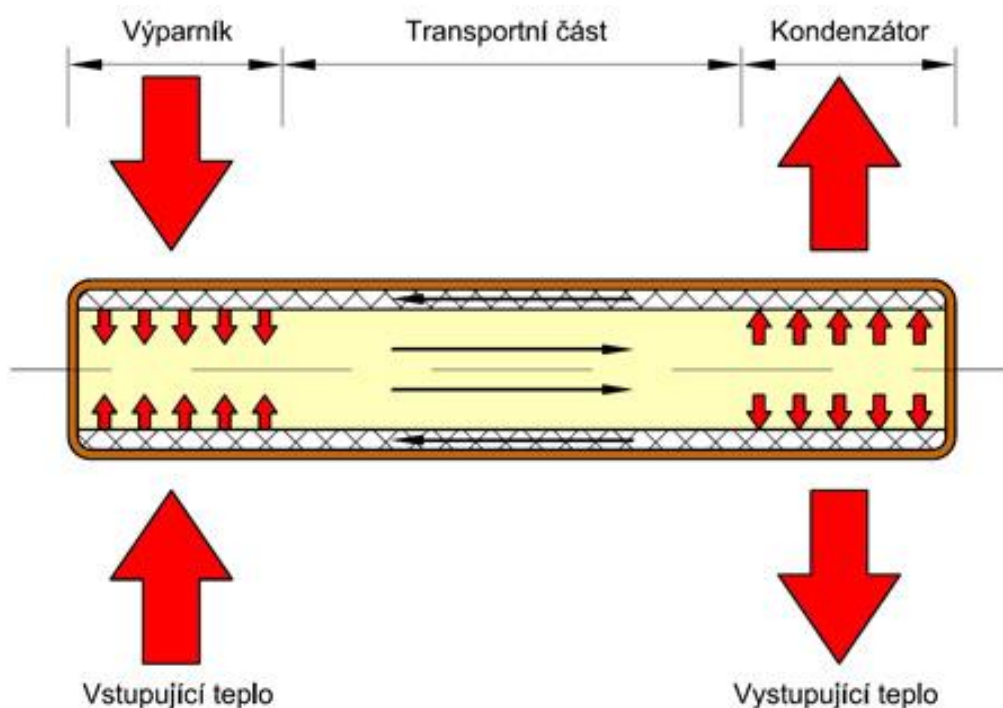


Obrázek 4, Vodní chlazení ASUS ROG STRIX LC 360 RGB

4.4. HEAT PIPES

Technologie tepelných trubek není sama o sobě způsobem chlazení. Můžeme jí považovat za část dříve zmiňovaných pasivních chladičů. Samotná konstrukce není v principu složitá. „Heat pipes“ jsou uzavřené měděné duté trubičky nebo kanálky s malým množstvím kapaliny, většinou destilované vody, uvnitř. Jeden konec je umístěn v blízkosti zdroje tepla, tedy u zahřáté součásti nebo v jádru radiátoru, a druhý konec je ochlazován, umístěn například v žebrování výměníku, kde je teplo sdíleno s okolním prostředím. Při zahřátí jednoho konce se kapalina v kanálku vlivem zvýšené teploty začne odpařovat. Díky změně tlaků se výpary přesunou na ochlazovaný konec, kde je teplo odebíráno do stěn a do okolí a začnou kondenzovat. Při atmosférickém tlaku by k odpařování vody docházelo až nad teplotou 100°C, takovýchto teplot ale naše ochlazované komponenty nedosahují, při velké zátěži dosahuje teplot maximálně okolo 90°C. Proto je při výrobě tepelné trubice vytvořen podtlak, při nižším tlaku teplota bodu varu vody klesá, je tedy možné vypařování i při provozních teplotách procesorů nebo grafických karet.

Teoreticky by mohl nastat problém v případě, kdy by horký konec byl umístěn výše než konec chladný. V opačném případě by zkondenzovaná kapalina stekla vlivem gravitační síly zpět ke zdroji tepla, což ale není možné pro zmiňované uspořádání. Z tohoto důvodu jsou vnitřní stěny trubiček pórovité, díky kapilárním dějům tedy může kapalina stoupat i proti gravitaci. Můžeme narazit na konstrukční prvek velice obdobný a principiálně stejný jako tepelné trubice, kterému říkáme termosifon. Termosifonové trubičky plní stejnou funkci, jako „heat pipes“, ovšem své vnitřní stěny má hladké, nemůže tedy docházet ke kapilární dějům a je možné tuto konstrukci použít v případě níže položeného zdroje tepla [4] [5] [9].



Obrázek 5, Schéma funkce tepelných trubic

4.5. ALTERNATIVNÍ METODY CHLAZENÍ

4.5.1. OLEJOVÉ AKVÁRIUM

Jedním z nezvyklých způsobů chlazení je ponoření celého počítače do chladící kapaliny. Na rozdíl od vodního okruhu není možné použít vodu, kvůli její elektrické vodivosti. I použití destilované vody, která není sama o sobě vodivá, by bylo nevhodné. Z některých komponent se při vyšších teplotách a přítomnosti kapaliny uvolňují minerály, které postupně zvyšují zmiňovanou elektrickou vodivost. Proto se pro tento účel využívá olej.

Konstrukčně je tato metoda jednodušší než chlazení vodním okruhem, ale stále má svá úskalí. Teplo, které produkují jednotlivé komponenty v PC je odváděno do kapaliny jejich celým povrchem. Na rozdíl od ostatních metod chlazení je výhodou, že teplo je odváděno ze všech součástí najednou. Je ovšem problém s ochlazováním olejové kapaliny. Část tepla je odváděna stěnami akvária, ale tímto způsobem není možné dosáhnout dostatečně vysokého tepelného výkonu. K akváriu bývá tedy připojen tepelný výměník s čerpadlem, svým způsobem tato metoda funguje obdobně jako vodní okruh.

Nespornou nevýhodou olejového akvária je náročná manipulace se zařízením. Údržba samotného chladícího systému je jednoduchá. Jediná součást vyžadující péči může být čerpadlo a výměník, který je umístěný mimo PC skříň. Problémová může být údržba nebo výměna komponentů v počítači. Při takové situaci se musí celý obsah skříně vypustit nebo odčerpat, až poté je manipulace se počítačem možná, následně je potřeba skříň opět napustit. Obdobný proces by byl nutný například i při přepravě zařízení. Další nešvar přináší hadičky, které jsou připojeny k výměníku, v olejovém prostředí tvrdnou a křehnou, je tedy možné porušení jejich integrity a nedokonalé čerpání kapaliny.

Tento způsob chlazení je velmi efektivní, ale pro běžného uživatele je často považován za zbytečný. Jeho složitě zavedení a náročnost případných úprav a oprav zařízení z něj činí luxus, kteří si pořídí spíše vášniví uživatelé PC [4] [5] [10] [11].



Obrázek 6, Olejové akvárium

4.5.2. KOMPRESOROVÉ CHLAZZENÍ

Kompresorové chlazení je konstrukčně obdobné, jako chlazení vodním okruhem. Chladící médium koluje v uzavřeném oběhu poháněné čerpadlem. Ovšem u této metody je dané médium před dosažením ochlazované součásti stlačeno kompresorem a teplo vytvořené při stlačení je odvedeno. V blízkosti komponenty je tlak prudce snížen, což způsobí vlivem expanze tekutiny i prudké ochlazení. Tento způsob je velmi efektivní a je možné dosáhnout teplot až $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale přináší s sebou několik nevýhod.

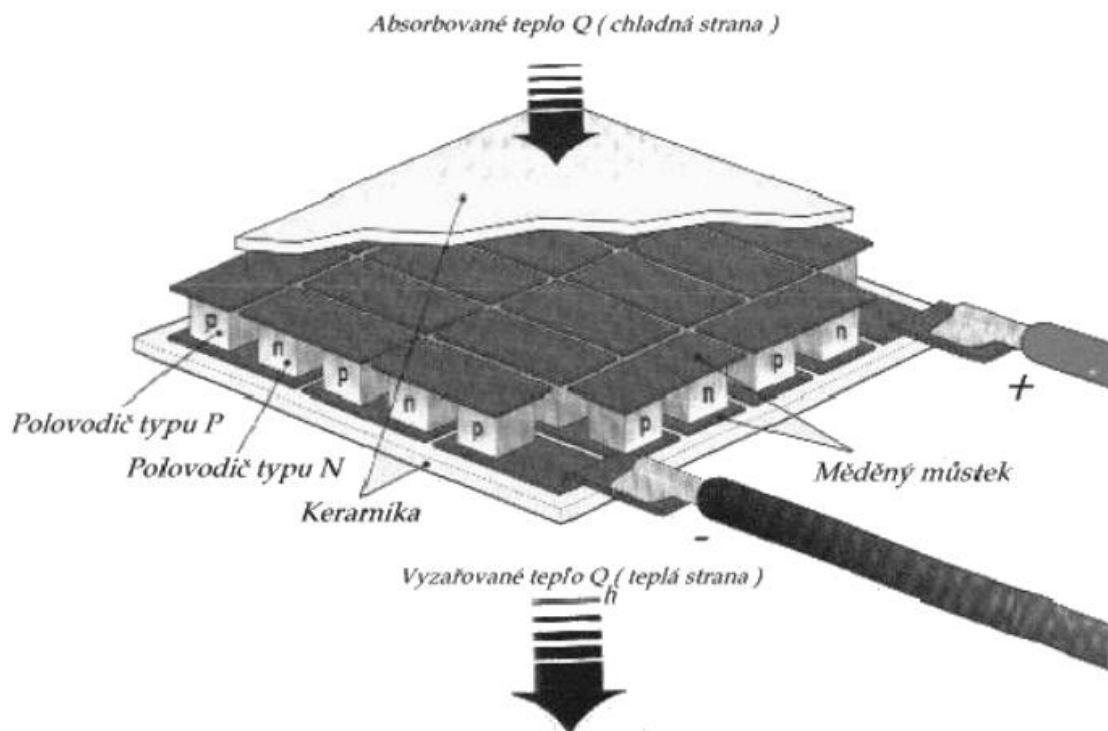
Uvedení chladícího systému do běhu není okamžité jako u předchozích metod. Je nutné předběžné stlačení chladícího média a předchlazení komponenty, zapínání PC s kompresorovým chlazením není tedy otázka sekund, ale minut. Další nevýhodou je produkovaný hluk, především z kompresoru, který je i přes zvukovou izolaci značný a nežádoucí. Oproti ostatním metodám je i vyšší energetická spotřeba, která se může pohybovat až ve stovkách wattů. Poslední významná obtíž, na kterou můžeme narazit, je případná kondenzace vody na ochlazovaných částech PC. Voda by se v chladícím okruhu vyskytovat neměla, ale v případě nedokonalého odizolování se může malé množství vody v plynné fázi z okolí do systému dostat. V takovém případě kondenzují kapky vody na součástech, kde při provozu zařízení způsobují zkrat [4] [5] [13] [14].

4.5.3. PELTIERŮV ČLÁNEK

Peltierův neboli termoelektrický článek využívá termoelektrického jevu, který můžeme popsat dvěma způsoby. První interpretaci zformuloval Thomas Johann Seebeck, po kterém byl tento jev pojmenován. Bylo zjištěno, že mezi dvěma kovovými materiály, mezi kterými existuje nenulový teplotní gradient, mají tedy rozdílné teploty, je vytvářeno elektrické napětí. Vztah je popsán vzorcem:

$$U = \alpha' \cdot \Delta T$$

Druhá formulace tohoto děje je inverzní k Seebeckovu zákonu. Při přivedení elektrického napětí do dvou různých kovových materiálů můžeme pozorovat vytvoření tepelného gradientu, mezi těmito tělesy. V případě Peltierova článku se jedná o dvě kovové destičky. Do jedné je přiváděn elektrický proud, který je vodivým spojením odváděn do destičky druhé, čímž dochází ke zmiňovanému jevu a k odvádění tepla. Při konstrukci je nutné dát si pozor, která z destiček je ochlazovaná a ohřívána. Ochlazovaný materiál musí být tedy umístěn blíže u zdroje tepla. V opačném případě by se zahřáté komponentě dodávalo další teplo z okolí, což je samozřejmě nežádoucí.



Obrázek 7, Schéma Peltierova článku

Nevýhodou je vysoká spotřeba, která může být až o 50 % vyšší než spotřeba samotné chlazené komponenty. Dále je nutná izolace celého aparátu. V případě přítomnosti vodní páry dochází ke kondenzaci vody na ochlazované destičce, což způsobuje nežádoucí zkrat. Mezi nesporné výhody patří například možnost ochlazení součásti na nižší teplotu, než je teplota okolí nebo nulová hlučnost provozu, vzhledem k absenci mechanických součástí [4] [5] [15] [20].

4.6. SHRNUÍ METOD CHLAZENÍ

Žádnou z chladících metod nemůžeme považovat za ideální, každá má své výhody a nevýhody. U chlazení osobních počítačů můžeme jednotlivé systémy porovnávat po mnoha stránkách. V rámci tohoto srovnání budeme hodnotit tepelný výkon, pořizovací a provozní náklady, náročnost údržby a hlasitost procesu. Každou z těchto vlastností ohodnotíme počtem hvězd, při čemž jedna hvězda vyjadřuje nejhorší ohodnocení a pět hvězd nejlepší. Porovnááme chlazení pomocí heatsinku, kombinovaný chladič, vodní okruh, olejové akvárium a kompresorové chlazení.

	Tepelný výkon	Náklady	Údržba	Hlasitost
Heatsink	**	*****	****	*****
Kombinovaný chladič	***	****	****	***
Vodní okruh	****	***	*****	*****
Olejové akvárium	*****	*	**	****
Kompresorové chlazení	*****	*	**	*

Tabulka 1, Srovnání chladících systémů

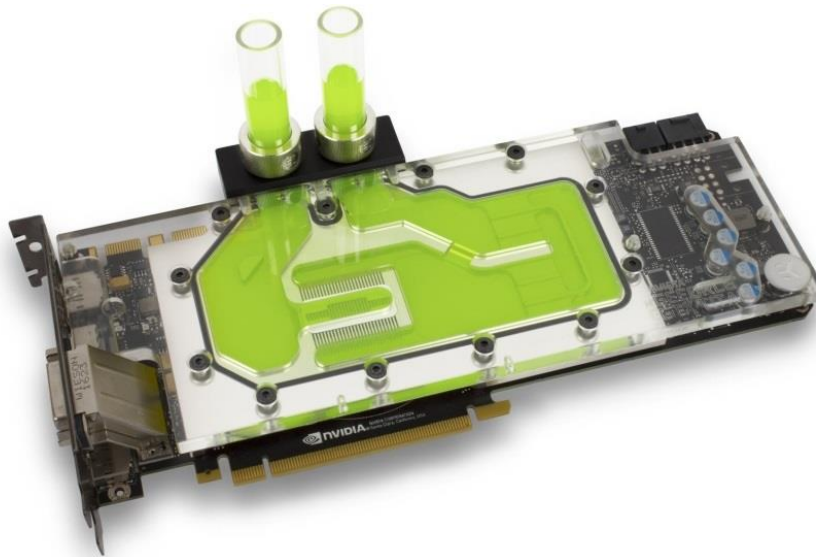
Podle tohoto shrnutí můžeme vyhodnotit kombinovaný chladič a vodní okruh jako nejatraktivnější volby. To odpovídá i četnosti těchto chladících systémů. Heatsink pro počítačovou techniku neposkytuje dostatečně vysoký tepelný výkon. Olejové akvárium a kompresorové chlazení mají naopak vysoký výkon, ale náročná údržba a vysoké náklady běžného uživatele od těchto metod odrazují.

5. KONSTRUKCE VODNÍHO OKRUHU

Metoda pasivního chlazení tepelným výměníkem umístěným na chlazené součásti, případně kombinované chlazení s přidaným ventilátorem, se pro množství uživatelů PC postupně stává méně oblíbenou volbou a v porovnání s ostatními metodami dosahuje nižších tepelných výkonů než jeho konkurenti. Efektivnější způsoby, jako například chlazení kompresorové nebo pomocí olejového akvária, jsou finančně nákladné a náročné na provoz a údržbu. Sympatickou střední cestou se jeví vodní okruh, který je jednoduchý na údržbu, pro běžné kancelářské a volnočasové využití PC dostačující a finančně dostupné chlazení.

5.1. VODNÍ BLOK

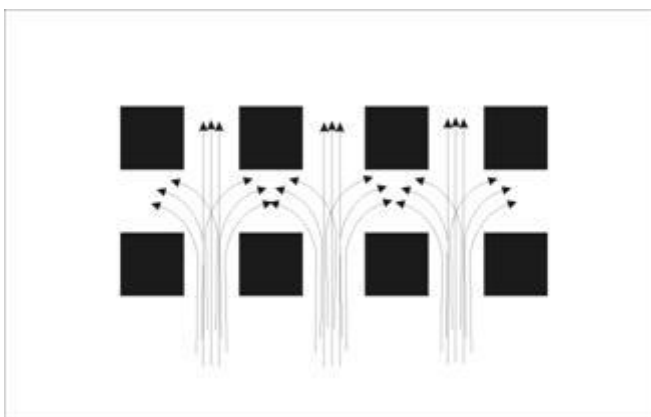
Úkolem vodního bloku je přenos tepla z komponenty do chladící kapaliny. Nejčastějším materiálem pro výrobu je díky své dobré tepelné vodivosti měď, která se používá i při konstrukci tepelných výměníků. Teoreticky by mohl být alternativou hliník, který má sice horší tepelnou vodivost, ale je lehčí. Ovšem vodní bloky jsou malé a rozdíl hmotnosti při použití hliníku by byl zanedbatelný. Druhou teoretickou náhradou by mohlo být stříbro, které má oproti mědi vyšší tepelnou vodivost, ale kvůli jeho vysoké ceně se s ním často nesetkáme.



Obrázek 8, Vodní blok na grafické kartě

Při konstrukci se posuzují primárně dva atributy. První je tepelný výkon, který udává množství předaného tepla z komponenty do chladicí kapaliny. To je možné ovlivnit velikostí teplosměnné plochy, kterou můžeme zvětšovat různými útvary na povrchu bloku. Druhou charakteristiku, kterou pozorujeme, je odpor prostředí, který udává rozdíl tlaku kapaliny před blokem a za ním. Nulových tlakových ztrát se dá teoreticky dosáhnout v případě, kdy by povrch teplosměnné plochy vodního bloku byl dokonale rovný. Bohužel, snižování těchto ztrát vede i ke snížení tepelného výkonu, stejně tak zvýšení tepelného výkonu zvětšením teplosměnné plochy zvyšuje i odpor prostředí, ani jeden z případů není ideální. Při konstrukci vodního bloku se tedy hledá kompromis mezi těmito dvěma charakteristikami.

Základním užívaným tvarovým prvkem jsou kanálky na styčné ploše, které mohou připomínat žebrování na tepelném výměníku. Takováto konstrukce nabízí znatelné navýšení přenosu tepla za poměrně nízké náklady na výrobu. Dále se můžeme setkat s hranoly vystupujícími z povrchu. Takové řešení má teoreticky dvojnásobnou plochu oproti kanálkům, ale přináší i vyšší tlakové ztráty a nekonzistentní rychlost proudění v jednotlivých mezerách. V krajních případech může být rychlost chladicí kapaliny nulová, v takovém případě dochází k minimálnímu přestupu tepla. Tento problém se dá do jisté míry eliminovat náhradou hranolů za kosočtverce se stěnami vhodně natočenými vůči směru proudění. Teplosměnná plocha zůstává stejná, ovšem odpor prostředí klesá. Dalším použitelným tvarem těchto výstupků může být cylindr. Absence hran způsobuje plynulé průběhy rychlostí proudění a menší ztrátu tlaku ve vodním bloku. Oproti ostatním tvarům je náročnější a dražší výroba.



Obrázek 10, Schéma proudění kapaliny okolo hranolů



Obrázek 9, Vodní blok s cylindrickými výstupky

Přestup tepla závisí na rychlosti proudění chladící tekutiny, je tedy žádoucí jí navýšit. K tomu se využívají trysky, které vytváří prudké zmenšení průřezu trubiček. To samozřejmě způsobí velké změny tlaku, což je nežádoucí, ovšem vyšší rychlost umožňující přenos většího množství tepla je znatelná a mnoho výrobců trysek využívají [4] [19] [23] [26] [21].

5.2. HADIČKY

Hadice slouží k přenosu chladící kapaliny po celém okruhu. První z vlastností, podle kterých je můžeme rozdělit je flexibilita. Ta nemá velký vliv na přenos tepla, ale spíše na montáž chladícího systému do PC. Při použití tvrdých trubic není možné jednoduché ohýbání a přizpůsobení jejich tvaru prostoru uvnitř skříně, je nutné využít kloubů a zahnutých spojovacích částí. V případě měkkých hadic je montáž daleko jednodušší, tato možnost je tedy obecně oblíbenější u většiny uživatelů.

Volba správného materiálu je nutná. U hadice je na rozdíl od vodního bloku a radiátoru tepelná vodivost nežádoucí. V případě, kdy by teplo z chladící kapaliny bylo sdíleno se stěnami hadic a dále do okolí, zvyšovala by se teplota uvnitř skříně. Pro ohebné hadičky je klasickou volbou PVC, což je levný, průhledný materiál, který má ovšem při dlouhodobém používání tendenci tvrdnout, hrozí tedy zlomení a únik kapaliny, je tedy nutná pravidelná kontrola a výměna. Druhou možností je silikon, u kterého se fenoménem tvrdnutí nemusíme zabývat. Ovšem jeho pórovitá struktura způsobuje odpařování kapaliny, je tedy nutné kontrolovat její množství v okruhu, případně jí doplňovat. Méně obvyklým materiálem je Tygon, se kterým se můžeme často setkávat například ve zdravotnictví. Takovéto trubičky jsou méně náchylné na tvrdnutí a následný lom. Jde o kvalitnější variantu, což se odráží i na vyšší ceně oproti předchozím materiálům [4] [23] [26] [24].



Obrázek 11, Hadičky do vodního okruhu

5.3. FITINKY

Fitinky slouží k propojení hadic s dalšími částmi vodního okruhu. Na jednom konci je vybavena závitem a těsnícím kroužek a na druhém konci je uchycení k hadici. Právě takovéto spoje bývají často poruchové, je tedy nutné vybrat vhodnou fitinku pro správný chod chlazení.

Nejběžnější je použití trnu a svorky. Trn má z jedné strany vnější závit pro zašroubování do komponenty, na druhém konci je válec s vruby, které mají větší průměr, než je vnitřní průměr hadice, při jejím nasazení se tedy trubička roztáhne a pro utěsnění se stáhne svorkou. Nejčastějšími poruchami může být narušení integrity hadice při její deformaci nebo nedostatečné utažení svorky.



Obrázek 12, Fitinka trn se svorkou

Časté jsou také nástrčné spojky, které jsou oblíbené díky jejich jednoduché instalaci a případnému rozpojování. Hadice je upevněna svěrným kroužek z vnější strany, která je tímto zdeformována a tím utěsněna. Dále se setkáváme s fitinkami s převlečnou maticí, u které je hadice nasazena na trn a následně zajištěna maticí pro utěsnění, obdobně jako u fitinky se svorkou. U obou těchto druhů hrozí porušení hadičky kvůli její deformaci, obzvláště při jejím tvrdnutí v důsledků dlouhodobého používání, je tedy nutná pravidelná kontrola [4] [26] [24].

5.4. EXPANZNÍ NÁBOBA

Expanzní nádoba je průhledná plastová nádržka sloužící především k údržbě vodního okruhu. Umožňuje sledovat množství kapaliny, případně jejím prostřednictvím je možné jednoduše kapalinu doplnit bez potřeby okruh odstavovat z provozu a rozmontovávat. Dále zajišťuje vyrovnaní tlaku v případě vytvoření přetlaku nebo podtlaku jinde v okruhu. Zároveň umožňuje odplynění kapaliny, když se do oběhu dostane vzduch, nebo se vlivem vysokých teplot kapalina začne vypařovat a začne tvořit bublinky.

Konstrukčně jde o velmi jednoduchý prvek. Objem nádoby se pohybuje řádově ve stovkách mililitrů v závislosti na velikosti zařízení a samotného vodního okruhu. Nádobka je vybavena dvěma otvory se závitem pro přívod a odvod vody a třetím otvorem bez závitu pro zmiňovanou regulaci množství kapaliny [4] [19] [23] [26].



Obrázek 13, Expanzní nádoba

5.5. ČERPADLO

Čerpadlo uvádí kapalinu ve vodním okruhu do pohybu. Bez vodní pumpy by se nedílelo dostatečné množství tepla z ochlazované komponenty do kapaliny a ohřátá kapalina by nebyla odváděna do tepelného výměníku k opětovnému zchlazení. Jako jediná část okruhu vykonává mechanickou práci, je tedy jediným zdrojem hluku. Pohyblivé součásti, primárně ložiska, jsou také důvodem omezené životnosti při pravidelném používání.

U čerpadel pozorujeme dva parametry, průtok a výtlak. Průtok určuje objem kapaliny, který dokáže přepravit za daný čas. Obvykle se udává v litrech za hodinu. Vodní okruh samozřejmě není ideální prostředí, celý systém vytváří tlakové ztráty. S tímto ovšem výrobci vodních okruhů počítají a čerpadla v chladicím systému dokážou tyto ztráty vyrovnávat. Výtlak vodní pumpy určuje výšku vodního sloupce, který dokáže čerpadlo vytvořit ve svislé trubici. Čím vyšší tento parametr je, tím lépe dokáže čerpadlo vyrovnávat ztrátu tlaku v okruhu.



Obrázek 14, Průtokové čerpadlo



Obrázek 15, Ponorné čerpadlo

Vodní pumpy se dělí na dva druhy. Průtokové čerpadlo je samostatně stojící část připojena do okruhu hadičkami, kterými je kapalina přiváděna do čerpadla a vedena dál. Ponorné čerpadlo je ponořeno do chladicí kapaliny, často v expanzní nádobě. Oproti průtokovému čerpadlu je provoz tišší, kapalina funguje jako zvuková izolace, pro uživatele je v tomto ohledu sympatičtější. Na druhou stranu je náročnější montáž, čerpadlo ponořené v kapalině je omezeno prostorem expanzní nádoby.

Rychlost proudící kapaliny je klíčovým faktorem pro přenos tepla. V případě, kdy by chladicí kapalina proudila příliš pomalu, mohlo by dojít vlivem pomalého odvádění zahřáté kapaliny k přiblížení její teploty na teplotu blízkou teplotě komponenty, v krajním případě na stejnou teplotu, docházelo by tedy k minimálnímu přenosu tepla a snížení efektivity celého procesu. V opačném případě se nejedná o výrazný problém. Vysoká rychlost napomáhá procesu nucené konvekce a tepelný výkon se teoreticky navyšuje. Ovšem toto vyžaduje vyšší výkon čerpadla, tedy i vyšší spotřebu, je tedy otázkou, do jaké míry je urychlování kapaliny výhodné [4] [19] [23] [26].

5.6. TEPELNÝ VÝMĚNÍK

Tepelný výměník má ve vodním okruhu jediný úkol, odvádět teplo z chladicí kapaliny a sdílet jí s okolním prostředím. Z konstrukčního hlediska se obvykle jedná jádro kopírující kanálky vedoucí chladicí kapalinu, na které navazuje žebrování navyšující teplosměnnou plochu.

Jádro tepelného výměníku je běžně vyráběno z mědi. Pro maximální tepelný výkon je potřebná vysoká tepelná vodivost jádra. Teoreticky by bylo vhodné pro tento účel i stříbro, které má tento parametr vyšší než měď, ale cena takové komponenty by byla extrémní. Pro výrobu žebér se používá hliník. Jeho tepelná vodivost je v porovnání s mědí nižší, ale je jednodušší na manipulaci při výrobě, levnější, a také je lehčí. Hustota hliníku je méně než třetinová oproti mědi, u komponenty takovéto velikosti by tedy byl rozdíl hmotnosti výrazný. Použití mědi na celý výměník by sice vedlo k lepším teplovodivým vlastnostem, ovšem v žebrech už není nutný tak rychlý přenos tepla, v rámci úspor hmotnosti a financí se od toho tedy upouští.

Konstrukční zásady výměníku jsou obdobné jako například u heatsinku. Pro co největší přenos tepla je žádoucí co nejvyšší teplosměnná plocha. To platí pro sdílení tepla výměníku s kapalinou i s okolním prostředím. Pokud je proud chladicí kapaliny veden jedním kanálkem, mluvíme o sériovém potrubí, takový kanálek má tzv. hadovitý tvar. Při rozdělení kapaliny do několika kanálků, které se před příchodem chladicí kapaliny do výměníku rozdělují a při odchodu z výměníku zase schází mluvíme o paralelním potrubí. Tento způsob poskytuje vyšší tepelný výkon a nižší tlakové ztráty.



Obrázek 16, Teplený výměník Airplex PRO 360

Pro co největší teplosměnnou plochu s okolím bychom teoreticky mohli žebra na radiátoru prodlužovat, nebo jednoduše přidávat více žeber, ale prakticky tomu tak není. Pro vedení tepla pevným materiálem je důležitým faktorem plocha průřezu, aby tedy mohlo být teplo vedeno a dále sdíleno s okolím, není možné tloušťku žeber snižovat do nekonečna.

V takovém případě by se teplo dostalo pouze na místa blízka jádru a zbytek materiálu by byl v podstatě zbytečný. Další možností pro zefektivnění celého procesu by bylo tvarování žeber, ovšem pro takové řešení by byla náročnější a komplikovanější výroba. Často využívaným přídatkem k radiátoru je ventilátor. Princip je v takovém případě stejný jako u kombinovaného chladiče. Proud vzduchu podporuje proces nucené konvekce tepla ze stěn žeber do okolí a odvádí teplo ven z PC skříně [4] [19] [23] [26].

6. PRAKTICKÁ ČÁST

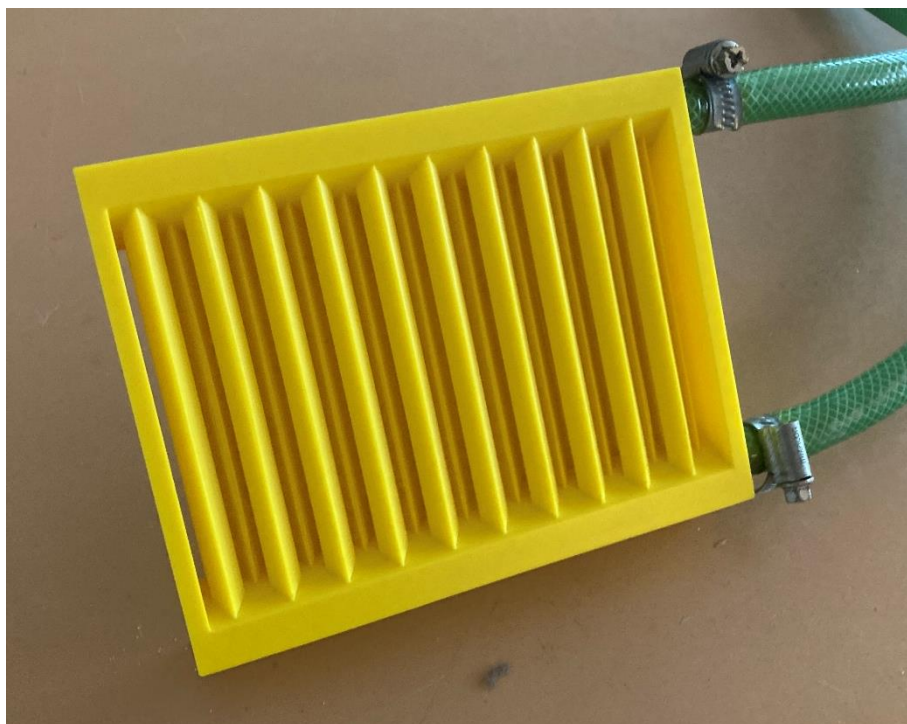
Celý vodní okruh určený pro chlazení počítačových komponent je v současné době běžně k dostání samostatně nebo jako součást PC sestavy. Stejně tak je možné pořídit jednotlivé části vodního chlazení, od tepelných výměníků a čerpadel až po hadičky a fitinky. Možnosti úprav chlazení podle preference uživatele jsou tedy pestré.

V rámci praktické části práce se věnuji návrhu vlastního modelu tepelného výměníku. Běžně prodávané výměníky mají podobnou konstrukci, často se setkáme s jedním kanálkem, kterým proudí chladicí kapalina, společně s tenkými destičkami tvořící žebrování. To ovšem neznamená, že by jiná konstrukce nebyla pro chlazení PC vodním okruhem možná. Úkolem praktické části této práce je navrhnout konstrukci výměníku pro vodní okruh, který je následně vytisknut na 3D tiskárně.

Úkolem této práce je porovnat vytištěný model s komerčně dostupným tepelným výměníkem. Pro navržený výměník jsou tedy provedena měření teplotní difference a hmotnostního průtoku vzduchu pro následné vyhodnocení teplotního výkonu. Zároveň je provedeno měření pro tlakové ztráty na straně vzduchu. Mohli bychom také měřit ztráty na straně vody, ale pro účely této práce předpokládáme, že použité čerpadlo ve okruhu dokáže tyto ztráty vyrovnat. Stejně měření je provedeno pro výměník tepla použitý v běžně dostupném vodním okruhu. Výsledky jsou následně porovnány.

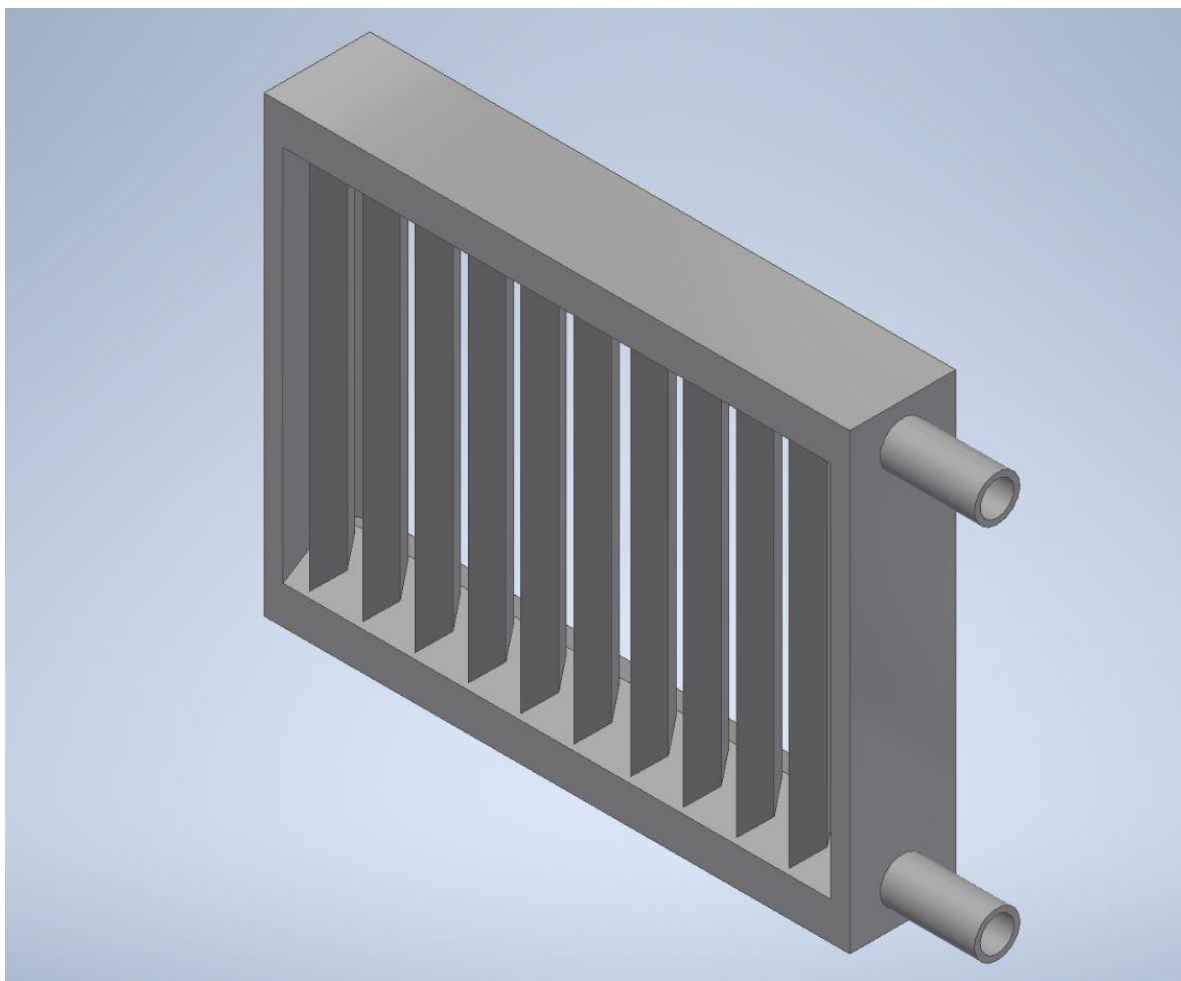
6.1. POROVNÁVANÉ VÝMĚNÍKY

U prvního měřeného výměníku se jedná o klasický komerčně dostupný výměník. Původně byl součástí celého vodního okruhu, ale pro naše účely je potřeba pouze tepelný výměník. Vodní blok s čerpadlem je tedy oddělen. Vlastní model výměníku je vytisknut na 3D tiskárně z materiálu PETG. Jedná se v podstatě o stejný materiál, jako se používá při výrobě PET láhví. Písmeno „G“ v názvu značí glykol. Tato přísada přidávaná během výroby modifikuje materiál, aby byl méně křehký a snadnější pro tisk. PETG je díky své houževnatosti, tepelné odolnosti a minimálnímu smrštění při chladnutí považován za vhodný materiál pro tisk větších objektů.

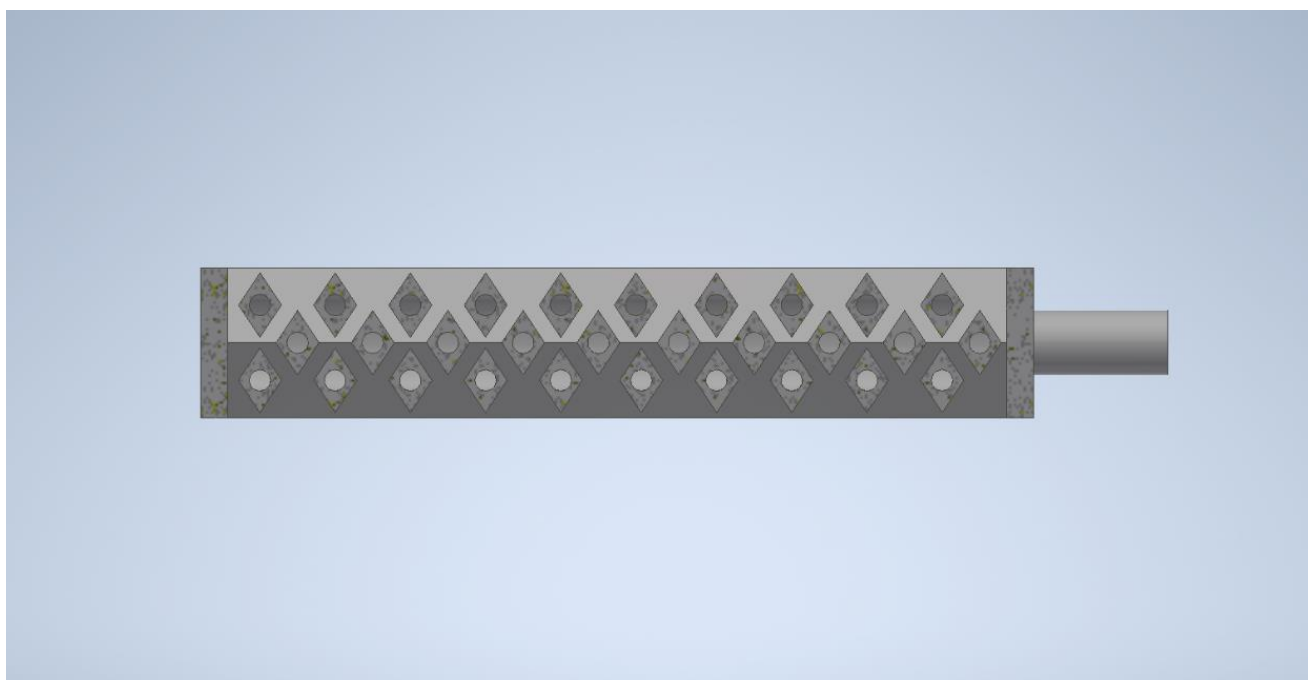


Obrázek 17, Vlastní výměník, foto autora

U jeho návrhu byla z mé strany snaha využít prvků nevhodných pro běžný způsob výroby výměníků, například frézování či svařování, a tím využít možnosti 3D tisku, kdy na složitosti konstrukce tolik nezávisí. Prvkem, který mě v tomto ohledu zaujal, je rozvětvení kanálku, ve kterém proudí chladicí kapalina. Konkrétně jsou použity žebříkovitou konstrukci, při které se proud přivádějící kapalinu rozděluje na velké množství menších, kolmo navazujících, kanálků, které se následně napojují na proud odvádějící kapalinu z výměníku. Co se týče rozměrů, držel jsem se velikosti referenčního výměníku, který má 155 mm na šířku a 120 mm na výšku, tloušťka je 28 mm. Kanálky napříč výměníkem jsou ve třech řadách. Jejich středy jsou od sebe vzdálené 14 mm. Vnitřní průměr je roven 4 mm, vnějším tvarem je kosočtverec o výšce 12 mm a šířce 8 mm [27] [28].



Obrázek 19, Model vlastního výměníku, foto autora



Obrázek 18, Řez modelem vlastního výměníku, foto autora

6.2. MĚŘENÍ

Pro účely této práce je potřeba změřit dvě veličiny, tlakové ztráty na výměníku a jeho tepelný výkon. Tlakové ztráty je možné měřit přímo dvěma tlakoměry, prvním před výměníkem a druhým za ním. Tepelný výkon v této úloze měříme nepřímo. Je možné ho dopočítat pomocí vzorce:

$$P = c_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T$$

Pro měrnou tepelnou kapacitu předpokládám stálý tlak, v tomto případě atmosferický. Jeho hodnota je proměnná podle teploty, je možno jí dohledat v různých termodynamických tabulkách. Rozdíl teplot měřím pomocí dvou teploměrů, jedním před a druhým za výměníkem. Pro tuto úlohu je použit termočlánek typu K, který má pro rozsah 0-1000 °C toleranci $\pm 0,4\% + 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Hmotnostní tok vzduchu opět není přímo měřitelná veličina, ale je jednoduše dopočtená pomocí vzorce:

$$\dot{m} = A \cdot v \cdot \rho$$

Jako kontrolní průřez беру průřez měřiče rychlosti o průměru 100 mm. Pro měření rychlosti proudění je používán vrtulkový anemometr Testo 417. Pro hodnoty rychlosti do 7,5 m/s měří s přesností $\pm 0,21 \text{ m/s}$. v této úloze nepředpokládáme, že tuto rychlost překročíme. Hustota vzduchu je proměnná podle teploty. Konkrétní hodnoty dohledávám v termodynamických tabulkách.



Obrázek 20, Anemometr Testo 417

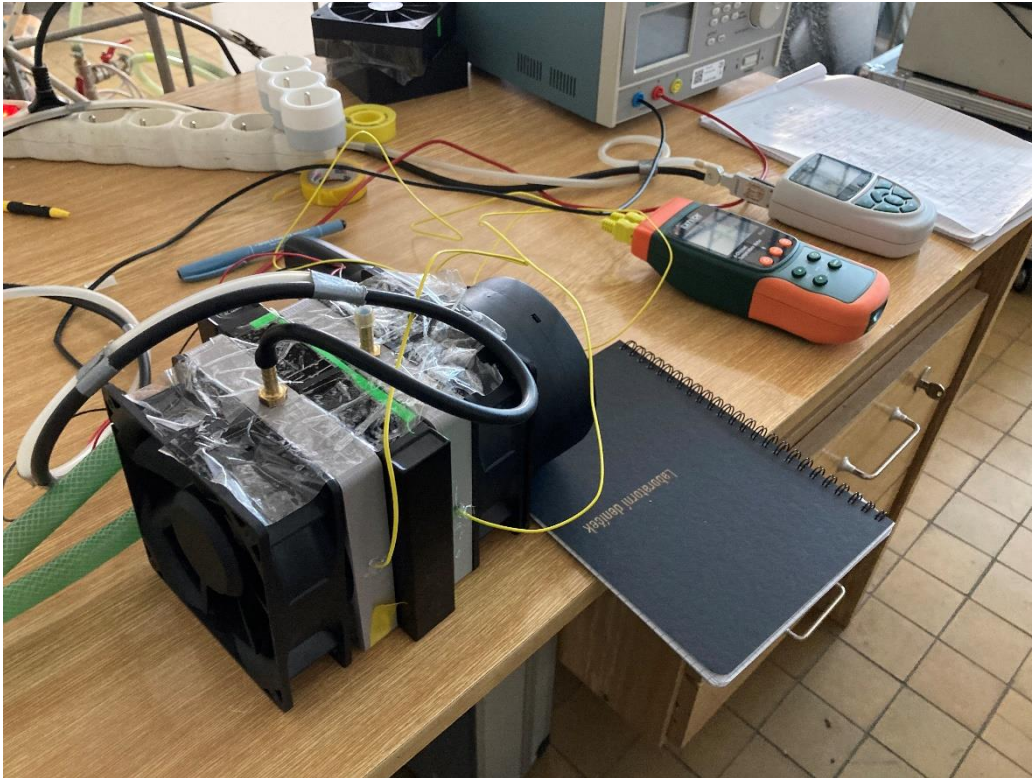
6.2.1. PRŮBĚH

Pro oba výměníky byla použita k měření jejich charakteristik stejná sestava. Na obě strany navazuje čtvercový plastový rámeček, ke kterým je přivedena hadička sloužící k měření tlaku. Zároveň je k němu připevněn zmiňovaný termočlánek. Vedle rámečků je nainstalován z každé strany ventilátor vytvářející proudění vzduchu. Jsou použity ventilátory od výrobce SUNON o velikosti 120x120x38 mm se jmenovitým napájecím napětím 12 V.



Obrázek 21, Ventilátor SONUN

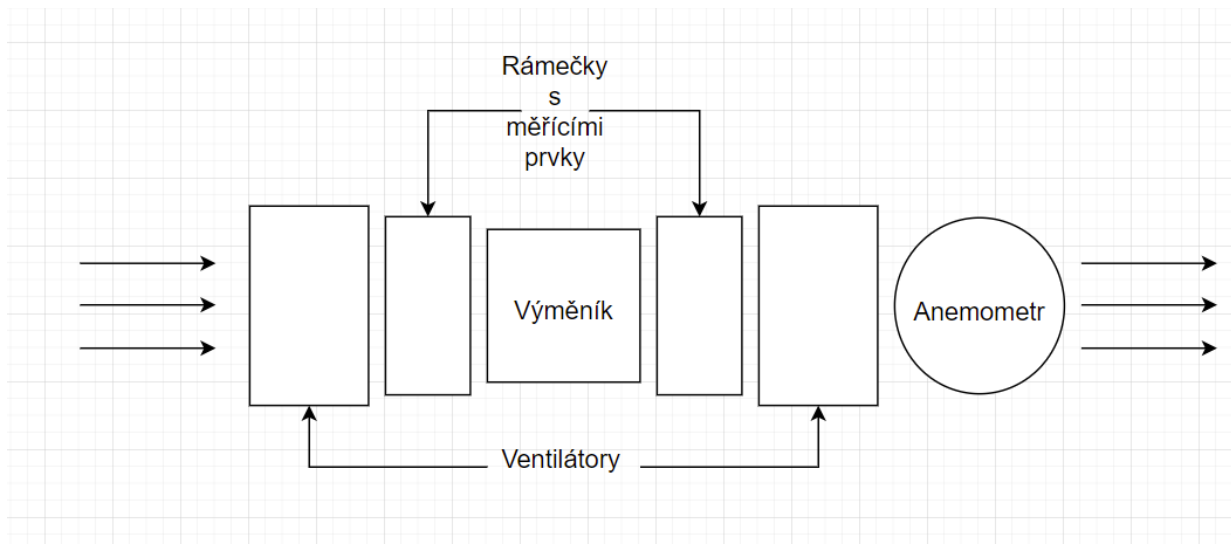
Celá tato sestava by se k sobě dala přimontovat pomocí šroubků, ovšem pro možnost jednoduché manipulace se všemi součástmi a vzduchové těsnění systému jsou všechny části k sobě přilepeny lepicí páskou. Vzhledem k tomu, že se sestavou se bude hýbat minimálně, je toto řešení dostačující. Kvůli kruhovému tvaru anemometru ho nebylo možné přidělat ke zbytku součástí, je tedy pouze na volno položen na konec měřící tratě a podložen, aby zabíral celou plochu měření.



Obrázek 22, Měřící sestava, foto autora

Rychlost proudění vzduchu je ovlivněna rychlostí otáček ventilátoru. Tu můžeme ovlivňovat napájecím napětím. Známe pro ventilátory jeho jmenovitou hodnotu, 12 V, ovšem je možné použít napětí už od 4 V a zároveň je můžeme hodnotu 12 V překročit. Při dlouhodobém používání tímto způsobem by u ventilátorů mohlo dojít k poškození nebo zkrácení životnosti, ovšem pro krátkodobé měření, jako je prováděno v případě této práce, je takovéto použití možné.

Pro změření závislosti tepelného výkonu a tlakových ztrát na napájecím napětí ventilátorů a rychlosti vzduchu probíhá je provedeno několik měření pro různá napětí, která měním na zdroji připojenému k ventilátorům.



Obrázek 23, Schéma měřicí sestavy, foto autora

Na místě chladicí kapaliny je pro účely této práce použita voda. Ta je používána i ve vodním okruhu zavedeném v počítači, ovšem v takovém případě je nutná destilovaná z důvodu elektrické vodivosti. V našem případě elektrická vodivost není problémová, je tedy použita obyčejná kohoutková voda. Pro vytvoření teplotního gradientu je do výměníku přiváděna o konstantní teplotě 50°C.

Tepelný výkon by bylo možné naměřit i na straně vody. V takovém případě by byla potřebná znalost hodnoty průtoku chladicí kapaliny a rozdíl teplot vody před a za výměníkem.

6.2.2. NAMĚŘENÉ HODNOTY

Pro měření charakteristik referenčního výměníku bylo napájecí napětí ventilátoru voleno v rozmezí 4-13 V. Pro menší hodnoty je měření prováděno po 0,25 V, následně po 0,5 V, pro vyšší hodnoty je krok měření roven 1 V. Samotné měření bylo prováděno celkem dvakrát. Při prvním pokusu byla chyba v zapojení hadiček pro tlakové ztráty, nejspíše byl špatně utěsněný spoj s kanálky na výměníku. Při druhém pokusu proběhlo měření bez komplikací

Pro referenční výměník byly naměřeny následující hodnoty:

U [V]	T [°C]	ΔT [°C]	v [m/s]	Δp [Pa]
4	41,9	15,8	1,47	10
4,25	40	14	2,03	16
4,5	39,1	12,9	2,36	21
4,75	38,2	12,2	2,73	24
5	37,5	11,5	3,07	29
5,5	36,6	10,8	3,44	34
6	35,9	10,2	3,8	40
6,5	35,7	9,7	4,17	47
7	34,9	9,2	4,42	51
7,5	34,6	8,8	4,69	58
8	34,2	8,4	5,37	62
9	33,6	7,7	5,81	79
10	33,4	7,4	6,34	94
11	32,9	7,1	6,77	101
12	32,7	6,7	7,04	112
13	32,6	6,5	7,38	126

Tab. 2, Naměřené hodnoty pro referenční výměník

Pro vlastní výměník bylo měření provedeno obdobně, jako pro výměník referenční. Rozmezí napájecího napětí ventilátorů bylo 4-15 V. Pro hodnoty 4-5 V bylo napětí zvyšováno po 0,25 V, pro hodnoty nad 5 V byl krok měření 0,5 V. Celý proces byl prováděn pouze jednou, odečítání potřebných hodnot probíhalo na rozdíl od referenčního výměníku bezproblémově. Ovšem jakožto komplikace se ukázala netěsnost vodního okruhu. Nejspíše z důvodu zvýšené teploty a vlhkosti se spoj výměníku s hadičkami přivádějícími vodu zdeformoval, což způsobovalo netěsnosti. To mělo za důsledek mírný únik vody, bylo tedy potřebné zajistit, aby se nedostala do kontaktu s měřícími nástroji.

Pro navržený výměník byly naměřeny následující hodnoty:

U [V]	T [°C]	ΔT [°C]	v [m/s]	Δp [Pa]
4	27,4	2,5	1,04	6
4,25	27,3	2,1	1,25	19
4,5	27,4	2,4	1,42	30
4,75	27,4	1,9	1,57	37
5	27,6	1,6	1,69	43
5,5	27,6	1,3	1,88	64
6	27,7	1,2	2,06	75
6,5	27,5	1,3	2,21	88
7	27,3	1,5	2,36	100
7,5	26,9	1,3	2,51	115
8	26,8	1,2	2,65	127
8,5	27,1	1,5	2,79	142
9	27,1	1,4	2,96	161
9,5	26,8	1,5	3,08	168
10	27	1,4	3,29	187
10,5	26,9	1,4	3,36	205
11	27	1,3	3,45	216
11,5	26,8	1,3	3,54	228
12	27	1,1	3,65	242
12,5	26,6	1,2	3,77	256
13	26,7	1,2	3,84	273
13,5	26,6	1,2	3,92	280
14	26,9	1,1	3,98	293
14,5	26,9	1	4,09	305
15	26,9	0,9	4,14	317

Tab. 3, Naměřené hodnoty pro vlastní výměník

6.2.3. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Jak už bylo poznamenáno v předchozích kapitolách, pro dopočítání tepelného výkonu je potřeba získat několik veličin. Hustotu proudícího vzduchu je možné dohledat v termodynamických tabulkách dle naměřené teploty T . Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku c_p je rovněž proměnná v závislosti na teplotě, ovšem pro rozmezí teplot, které byly odečteny při měření obou výměníků, je její hodnota rovna $1\,006\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Hmotnostní tok vzduchu je možné dopočítat ze znalosti hustoty vzduchu, její rychlosti a velikosti plochy kontrolního průřezu. Všechny tyto veličiny jsou z předchozích kroků známé.

Pro referenční výměník byly dopočteny tyto hodnoty:

U [V]	ρ [kg/m ³]	\dot{m} [kg/s]	P [W]
4	1,1204	0,01294	205,61
4,25	1,1272	0,01797	253,11
4,5	1,1305	0,02095	271,93
4,75	1,1337	0,02431	298,34
5	1,1363	0,0274	316,97
5,5	1,1396	0,03079	334,52
6	1,1422	0,03409	349,8
6,5	1,1429	0,03743	365,26
7	1,1459	0,03978	368,17
7,5	1,147	0,04225	374,03
8	1,1485	0,04844	409,33
9	1,1507	0,05251	406,74
10	1,1515	0,05734	426,85
11	1,1534	0,06133	438,04
12	1,1541	0,06381	430,11
13	1,1545	0,06692	437,57

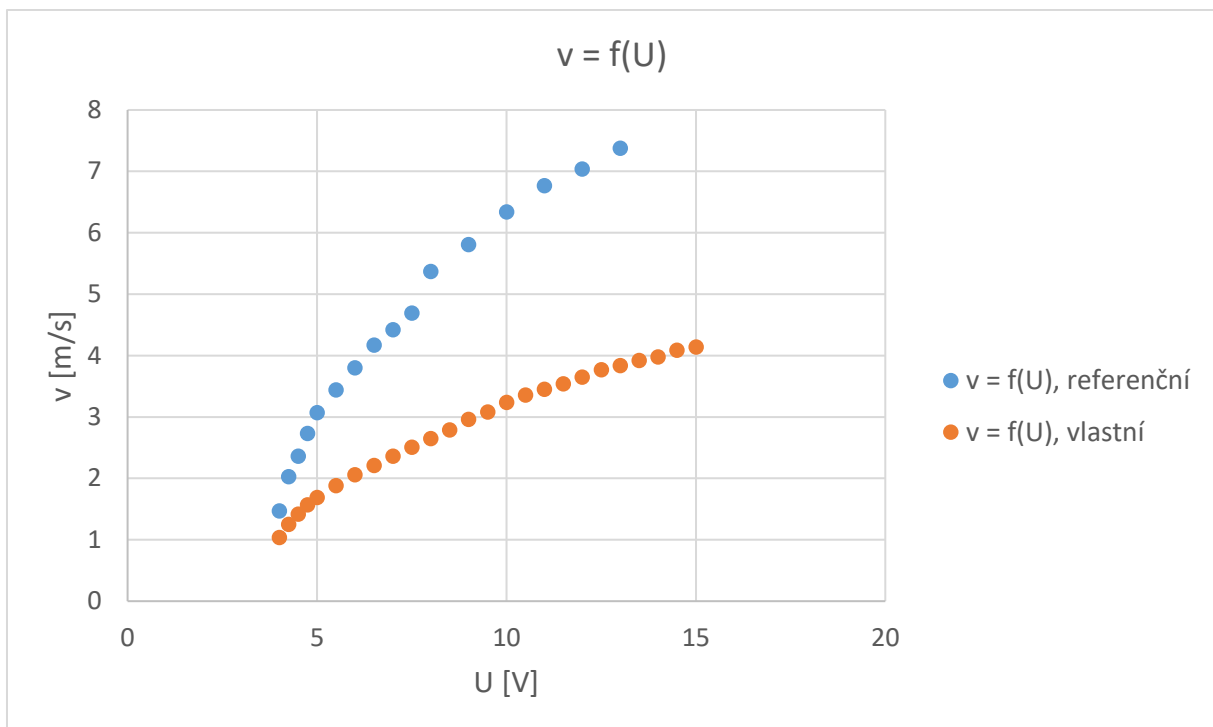
Tab. 4, Dopočtené hodnoty pro referenční výměník

Pro navržený výměník byly dopočteny tyto hodnoty:

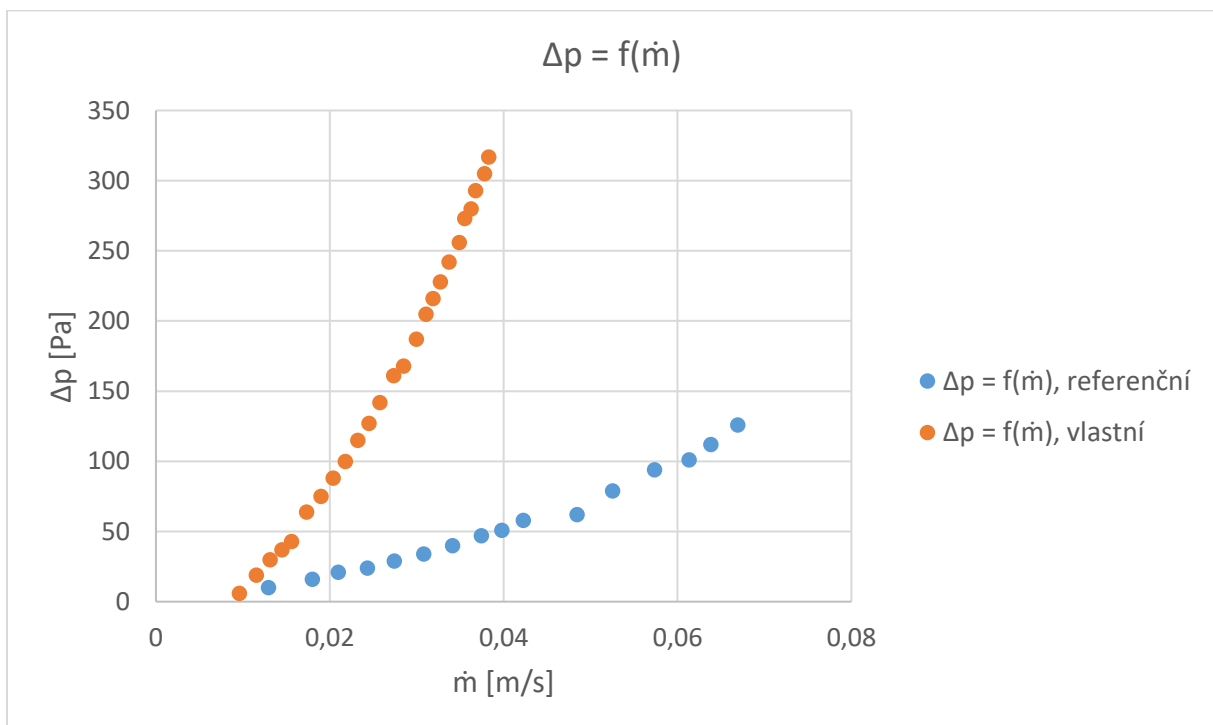
U [V]	ρ [kg/m ³]	\dot{m} [kg/s]	P [W]
4	1,1745	0,00959	10,04
4,25	1,1749	0,01153	14,5
4,5	1,1745	0,0131	18,71
4,75	1,1749	0,01449	22,88
5	1,1737	0,01558	26,49
5,5	1,1737	0,01733	32,78
6	1,1733	0,01898	39,34
6,5	1,1741	0,02038	45,31
7	1,1749	0,02178	51,7
7,5	1,1764	0,02319	58,56
8	1,1768	0,02449	65,3
8,5	1,1756	0,02576	72,3
9	1,1756	0,02733	81,38
9,5	1,1768	0,02847	88,2
10	1,176	0,02993	97,54
10,5	1,1764	0,03104	104,94
11	1,176	0,03187	110,59
11,5	1,1768	0,03272	116,52
12	1,176	0,03371	123,79
12,5	1,1776	0,03487	132,24
13	1,1772	0,0355	137,15
13,5	1,1776	0,03626	142,97
14	1,1764	0,03677	147,23
14,5	1,1764	0,03779	155,49
15	1,1764	0,03825	159,31

Tab. 5, Dopočtené hodnoty pro vlastní výměník

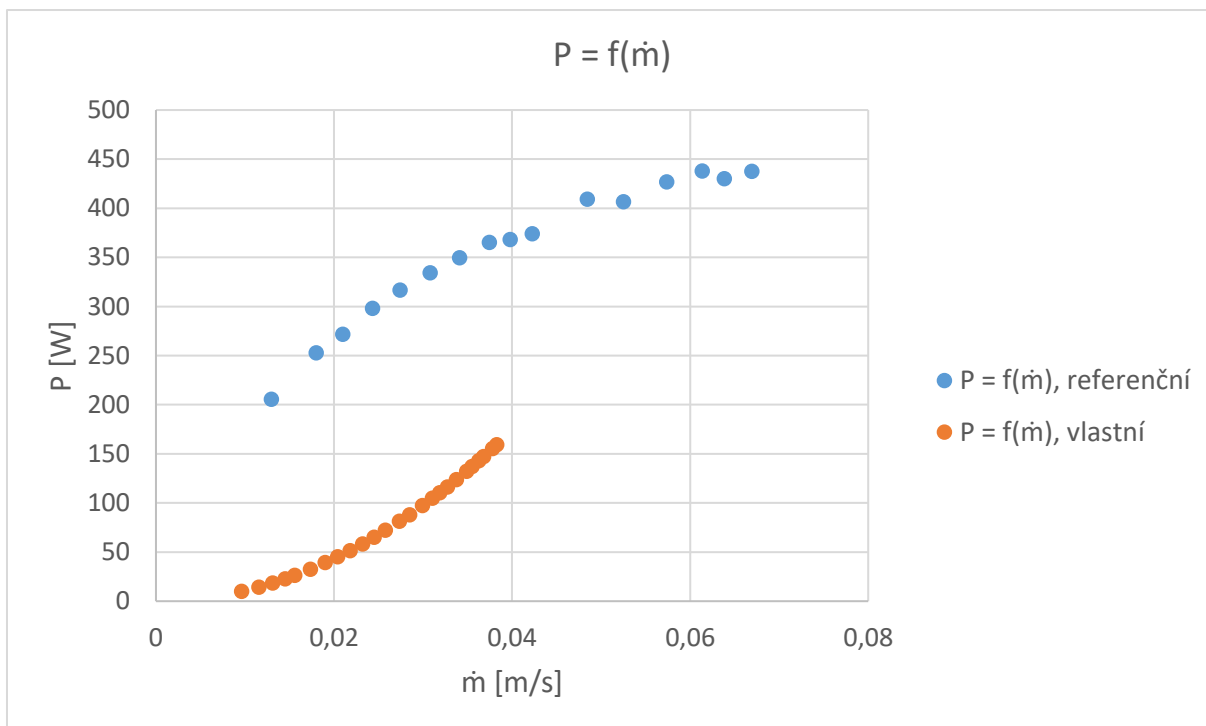
Pro názorné porovnání charakteristik obou výměníků byly závislosti vyneseny do grafů.



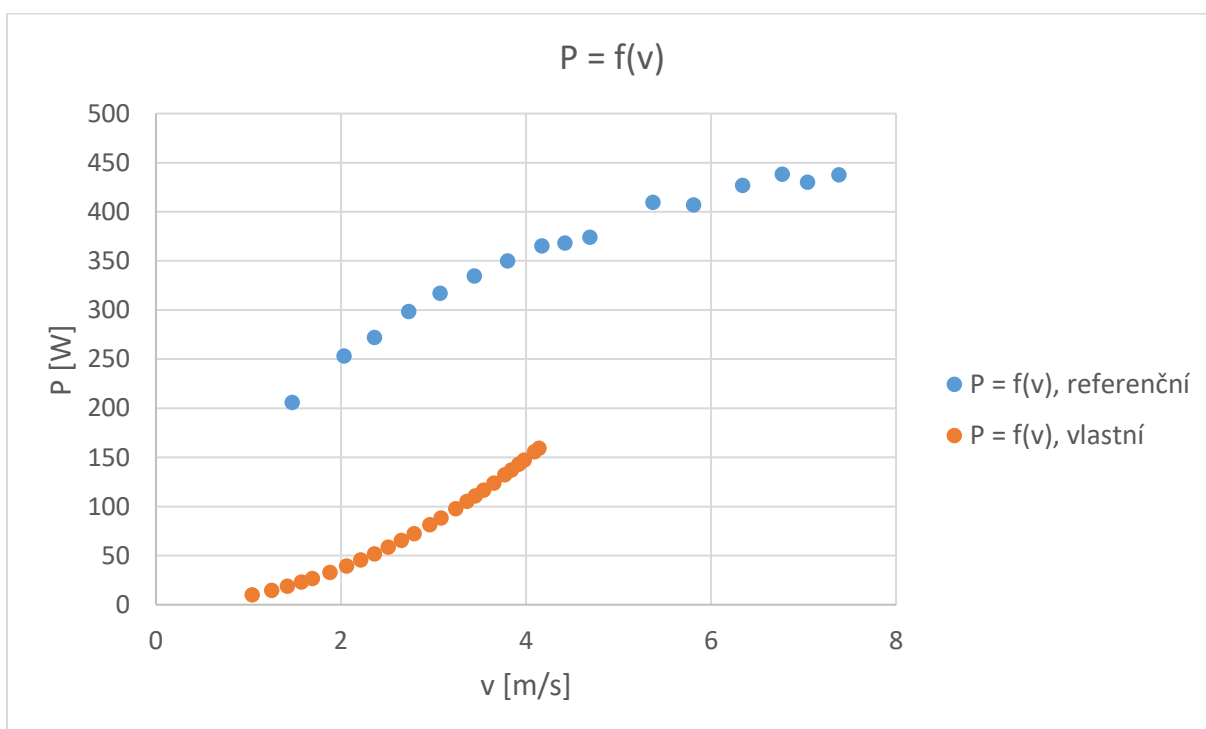
Obrázek 24, Závislost rychlosti proudění na napájecím proudu ventilátorů, foto autora



Obrázek 25, Závislost tlakových ztrát na hmotnostním toku, foto autora



Obrázek 26, Závislost tepelného výkonu na hmotnostním toku, foto autora



Obrázek 27, Závislost tepelného výkonu na rychlosti proudění, foto autora

Z naměřených hodnot a z grafů lze jednoduše poznat, že referenční výměník je oproti navrženému výměníku výkonnější. Při porovnání charakteristik například pro jmenovité napájecí napětí ventilátorů 12 V můžeme pozorovat, že tepelný výkon je pro referenční výměník více jak třikrát vyšší než pro vlastní model, naopak hodnota tlakových ztrát je skoro třikrát menší. Tlakové ztráty jsou ovlivněny v tomto případě pouze konstrukcí výměníku, je tedy možné prohlásit, že vlastní návrh byl v tomto ohledu přinejmenším nešikovný. Tepelný výkon je kromě konstrukce ovlivňován také použitým materiálem. Pro tisk vlastního výměníku byl použit materiál PETG, který se vyznačuje spíše svou všestranností, nikoliv svými teplovodivými vlastnostmi. Ovšem hlavním činitelem způsobujícím nižší tepelný výkon je nejspíše opět nešikovný návrh konstrukce výměníku.

7. ZÁVĚR

V první části práce bylo za úkol porovnat různé metody chlazení počítačů, ať už z hlediska výkonu nebo z finanční stránky. Tyto dvě vlastnosti jdou v rámci chladičů PC ruku v ruce. Za nejlevnější a zároveň za jedno z nejméně efektivních metod je považováno použití pasivního chladiče neboli heatsinku. Při kombinovaném chlazení, tedy při přidání ventilátoru do chladicího systému, tepelný výkon oproti předchozí metodě roste, opět společně s cenou. Kdybychom naopak hledali nevykonnější a také nejdražší způsoby chlazení počítačové techniky, dostali bychom se například ke kompresorovému chlazení. To sice poskytuje výborné chlazení komponent, ale pouze za cenu náročné údržby, vysoké pořizovací částky a hlasitého provozu. Za tišší metodu můžeme považovat například chlazení pomocí olejového akvária, které kromě vysokého tepelného výkonu může sloužit i jako efektní prezentace PC sestavy. S sebou ale přináší nevýhodu složité manipulace s celým zařízením a velmi náročné údržby, kdy je i při sebemenší manipulaci potřebné celou nádržku vypustit a následně opět napustit chladicí kapalinou.

Chlazení vodním okruhem se nabízí jako zlatá střední cesta. V současné době je možné zakoupit si vodní chladič připravený k jednoduchému nainstalování do počítače a okamžitému provozu. Jeho potřebná údržba je minimální, jediným úkonem může být korigování množství chladicí kapaliny kolující v systému. I tomuto se dá předejít řádným utěsněním celého okruhu pro zamezení úniku sebemenšího množství vody nebo vodní páry. Co se týče tepelného výkonu, pro běžného uživatele PC je vodní okruh více než dostačujícím chlazením. Dvě nejnáročnější komponenty na chlazení v osobních počítačích jsou procesory a grafické karty. Po stránce výkonu těchto komponent vyšších hodnot dosahuje grafická karta. V současnosti se můžeme setkat s grafickými čipy s výkonem okolo 160 W. Při měření referenčního výměníku, který byl vyjmut z běžně prodávaného vodního okruhu, jsme dosahovali hodnot tepelného výkonu skoro 0,5 kW. Můžeme tedy s klidem prohlásit, že pokud není zapojeno do jednoho chladicího systému více součástí, například grafická karta s procesorem nebo více grafických karet najednou, k uchlazení i výkonnějších verzí procesorů a grafických karet obyčejný vodní okruh bohatě stačí.

V druhé části práce bylo snahou zjistit, jestli výměníky do vodního okruhu je možné vyrábět i pomocí 3D tisku. Pokud ano, bylo naším úkolem zjistit, jestli by takto vyrobené modely byly schopny konkurovat běžně prodávaným kusům, co se týče tepelného výkonu.

V tomto ohledu můžeme naše snažení považovat za poloviční úspěch. Vytisknutý model zapojený do chladicího okruhu fungoval jako tepelný výměník. Až na drobnou vadu, kdy spoj kanálků s hadičkami přivádějícími vodu nebyl dokonale těsný, nedošlo k žádné výrazné komplikaci. Problémem u měřeného modelu byl nízký tepelný výkon v porovnání s referenčními hodnotami. To ovšem bylo způsobeno převážně nevhodnou konstrukcí. Při měření byly naměřeny vysoké tlakové ztráty, které způsobují nízkou rychlost proudění vzduchu, která přímo ovlivňuje tepelný výkon výměníku.

Nakonec tedy bylo zjištěno, že modely vyrobené pomocí 3D tisku, je možné použít jako tepelný výměník ve vodním okruhu, ale pouze do jisté míry. Návrh použitý v rámci této práce byl nešikovný, ale stále jsme mohli pozorovat žádané, i když nízké, chladicí charakteristiky. To by se dalo upravovat výhodnější konstrukcí celého modelu. Jestli by bylo možné dosáhnout lepších vlastností, než u konvenčně vyráběných výměníků zůstává otázkou.

ZDROJE

- [1] OREL, Petr. Spotřeba procesorů - komplexní přehled (Q1 2003). *PC tuning* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: https://pctuning.tyden.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=3508&catid=26&Itemid=65
- [2] NOŽIČKA, Jiří. Základy termomechaniky. Vyd. 2. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04022-5.
- [3] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. Přenos hybnosti, tepla a hmoty. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02933-6.
- [4] KŘIVOHLÁVEK, Jindřich. *Chlazení počítače: kompletní průvodce (nejen) pro hráče*. Brno: Computer Press, 2007. ISBN 978-80-251-1509-1.
- [5] FUKÁTKO, Tomáš a Jaroslav FUKÁTKO. *Teplo a chlazení v elektronice II*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-199-3.
- [6] VÍTEK, Jan. Technologie současného a budoucího chlazení. *Svět hardware* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/technologie-soucasneho-a-budouciho-chlazení/12967>
- [7] STACH, Jan. Základy chlazení a tichý počítač. *PC tuning* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://pctuning.tyden.cz/navody/zaklady-stavba-pc/7167?start=1>
- [8] SEKERA, Pavel. *Vodní okruh pro chlazení PC*. *GEEK* [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.czc.cz/geek/vodni-okruh-pro-chlazení-pc-je-to-lehci-nez-se-zda-1-dil/clanek>
- [9] KOTLÍK, Václav. Heat Pipe, princip a konstrukce. *Svět hardware* [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://www.svethardware.cz/heat-pipe-princip-a-konstrukce/15941?fbclid=IwAR3e5DC2PgztFXkpVRdAT7Vj54DfSpVwAm1HTnNbd6nm6yF_VMHBdxfuXKM
- [10] JAVŮREK, Karel. Severy ponořené do oleje? *Živě.cz* [online]. [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://www.zive.cz/clanky/severy-ponorene-do-oleje-efektivni-chlazení-i-podle-intelu/sc-3-a-165349/default.aspx>

- [11] KRČMÁŘ, Petr. Utopte servery v oleji, ušetříte a vyhřejete městský bazén. *ROOT* [online]. [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/utopte-servery-v-oleji-usetrite-a-vyhrejete-mestsky-bazen/>
- [12] KOŠTÁL, Ondřej. Chladíme procesor: Vzduch, AiO nebo vlastní vodík? *PC Tuning* [online]. [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/39715-chladime-procesor-vzduch-aio-nebo-vlastni-vodnik>
- [13] BOČEK, Pavel. Biohazard a chlazená sestava kompresorem. *Svět Hardware* [online]. [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/biohazard-a-aktualizovana-sestava-chlazena-kompresorem/24004>
- [14] BROWN, Andy. Asetek's Vapochill CPU cooling system. *Tech Report* [online]. [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://techreport.com/review/4875/aseteks-vapochill-cpu-cooling-system/>
- [15] *Peltierovy termobaterie* [online]. [cit. 2020-12-22]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/peltierovy-termobaterie.html>
- [16] *Fanless cooler FX70* [online]. In: . [cit. 2020-12-24]. Dostupné z: <https://www.zalman.com/EN/Product/ProductDetail.do?pageIndex=3&pageSize=10&pageUnit=12&productSeq=321&searchCategory1=4&searchCategory2=48&searchCategory3=-99&searchKey=&searchWord=>
- [17] *Noctua NH-D15* [online]. In: . [cit. 2020-12-24]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/noctua-nh-d15-d1480167.htm>
- [18] *ASUS ROG STRIX LC 360 RGB* [online]. In: . [cit. 2020-12-24]. Dostupné z: https://www.alza.cz/asus-rog-strix-lc-360-rgb-d6217841.htm?kampan=adw1_komponenty_pla_all_obecna-css_chlazenivodni_c_1003835__AVC100c6_414817402799_~92896241735~&gclid=CjwKCAiAoOz-BRBdEiwAyuvA6-toUMiJPQ0NsVBLRU8vm1s4Anbys_JqkIOno8tR6IfDMj3fciWipRoCc7cQAvD_BwE
- [19] VÍTEK, Jan. Vodní chlazení a dnešní nabídka. *Svět hardware* [online]. [cit. 2020-12-24]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/vodni-chlazen-i-a-dnesni-nabidka/26311>

- [20] OLŠAN, Jan. Vodní okruh s Peltierem. *HW Cooling* [online]. [cit. 2020-12-24]. Dostupné z: <https://www.hwcooling.net/vodni-okruh-s-peltierem-medium-umi-chladit-pod-pokojovou-teplotu/>
- [21] NEKVAPIL, Vojtěch a Jan SKÁCEL. Vodní chlazení - detailní konstrukce bloků. *PC Tuning* [online]. [cit. 2020-12-24]. Dostupné z: https://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/11150-vodni_chlazení-detailní_konstrukce_bloku?start=1
- [22] Vodní chlazení: výhody a nevýhody. *Alza* [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/vodni-chlazení-vyhody-a-nevyhody>
- [23] NEKVAPIL, Vojtěch a Jan SKÁCEL. Moderní vodní chlazení a co byste o něm měli vědět. *PC Tuning* [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: https://pctuning.tyden.cz/navody/upravy-snizeni-hluku/9911-moderni_vodni_chlazení_a_co_byste_o_nem_meli_vedet?start=1
- [24] GOBOR, Atila. Fittings and Tubing Guide. *EKWB* [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://www.ekwb.com/blog/fittings-and-tubing-guide/>
- [25] *Hydor pumpa L 30 - bulk* [online]. In: . [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: https://www.jscomputers.cz/produkt/Hydor_Pumpa_L_30_-_bulk.html?arg1=001053015000
- [26] ŠULC, Tomáš. Teoretický i praktický průvodce vodním chlazením. *PC Tuning* [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/27530-teoreticky-i-prakticky-pruvodce-vodnim-chlazenim?start=1>
- [27] 3D Prinet Filament Types. *All3DP* [online]. 2021 [cit. 2021-8-2]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>
- [28] Rozdíl mezi ABS, PLA a PETG. *MaterialPro 3D* [online]. 2021 [cit. 2021-8-2]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
- [29] *Testo 417 anemometr 0,3 do 20 m/s* [online]. [cit. 2021-8-4]. Dostupné z: https://www.conrad.cz/p/testo-417-anemometr-03-do-20-ms-102202?&vat=true&gclid=CjwKCAjw0qOIBhBhEiwAyyVvcf4nZuJoU9Pac7ApeKrpsUTay2kGOHlB5oLjDtMEJ5Fqvz1zPpH4M_BoC5QoQAvD_BwE

[30] Testo 417 anemometr 0,3 do 20 m/s. *Conrad* [online]. [cit. 2021-8-4]. Dostupné z:
<https://www.gme.cz/ventilator-sunon-pmd1212pmb1>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1, Heatsink FX70 [16]	7
Obrázek 2, Kombinovaný chladič NOCTUA NH-D15 [17]	8
Obrázek 3, Ventilátor Delta Tri Blade [6]	8
Obrázek 4, Vodní chlazení ASUS ROG STRIX LC 360 RGB [18]	10
Obrázek 5, Schéma funkce tepelných trubic [9]	11
Obrázek 6, Olejové akvárium [12]	12
Obrázek 7, Schéma Peltierova článku [15]	14
Obrázek 8, Vodní blok na grafické kartě [22]	16
Obrázek 9, Vodní blok s cylindrickými výstupky [21]	17
Obrázek 10, Schéma proudění kapaliny okolo hranolů [21]	17
Obrázek 11, Hadičky do vodního okruhu [23]	18
Obrázek 12, Fitinka trn se svorkou [23]	19
Obrázek 13, Expanzní nádoba [23]	20
Obrázek 14, Průtokové čerpadlo [19]	21
Obrázek 15, Ponorné čerpadlo [25]	21
Obrázek 16, Teplený výměník Airplex PRO 360 [26]	22
Obrázek 17, Vlastní výměník, foto autora	25
Obrázek 18, Řez modelem vlastního výměníku, foto autora	26
Obrázek 19, Model vlastního výměníku, foto autora	26
Obrázek 20, Anemometr Testo 417 [29]	28
Obrázek 21, Ventilátor SONUN [30]	28
Obrázek 22, Měřicí sestava, foto autora	29
Obrázek 23, Schéma měřicí sestavy, foto autora	30
Obrázek 24, Závislost rychlosti proudění na napájecím proudu ventilátorů, foto autora	35
Obrázek 25, Závislost tlakových ztrát na hmotnostním toku, foto autora	35
Obrázek 26, Závislost tepelného výkonu na hmotnostním toku, foto autora	36
Obrázek 27, Závislost tepelného výkonu na rychlosti proudění, foto autora	36