

Tepelná bilance chladicího systému počítačové sestavy

Patrik Svajda

Bakalářská práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Patrik Svajda
Osobní číslo: A19762
Studijní program: B3902 Inženýrská informatika
Studijní obor: Informační a řídicí technologie
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Tepelná bilance chladicího systému počítačové sestavy
Téma práce anglicky: Thermal Balance of a Computer Set Cooling System

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární řešení týkající se možnosti způsobu chlazení elektronických součástek v počítači.
2. Navrhněte vlastní kapalinový chladicí okruh.
3. Proveďte výpočet tepelné bilance chladicího okruhu navrženého řešení.
4. Realizujte chladicí okruh a ověřte jeho funkčnost.
5. Proveďte srovnání s běžně dostupným chlazením, výsledky vyhodnoťte.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. FUKÁTKO, Tomáš a Jaroslav FUKÁTKO. Teplota a chlazení v elektronice II. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 118 s., ISBN 8073001993.
2. HABERLE, Heinz a kol. Průmyslová elektronika a informační technologie. 1. vydání, překlad Handlíř Jiří, 719s., 2003., ISBN 8086706044
3. BROŽA, Petr. Stavíme si počítač. 4. vydání, 194s., 2004., ISBN 9788072269334
4. VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. Elektronika. Součástky a obvody. Principy a příklady. 3. vydání. 220 s., 2005., ISBN 9788024712413

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Dagmar Janáčková, CSc.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

Konzultant bakalářské práce: **doc. Ing. Martin Sysel, Ph.D.**
Ústav počítačových a komunikačních systémů

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 15. ledna 2022

Jméno, příjmení: Patrik Svajda

Název bakalářské práce: Tepelná bilance chladicího systému počítačové sestavy

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne

11. 5. 2022

Patrik Svajda
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na řešení chlazení počítačových komponent. V první části práce je popsáno, jaké komponenty je zapotřebí v počítači ochlazovat např: základní deska, procesor, pevný disk, operační paměť, grafická karta a další. Dále je popsáno, jakými mechanismy dochází k chlazení počítačových komponent, ať se jedná o pasivní či aktivní chlazení. Uzavřený vodní okruh (AIO) a vodní okruh na míru. Teoretická kapitola pojednává o mechanismech sdílení tepla, vedením tepla jednovrstvou deskou a více vrstvou deskou, přestupem a prostupem tepla, sáláním a jejich kombinací. V praktické části je proveden návrh a popis realizace kapalinového chlazení. Součástí kapitoly je rovněž provedení tepelné bilance chladicího okruhu standardního a navrženého kapalinového okruhu, pro závěrečné porovnání účinnosti chlazení.

Klíčová slova: aktivní a pasivní chlazení počítačových komponent, kapalinové chlazení, sdílení tepla, vedení tepla, přestup tepla, prostup tepla, sálání, struktura počítače.

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on computer cooling systems. It describes components which needs cooling, such as motherboard, central processing unit, hard drive, operating memory (RAM), graphic card and others. The work next describes passive and active computer cooling systems as a mechanism of cooling computer components. Closed water circuit (AIO) and tailor-made water circuit. Theoretical part of this work describe shared heat mechanism, heat conduction through one-layered or multiple-layered board, heat transfer and convection, heat emission and combination of these mechanisms. The practical part describes proposal and process of liquid cooling system. This part also focuses on heat evaluation of standard and hydraulic cooling systems and their effectiveness.

Keywords: active and passive computer cooling system, hydraulic cooling, heat sharing, heat transfer, heat convection, heat emission, computer structure.

Rád bych poděkoval své vedoucí bakalářské práce, prof. Ing. Dagmar Janáčové, CSc a doc. Ing. Martinu Syslovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které mi dávali během konzultací. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 CHLAZENÍ ELEKTRONICKÝCH KOMPONENTŮ	11
1.1 ZÁKLADNÍ DESKA	11
1.2 PROCESOR	12
1.3 PEVNÝ DISK.....	12
1.4 OPERAČNÍ PAMĚŤ (RAM)	13
1.5 GRAFICKÁ KARTA	13
1.6 NAPÁJECÍ ZDROJ.....	14
1.7 PELTIERŮV ČLÁNEK.....	15
2 HLAVNÍ ZPŮSOBY CHLAZENÍ KOMPONENTŮ	16
2.1 PASIVNÍ CHLADIČ	16
2.2 AKTIVNÍ CHLAZENÍ	16
2.3 AIO CHLADÍCÍ OKRUH (ALL IN ONE)	17
2.4 VODNÍ OKRUH NA MÍRU.....	18
2.4.1 Vodní blok CPU a GPU	18
2.4.2 Vodní pumpa	19
2.4.3 Výměník	20
2.4.4 Hadice a trubice.....	21
2.4.5 Fitinky	22
2.4.6 Expanzní výměník tepla	22
2.4.7 Ventilátory.....	23
3 SDÍLENÍ TEPLA	24
3.1 VEDENÍ TEPLA (KONDUKCE).....	25
3.2 VEDENÍ TEPLA VÍCEVRSTVOU STĚNOU	26
3.3 PŘESTUP TEPLA	27
3.4 PROSTUP TEPLA	30
3.5 SÁLÁNÍ (RADIACE)	32
3.6 KOMBINACE PROUDĚNÍ A SÁLÁNÍ.....	33
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	35
4 KONSTRUKCE POČÍTAČOVÉ SESTAVY	36
4.1 POČÍTAČOVÁ SKŘÍŇ.....	37
4.2 ZÁKLADNÍ DESKA.....	38
4.3 PROCESOR	39
4.4 GRAFICKÁ KARTA	40

4.5	PEVNÝ DISK – SYSTÉM.....	41
4.6	OPERAČNÍ PAMĚŤ	41
4.7	ZDROJ.....	41
4.8	VZDUCHOVÉ CHLAZENÍ	42
5	NÁVRH VODNÍHO OKRUHU.....	43
5.1	VODNÍ BLOK CPU A GPU	43
5.2	VODNÍ PUMPA S VÝMĚNÍKEM	43
5.3	VÝMĚNÍK TEPLA.....	44
5.4	TRUBICE, FITINKY, CHLADICÍ KAPALINA, VIZUÁLNÍ PRŮTOKOMĚR	45
5.5	VENTILÁTOR	46
5.6	DIGITÁLNÍ PRŮTOKOMĚR	46
5.7	SEZNAM POUŽITÝCH ČÁSTÍ VODNÍHO OKRUHU	47
6	REALIZACE STAVBY	48
6.1	INSTALACE ZÁKLADNÍCH ČÁSTÍ DO POČÍTAČOVÉ SKŘÍŇE	48
7	VÝPOČET TEPELNÉHO TOKU PŘI CHLAZENÍ.....	56
7.1	VÝPOČET PRO KLASICKÉ CHLAZENÍ VEDENÍM TEPLA Z PROCESORU DO HLINÍKOVÉHO CHLADICÍHO ELEMENTU.....	56
7.2	PŘESTUP TEPLA DO CHLADICÍ VODY V CPU BLOKU	57
7.3	VÝPOČET TEPELNÉHO TOKU Z GRAFICKÉ KARTY DO CHLADICÍ VODY	58
7.4	VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA VNITŘNÍ STRANĚ POTRUBÍ, JEDNÁ SE O NUCENOU KONVEKCI.....	60
7.5	VÝPOČET SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA NA VNĚJŠÍ STRANĚ POTRUBÍ.....	61
7.6	VÝPOČET TEPELNÉHO TOKU PRO VÝMĚNÍK	62
7.7	VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT Z CHLADICÍ KAPALINY DO OKOLNÍHO VZDUCHU PROSTUPEM	63
	ZÁVĚR	65
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	70
	SEZNAM OBRÁZKŮ	73
	SEZNAM TABULEK.....	75

ÚVOD

Bakalářská práce pojednává o návrhu a realizaci kapalinového chlazení počítačové sestavy na základě tepelné bilance.

V této době, kdy se nároky na výkon počítače zvyšují, protože jsou čím dál tím náročnější různé programové aplikace a zejména některé počítačové hry, tak se musí přizpůsobit efektivita chlazení v závislosti na typu počítače a jeho výkonového zatížení. Zároveň však se klade důraz i na estetický vzhled počítačových sestav. Stolní počítače sestavy mají průhledné bočnice, kdy je možné nahlédnout na vnitřní strukturu počítače, která také bývá různě podsvícena. Aby zvýšený výkon počítače nebyl příliš hlučný při vyšších výkonnostních procesech realizuje se často kapalinové chlazení na míru.

Cílem mé práce bylo analyzovat možnosti účinnějšího odvodu tepla z intenzivněji zahřívajících se elektronických součástí jako je: procesor a grafická karta. Provést vlastní návrh a realizaci kapalinového chladičového okruhu. Dalším cílem mé práce bylo navrhnout a sestavit chladičový systém, který bude mít nižší energetické nároky s ohledem na výkonové vytížení počítačové sestavy.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 CHLAZENÍ ELEKTRONICKÝCH KOMPONENTŮ

Ve výpočetní technice je nutné ochlazovat elektronické součástky, se během používání zahřívají. Se zvyšujícím se výkonem počítačových komponent zároveň narůstají požadavky na jejich chlazení. Při nedostatečném chlazení náročných komponent může dojít k jejich přehřátí. Výsledkem je snížení výkonu a v důsledku přehřátí dochází k porušení komponentu, který nemusí již více fungovat. To potom může vést ke ztrátě cenných dat, nebo pracovních činností, které daný počítač obsluhuje.

1.1 Základní deska

Základní deska je základ pro většinu počítačů. Hlavním účelem základní desky je propojení jednotlivých komponentů do fungujícího celku a následného napájení jednotlivých komponent a jejich spolupráci přes interní spoje, kterými je základní deska vybavena [4,5]. Konstrukce základních desek je navržena tak, aby docházelo k ochlazování elektronických spojů, které jsou na základní desce, za pomoci proudění vzduchu v počítačové skříni [2].



Obrázek 1. Základní deska sestavy – foto autora

1.2 Procesor

Procesor se skládá z milionů tranzistorů, což ve výsledku znamená, že se jedná o komplikovaný integrovaný obvod. Procesorem řídíme činnosti počítače [3]. Rychlost procesoru se mění podle sériového typu procesoru. V případě, že máme více jader s pracovními vlákny v procesoru, zvyšujeme tím pracovní efektivitu s teplotou. Procesor má pracovní rychlost udávanou v Hz. K ochlazování procesoru dochází za pomoci kombinace pasivního a aktivního chlazení. Pasivní chlazení slouží k přebírání vyzářeného tepla a aktivní chlazení za pomoci ventilátorů má za úkol odvod tepla z pasivního chladiče [15]. Intel udává tepelnou výkonnost 125 W v základním režimu a 150 W v turbo boostu pro procesor intel core i5 – 12600KF [14].

Někdy nastává problém, že tepelný výkon je brán z jednoho jádra procesoru. Výsledkem je, že Thermal Design Power – nejvyšší tepelný výkon (TDP) u procesorů intel je často mnohem vyšší, než výrobce udává. To samé platí pro AMD výrobce, kdy udávané TDP je rozdílné od výsledného [7].



Obrázek 2. Instalovaný procesor na základní desku – foto autora

1.3 Pevný disk

Pevný disk nebývá často chlazen i přesto, že se jedná o základní část, na které má uživatel uložena veškerá data. U dřívějších mechanických disků docházelo k chlazení vzduchem. Na jedné části disku byl otvor s filtrem pro vstup vzduchu do zahříváné oblasti. Teploty disků bývají okolo 5 °C. Optimální teplota je v rozmezí 25–40 °C. Teplota, kterou by disk neměl překročit je 60 °C. U novějších disků SSD jsou teploty vyšší od 0–70 °C [7].

Samotný disk nemá žádné chlazení. Nejnovější NVMe disky mají pracovní teploty od 0–70 °C, ale mohou dosáhnout na teplotu až 80°C. Tento druh disku lze chladit pasivním chlazením [12].



Obrázek 3. Kingston NVMe PCIe SSD [17]

1.4 Operační paměť (RAM)

Dnešní moderní operační paměti obsahují z větší části pasivní chladič. Při vyšším pracovním zatížení je možnost osadit operační paměti vodním blokem, který lze následně zapojit do vodního okruhu. [7]



Obrázek 4. Operační paměť Gigabyte aorus rgb 16gb [16]

1.5 Grafická karta

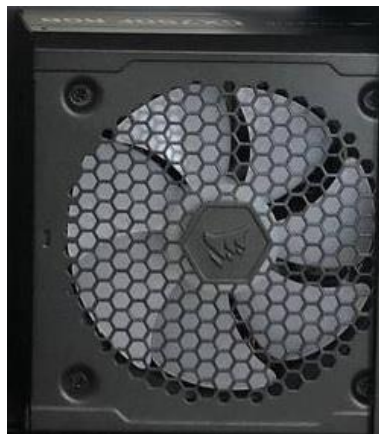
Základní grafické karty obsahují pouze pasivní chladič, kterému se daří chladit grafický čip. U grafických karet, které naopak mají vyšší výkon se využívá takzvaný aktivní chladič. Dnešní nejnovější grafické karty během své práce mohou být zatíženy až 560 W. Grafická karta pracuje při různých teplotách a bez poškození lze pracovat do 80 °C [7]. Pokud se teplota dostane nad 100 °C dochází k poškození. V závislostech na teplotách vyprodukované počítačem, je potřeba vyprodukované teplo odvést mimo počítačovou skříň. Pokud by se nezajistila cirkulace vzduchu z počítače, docházelo by k nárůstu teploty a snižování tepelného výkonu chlazení [9].



Obrázek 5. GEFORCE RTX 3090 [11]

1.6 Napájecí zdroj

Napájecí počítačový zdroj pracuje s napájecím napětím 230 V v závislosti na spotřebě, zdroj má napěťové větve, které dodávají napětí ± 12 V a ± 5 V, protože každá součástka pracuje s jiným napětím. Vzhledem k tomu, že počítačové komponenty pracují s elektrickým proudem, tím dochází k vytváření tepla, které je potřeba odvést mimo pracovní prostor. K ochlazení napájecího zdroje se využívá proud vzduchu s nainstalovaným ventilátorem s PWM regulací, který je implementován od výrobce. Ve většině počítačových sestav, bývá umístěn ve spodní části, aby ventilátor nasával chladný vzduch ze spodní strany [7].



Obrázek 6. Napájecí zdroj Corsair CX750F – foto autora

1.7 Peltierův článek

Konstrukčně se skládají z množství dvojic, které jsou tvořeny polovodičovými elementy typu 'p' a 'n'. Dvojice jsou spojeny do elektricky sériového zapojení, a to v závislosti na tepelném toku a jsou umístěny paralelně mezi dvěma keramickými deskami. Využití desek slouží k zajištění elektrické izolace od okolí a zároveň poskytují článku potřebnou pevnost. V závislosti na způsobu využití lze termoelektrické články rozdělit na chladicí články a generátorové články. Peltierova jevu využívají chladicí články, zatímco pro výrobu elektrické energie se využívá Seebeckova jevu. Při průchodu tepelného toku vzniká na vodičích napětí, aby článek generoval malý elektrický výkon musí být připojen k zátěži. V závislosti na počtu termoelektrických dvojic, jejich provedení, vlastnostech materiálu a na vlastnostech přechodových odporů je ovlivněn produkovaný výkon jednoho článku. Na teplotním rozdílu a na výkonnosti použitého materiálu je závislá účinnost zařízení. Články, které využívají Peltierův jev jsou využívány v přenosných chladicích zařízeních, v avionice a pro teplotní stabilizaci polovodičových součástek. [22]



Obrázek 7. Peltierův článek [22]

2 HLAVNÍ ZPŮSOBY CHLAZENÍ KOMPONENTŮ

K chlazení počítačů a jejich komponent používáme v dnešní době čtyři různé varianty. S narůstajícím pracovním výkonem roste paralelně teplotní výkon součástek, proto je zapotřebí pro jejich optimální chlazení zvolit nejvhodnější způsob chlazení, aby se docílilo maximálního možného výkonu daného počítače.

Varianty chlazení jsou:

- 1) Pasivní chladič
- 2) Aktivní chlazení
- 3) All in one – uzavřený vodní okruh
- 4) Vodní okruh na míru

2.1 Pasivní chladič

Pasivní chlazení je kovová nepohyblivá součástka, která má pro zlepšení funkčnosti navržena kovová žebra pro zvětšení plochy, aby došlo k lepšímu rozptýlení tepla do okolí. Pasivní chladiče jsou vyrobeny z hliníku a z mědi [9]. Na druhou stranu se více rozšiřují měděné chladiče, protože mají lepší vlastnost v podobě tepelné vodivosti. Žebra z mědi mohou mít menší tloušťku než ta hliníková a zároveň jsou tužší. Výhoda pasivního chlazení je v nehučném projevu, díky své jednoduché konstrukci je zcela bezhlučné. Velice často jsou aplikovány na procesory a grafické karty pro ochlazování pracovního čipu. Další aplikovatelné místo je na základové desce pro ochlazování čipsetu a napájecích kaskád [11].

2.2 Aktivní chlazení

Aktivní chlazení funguje na kombinaci pasivního chlazení s ventilátorem pro tvorbu proudění vzduchu. Ve výkonnějších verzích aktivních chladičů může být chladič sestaven s více ventilátory současně. Základní princip aktivního chlazení je, aby se v počítačové skříni vytvořily takzvané „tunely“. V principu chceme dosáhnout lepšího proudění vzduchu uvnitř počítačové skříni. Na přední části skříni je nasávací ventilátor, který nasává chladný vzduch. Vzduch proudí do skříni, kde dochází k jeho ohřevu od komponent a následně na zadní straně skříni je aktivní ventilátor, který odvětrává teplý vzduch pryč ze skříni. Další možností využití tohoto kombinovaného chlazení proudění vzduchu a měděného nebo hliníkového těla, kdy vstřebává teplo z komponentu je chladič procesoru. Funkčnost je

jednoduchá – ventilátor nasává studený vzduch, který proudí přes žebra. Během procesu by se měl odvést teplý vzduch a ochladit žebra pasivního chladiče, která můžou dále přijímat teplo ze zatěžovaného komponentu [9].

Aktivní chlazení se může rozlišovat kvalitou pasivního chladiče. Kvalitnější chladiče používají měděné tělo, které přijímá teplo a žebra výměníku budou z hliníku, na kterých dochází za pomoci proudícího vzduchu k ochlazení. Ventilátory na chladicích počítačových skříních mají různé rozměry.

Základní rozměr je 50 mm a maximální rozměry jsou 120 mm. Ventilátory se mohou točit ve škále od 550 do 4000 otáček za minutu. Zatímco v dnešní době jsou preferovány nízko otáčkové ventilátory, které pracují od 700 do 1500 otáček za minutu. Aktivní chlazení se často používá pro chlazení procesů, grafických karet anebo zdrojů případně dalších komponentů, které mohou být chlazeny proudem vzduchu [11].

2.3 AIO chladicí okruh (All in one)

All in one chlazení označuje uzavřený okruh vodního chlazení. Chladicí okruh je hotový od výrobce, který se pouze nainstaluje na uzpůsobené místo ve skříně, následně dle typu chladiče se nainstaluje na procesor nebo grafickou kartu a poté se za pomoci pinového konektoru regulace zapojí na určené místo na základní desce. Hlavními výrobci kombinovaných chladičů jsou: Zalman, Thermaltake, PrimeCooler a Nexus. Vodní chlazení se skládá z uzavřené soustavy, ve které proudí chladicí kapalina, kterou tvoří destilovaná voda [9].

Výhoda AIO chlazení je, že má výborný tichý chod. Oddělené čerpadlo zpětného toku zajišťuje vynikající chladicí účinnost, zároveň s tichým chodem a minimálním počtem vibrací. Podrobnější popis pracovního principu AIO chlazení je následující: pracovní princip AIO je v čerpadle, které čerpá kapalinu přes základnu z vnější strany celého bloku pumpy a vypouští ohřátou kapalinu přes druhou vnitřní úroveň. Pro tišší chod ventilátoru se používá regulaci přes PWM konektor, který zajišťuje optimální chod pumpy a tichým chodem ventilátorů. Ventilátory jsou připevněny na měděný výměník, kterým proudí voda. Díky ventilátorům, které nasávají vzduch z počítačové skříně a odvádí ho ven ze skříně tím se zároveň ochladí proudící kapalina uvnitř výměníku.

Chladicí hlavice, která je upevněná na procesoru nebo grafické kartě má mezi svým povrchem a povrchem čipu daného komponentu použitou teplo vodivou pastu, pro lepší přenos tepla a celkové účinnosti chlazení [11].

2.4 Vodní okruh na míru

Vodní okruh na míru se skládá z několika částí, které musí splňovat jednotnou komptabilitu. Chladicí bloky na CPU a GPU se rozlišují v závislosti na typu procesoru a jeho uchycení, to samé platí pro grafické karty, nelze mít jeden totožný blok na všechny druhy procesorů a grafických karet. To samé platí pro spojovací části, které mohou mít různé průměry.

2.4.1 Vodní blok CPU a GPU

Vodní blok se instaluje na pracovní čip, který chceme chladit. Každý chladicí blok, který instalujeme na procesor, grafickou kartu a základní desku se přímo dotýká přes vrstvu teplo vodivé pasty, která je nanesena na pracovním „čipu“. Aplikace teplo vodivé pasty je z důvodu eliminace výrobních nepřesností a zároveň odvádí teplo od pracovního čipu.

Dnešní moderní vodní bloky plní dva důležité parametry: výkonnost bloku a restriktivitu bloku. Výkonnost bloku udává množství tepla, které zvládne blok odebrat a restriktivita bloku udává ztrátu kapaliny před a za vodním blokem. Nejpoužívanější materiál, z kterého vodní bloky jsou vyráběny je měď. Hlavním důvodem je výborná tepelná vodivost [9].



Obrázek 8. Vodní blok na procesor – foto autora

Vodní blok pro grafickou kartu se vybere přímo na konkrétní model grafické karty. U chlazení grafických karet ochlazujeme samotný čip grafické karty, paměťové čipy a regulátory napájecích kaskád [9].

Nevýhoda plnohodnotného vodního bloku pro konkrétní model grafické karty je eliminace možnosti snadné výměny grafické karty, jak je tomu u grafických karet s aktivním chlazením. V dnešní době se prodává velice málo grafických karet s vodním blokem nainstalovaným z výroby, proto jsou na trhu prodejci, kteří se specializují výrobou těchto vodních bloků. Jakmile se nainstaluje vodní blok na grafickou kartu, tak dochází k odstranění továrního chladiče [11].



Obrázek 9. Grafická karta s plnohodnotným vodním blokem – foto autora

2.4.2 Vodní pumpa

Vodní pumpa je hlavním a jediným aktivním prvkem v okruhu vodního chlazení na míru. Vodní pumpa zajišťuje proudění chladicí kapaliny v okruhu, proto je nezbytnou součástí vodního okruhu. Vodní pumpa se skládá pouze ze tří součástí. První součástí je motor, který roztáčí jednoduchou vrtuli nebo v jiných případech malou turbínu [9]. Rotující turbína nabírá vodu ze svého středu a odstředivou silou ji vytlačuje ven. Turbína je umístěna ve spirální skříni, která usměrňuje proudění kapaliny ven do okruhu. Regulace probíhá přes přepínač, který se nachází na těle pumpy, tento způsob regulace ovlivňuje výkon tlaku pumpy. Druhým způsobem regulace je integrovaný přepínač. Integrovaný

přepínač připojíme za pomoci 4 pinového konektoru na základní desku a pomocí PWM regulace pumpa reguluje dávkování z teplotní námahy [11].

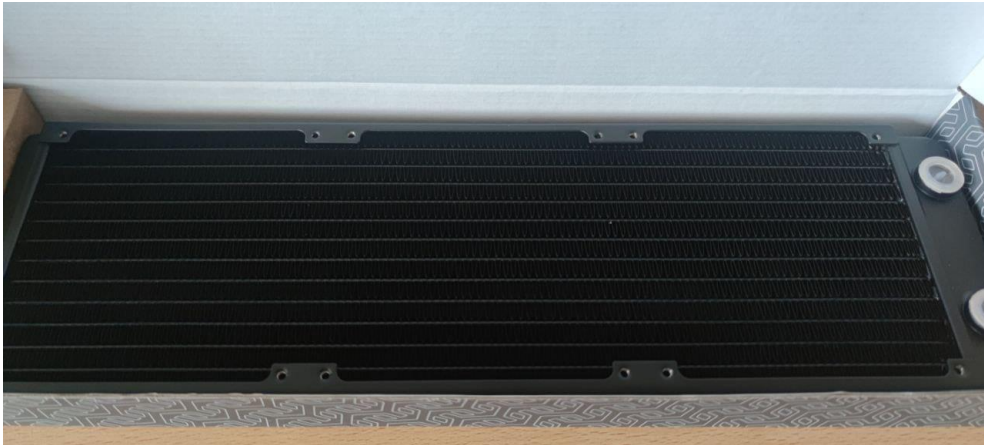


Obrázek 10. Vodní pumpa s výměníkem kapaliny – foto autora

2.4.3 Výměník

Hlavním úkolem radiátoru je vyzařovat teplo z kapaliny, která jím prochází. Kapalina prochází radiátorem skrze trubičky. Pro zvětšení vyzařovací plochy je použito velké množství lamel. Lamely jsou ohnutý tenký plech, který je následně přivařen k vodním trubicím. Hlavním materiálem na vodní trubice se používá měď a hliník, v případě lamel se využívá měď [11].

Samotný radiátor volíme podle požadavků potřebné chladicí kapaliny. Velikost radiátoru je určena počtem ventilátorů, které na radiátor upevníme. Posléze se udává tloušťka radiátoru, která hraje velkou roli při výběru. Širší radiátor má více vyzařovací plochy což má pozitivní výsledek ve formě lepšího chlazení [9].



Obrázek 11. Výměník – foto autora

2.4.4 Hadice a trubice

K propojení jednotlivých chladících částí slouží hadice nebo trubice. Vedením proudí chladící kapalina, k volbě, kterého typu vedení se přistupuje podle jednotlivých specifikací.[11]. Flexibilní hadice jsou jednodušší na montáž i demontáž. Při druhé volbě tvrdých trubic je manipulace ztížena, protože pro ohnutí trubice musíme použít horkovzdušnou pistoli, kterou nahřejeme trubici a posléze ji ohneme do potřebného tvaru [9]. Hadice dělíme podle jejich průměrů, a to za pomoci vnitřního a vnějšího průměru. Vnitřní průměr nám udává skutečný průměr kanálu pro protékání kapaliny. Vnější průměr nám udává, kolik hadice zabere fyzického prostoru. Nejčastěji používané hadice jsou s vnitřním průměrem mezi 8 až 13 milimetry [11].



Obrázek 12. Tvrdé trubice [20]

2.4.5 Fitinky

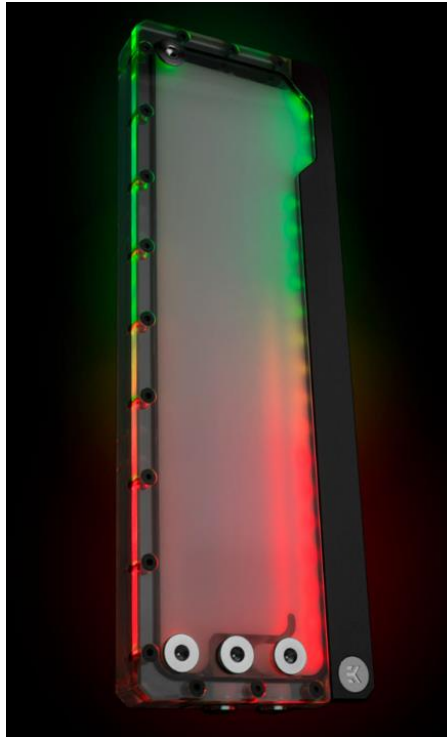
Fitinka slouží k připojení vedení k jednotlivým komponentům. Ty se do jednotlivých komponentů zašroubují a těsnící kroužek, který je na fitince slouží k těsnosti. Fitinky se liší podle velikosti, typu anebo typu podporovaného druhu hadice/trubice. Fitinku volíme podle zvoleného typu hadice/trubice a jejího průměru. Fitinka na hadici neboli nástrčná fitinka se přetáhne přes hrdlo a poté se zajistí pomocí svorky to samé platí pro spojovací fitinku trubcovou. Kromě běžných fitinek, které jsou uvedené výše, tak používáme fitinky úhlové pro dosažení určitého úhlu, fitinky prodlužovací, fitinky spojovací, záslepkové fitinky a fitinky pro rychlé odpojení [11].



Obrázek 13. Fitinka pro hadici [8]

2.4.6 Expanzní výměník tepla

Výměník kapaliny slouží k zajištění dostatku kapaliny ve vodním okruhu. Tato nádoba slouží jako zásobník chladicí kapaliny. Nádoby se liší kapacitou, počtem vývodu a jejich provedením. Expanzní nádoby mohou být samostatně umístěny v okruhu nebo kombinované s vodní pumpou [11].



Obrázek 14. Výměník s vodní pumpou [36]

2.4.7 Ventilátory

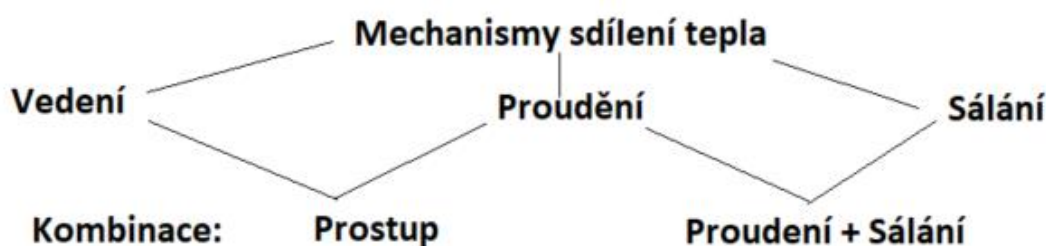
Ventilátory slouží k přesunu vzduchu za jednotku času. Tento parametr udává průchod vzduchu kolem jednotlivých lamel čímž ovlivňuje chladicí výkon. Pro ochlazování vodního okruhu se nejčastěji používají ventilátory o rozměrech 120 x 120 x 25 mm, popřípadě 140 x 140 x 25 mm. Menší ventilátory by byly příliš hlučné a neměly by dostatečný statický tlak. Posledním parametrem pro ventilátor je hlučnost. Toto neovlivňuje nijak funkčnost, ale pouze snižuje hlučnost celé chladicí soustavy [11].



Obrázek 15. Ventilátor [19]

3 SDÍLENÍ TEPLA

Součástky, které jsou popsány v předchozí kapitole se zahřívají a jsou zdrojem tepla, což je druh energie. Velmi důležité je intenzivně řešit transport tepla, protože nadměrným tepelným zatížením může dojít k poškození a omezení výkonu jednotlivých komponentů. Transport tepla je různý, z těchto důvodů je potřeba pro každou součástku udělat jednotlivé výpočty tepelných ztrát. Mechanismy sdílení tepla jsou základní tři: vedení, proudění a sálání, a jejich kombinací se vytváří prostup a proudění + sálání.



Obrázek 16. Mechanismy sdílení tepla [6]

Tepelný stav látky je stanoven její tepelnou energií. Ta se projevuje pohybem molekul. Molekuly u kapalných a tuhých látek provádějí rozdílné velikosti kmitu: větší nebo menší. To, jaké kmity provádějí závisí na vnitřní energii částic. Molekuly u tuhých látek kmitají kolem specifikované polohy a jsou dány strukturou pevné látky. Plynné a kapalné molekuly nejsou během svého pohybu vázány žádnou pevnou strukturou, tím dochází k pohybu ve vysokých rychlostech.

V závislosti na teplotě je řada důležitých fyzikálních vlastností.

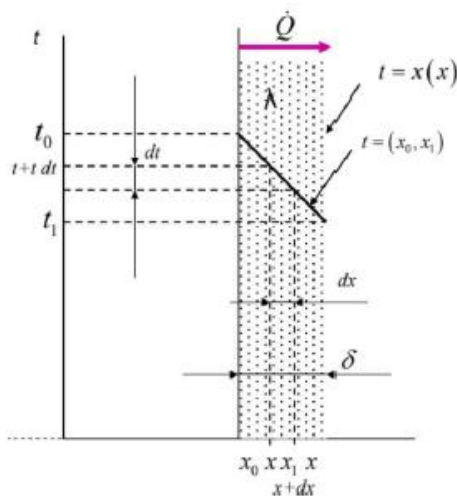
- Objem daného tělesa
- Skupenství látek. Kapalné a plynné stavy mají rozdílné tepelné vlastnosti z pravidla vyšší, než pokud jsou látky v tuhém stavu.
- Různé materiálové konstanty např: elektrický odpor, rychlost šíření zvuku a atd.

Teplo je základní veličina pro určení vnitřní pohybové energie látky. Pro vyjádření tepla dochází k jeho měření v Kelvinech [K] nebo ve stupních Celsia [°C]. Množstvím tepla je tepelná energie. Tento druh energie obsahuje každé těleso o vlastní hmotností m [kg] a

teplotě t [°C]. Z fyzikálního hlediska může být teplota záporná v opačném případě kladná. Závislost, o jakou teplotu se jedná je dána z vlastnosti, pokud $t > 0$ °C tepelná kapacita je kladná, v opačném případě při teplotě $t < 0$ °C tepelná kapacita je záporná. Základním způsobem přenosu tepla dochází z místa o vyšší teplotě do místa s nižší teplotou. Teplotní spád při průchodu tepelného toku z jedné části předmětu o teplotě t_1 do druhé části o teplotě t_2 . Při dopadu na druhé těleso této energie tzv. vlnění dochází k přeměně na teplo. Při šíření tepla sáláním není zapotřebí látkového prostředí a zároveň probíhá i ve vakuu [1].

3.1 Vedení tepla (konduktce)

Vedení neboli konduktce je molekulární sdílení tepla. Během vedení tepla dochází k předávání kinematické energie z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou. Výsledkem je tepelný tok, který vzniká z kmitajících částic. Kmitající částice předávají kinematickou energii mezi elektrony a molekulami v důsledku rozdílů teplot. Velikost tepelné vodivosti je určený rychlostí vedení tepla. Za pomoci součinitele tepelné vodivosti lze porovnat látky tepelné vodivosti [6].



Obrázek 17 Rozdělení teplot t v rámci desky [6]

Za určitý čas prochází teplo plochou, vzniká takzvaný tepelný tok, který je popsán Fourierovým zákonem. Na obrázku č.17 lze vidět, že na levé straně působí vyšší teplota, zatímco na pravé straně je teplota nižší. Pro samotný výpočet je zapotřebí znát teplotní rozdíly, součinitel teplotní vodivosti, teplosměnnou plochu a její šířku [7].

Vedení tepla v rovinné desce je vyjádřeno Fourierovým zákonem vedení tepla.

$$d\dot{Q} = -\lambda \frac{dt}{dx} dA \quad (1)$$

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \frac{t_0 - t_1}{\delta} Q \quad (2)$$

\dot{Q} – tepelný tok [W]

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

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

t_0 – teplota povrchu 0 [$^{\circ}C$]

t_1 – teplota povrchu 1 [$^{\circ}C$]

Základní tvar rovnic pro určení intenzity toku tepla

$$q = \frac{dQ}{dA} \quad (3)$$

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (4)$$

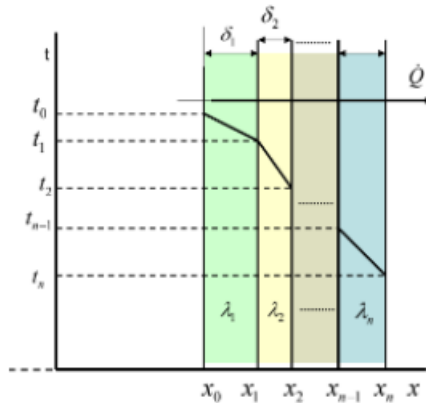
Výsledný tvar rovnice po integraci

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{t_0 - t_1}{\delta} A \quad (5)$$

[6]

3.2 Vedení tepla vícevrstvou stěnou

Princip vedení tepla vícevrstvou stěnou je podobný, jako u vedení tepla jednou vrstvou stěnou. U vedení tepla vícevrstvou stěnou prochází k vedení tepla z jedné strany postupně ostatními vrstvami. Během vedení se teplo postupně ve vrstvách vyrovnává, v závislosti na tepelných odporech, které určují míru odporu proti průniku tepla. Při větším odporu prochází teplo pomaleji. Pro budovy je zapotřebí, aby tento odpor byl co největší. Zatímco u chlazení počítačových komponentů je hlavní požadavek, aby tento odpor byl co nejmenší a teplo mohlo pronikat co nejlépe do výměníku tepla, kde dochází k jeho odvodu mimo pracovní stanici [7].



Obrázek 18. Rozložená teploty t deskou (5)

Vedení tepla přes jednotlivé vrstvy

$$\dot{Q} = \lambda_1 \cdot A \cdot \frac{t_0 - t_1}{\delta_1} \quad (6)$$

$$\dot{Q} = \lambda_2 \cdot A \cdot \frac{t_1 - t_2}{\delta_2} \quad (7)$$

$$\dot{Q} = \lambda_n \cdot A \cdot \frac{t_{n-1} - t_n}{\delta_n} \quad (8)$$

Vedení tepla vícevrstvou stěnou

$$\dot{Q} = A \cdot \frac{t_0 - t_n}{\sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j}} \quad (9)$$

\dot{Q} – tepelný tok [W]

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

δ_n – tloušťka stěn [$W \cdot m^{-2}$]

A – teplosměnná plocha [m^2]

t_{n-1} – teplota povrchu [$^{\circ}C$]

t_n – teplota okolí [$^{\circ}C$]

[5]

3.3 Přestup tepla

Jedná se o fyzikální jev, u kterého dochází mezi povrchem tuhé fáze a okolním prostředím, při rozdílných teplotách. Je celá řada případů pro sdílení tepla, proto je celkem komplikované určit součinitel přestupu tepla α . Při první možnosti dochází k přestupu tepla při volném proudění bez fázové přeměny. To je zapříčiněno pouze rozdílem teplot. U druhé možnosti

přestupu tepla dochází k takzvanému nucenému proudění bez fázové změny [7]. Volné proudění lze specifikovat, když dochází k pohybu tekutiny při rozdílu hustoty látky, vyvolaný různou teplotou. Na druhou stranu, pokud je pohyb zapříčiněn rozdílem tlaků vytvořený uměle (např: čerpadlo), tak hovoříme o nuceném proudění. Přestup tepla bez látkové přeměny, který rozděluje tekutiny a tepelný tok prochází určitou překážkou, tak lze kategorizovat jako postup tepla [33].

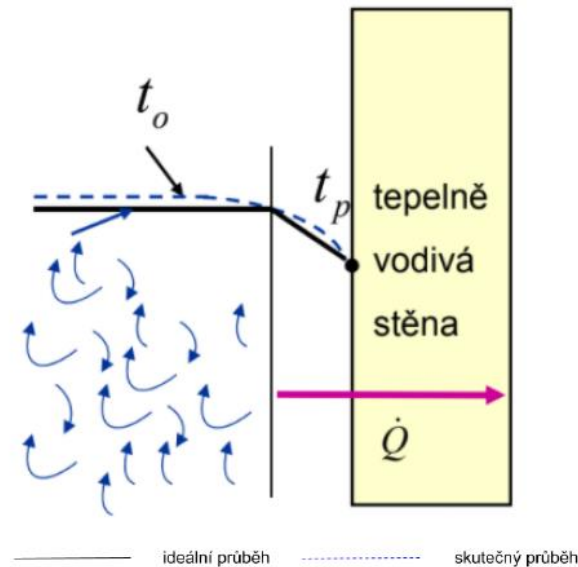
Newtonův ochlazovací zákon. V dané rovnici je nahrazený součinitel přestupu tepla, součinitelem prostupu tepla α [6].

$$\dot{Q} = \alpha(t_o - t_p)A \quad (10)$$

Sdílení tepla prouděním (konvekcí) je přestup tepla mezi povrchem tělesa a kapalinou nebo plynem, v závislosti na tom, jaké těleso v daný moment je tím obklopujícím. Nejčastěji dochází k proudění mezi tělesem a okolním vzduchem.

V případě ponoření tělesa do kapaliny, která má menší teplotu než těleso, dochází v okolí topného tělesa ke zředění hustoty částic kapaliny. Výsledkem je, že síly způsobené rozdílnými hustotami těchto těles způsobí pohyb částic z okolí teplého tělesa vzhůru. V opačném případě může dojít k přenosu tepla z teplejší kapaliny do chladnějšího tělesa s nižší teplotou. Tento jev se nazývá volná konvekce. Pro vyvolání nucené konvekce je zapotřebí vzduchový ventilátor nebo v kapalině čerpadlo.

U samovolného proudění dochází k pohybu chladicího media. Laminární a hraniční vrstva nemusí vždy být silná. Vrstva kapaliny je v důsledku sil nepohyblivá a přenos tepla v ní dochází vedením. Naopak při nucené konvekci dochází na proudění laminární, tak turbulentní se povrchová vrstva ztenčuje a v extrémních případech dojde k proudění turbulentnímu [1]. Typ proudění se určuje dle hodnoty Reynoldsova kritéria. $Re < 2300$ označuje laminární proudění, přechodná oblast $2300 \leq Re \leq 10^4$, $Re > 10^4$ značí turbulentní proudění [6].



Obrázek 19. Ukázka ideálního a skutečného teploty. [6]

Bezrozměrná kritéria se využívají k určení hodnoty přestupu tepla. Jedním z nich je Reynoldsovo kritérium Re , které dává souvislost mezi setrvační silou a viskozitou. Dalším využitím je určení turbulentního laminárního proudění tekutiny [6,7].

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\eta} \quad (23)$$

ν – kinematická viskozita

v – charakteristická rychlost proudění kapaliny

l – charakteristický rozměr, dynamická viskozita

Prandtlovo kritérium (Pr) znamená o jakou míru podobnosti se jedná mezi rychlostním a teplotním polem.

$$Pr_{\omega} = C_p \frac{\eta}{\lambda} \quad (24)$$

Grashofovo kritériem (Gr) se vyjadřuje podobnost mezi vztlačovými a třecími silami při volném proudění. Volné proudění vzniká za rozdílných hustot tekutiny vyvolané rozdílem teplot.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3}{\nu^2} \Delta t \quad (25)$$

g – gravitační zrychlení

β – teplotní součinitel objemové roztažnosti

Nusseltovo kritérium (Nu) znázorňuje poměr konvektivního a konduktivního tepelného přenosu na uvažované hranici tekutiny. Na vnějším povrchu tekutiny dochází ke stanovení oblasti přenosu tepla.

$$Nu = C(GrPr)^n \quad (26)$$

Pro nucenou konvekci:

Laminární proudění s $Re = 2,3 \cdot 10^3$

$$Nu = 0,17Re^{0,33}Pr^{0,43}Gr^{0,1}\left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,25} \quad (27)$$

Turbulentní a přechodová oblast ($2,3 \cdot 10^3 Re < 10^6$)

$$Nu = 0,116\left(Re^{\frac{2}{3}} - 125\right) - Pr^{1/3} \left[1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{2/3}\right] \left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0,25} \quad (28)$$

Turbulentní proudění $Re > 10^4$

$$Nu = 0,23Re^{0,8}Pr^{0,4} \quad (29)$$

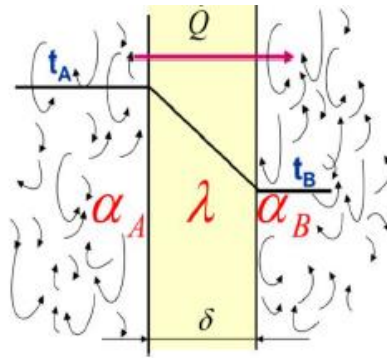
Součinitel přestupu tepla z Nusseltova kritéria:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{l} \quad (30)$$

[6]

3.4 Prostup tepla

Je to kombinace dvou způsobů přechodu tepla, a to vedení a prouděná tepla. K předávání tepla dochází mezi dvěma tekutinami: tekutina t_A a t_B , které prostupují přes pevnou přepážku. Důležitým poznatkem je fakt, že nedochází k mísení tekutin. Na rozhraní pevné látky a kapalin dochází k tvorbě mezní vrstvy, ve které dochází ke změně teploty [6].



Obrázek 20. Prostup tepla mezi tekutinami A a B [6]

Tepelný tok prostupem [34].

$$\dot{Q} = k(t_A - t_B)A \quad (11)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_A} + \sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B} \quad (12)$$

Prostup tepla pro trubkovou stěnu.

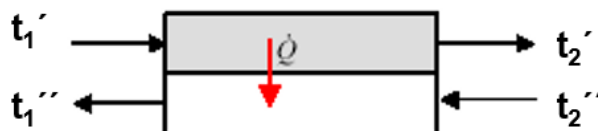
$$\dot{Q} = k_L(t_A - t_B)L \quad (13)$$

$$\frac{\pi}{K_L} = \frac{1}{\alpha_A d_A} + \sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j} \frac{\ln \frac{d_{j+1}}{d_j}}{2\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B d_B} \quad (14)$$

Jeden z cílů této práce je zkoumání prostupu tepla z chladicího bloku do chladicí kapaliny, která jím prochází a je oddělena stěnami vodních bloků na dvou hlavních částí, které vytváří teplo. Rozdíl teploty u výměníku níže uvedených rovnic reprezentují výpočet průměrných teplotních hodnot [5].

$$\Delta t_1 = (t'_1 - t''_1) \quad (15)$$

$$\Delta t_2 = (t'_2 - t''_2) \quad (16)$$



Obrázek 21. Schéma protiproudého výměníku [6]

Tekutina:

t' – teplejší tekutina, t'' – chladnější tekutina

$$\Delta t_{1s} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (17)$$

Prostup tepla deskou \dot{Q} udává tepelný tok výměníku. Symboly t_A a t_B se vyjadřuje entalpie tekutiny, k určuje hmotnostní tok [33].

$$\dot{Q} = m' p'_p (t'_1 - t'_2) \quad (18)$$

$$\dot{Q} = m'' p''_p (t''_1 - t''_2) \quad (19)$$

Udávaná rovnice (20) je Newtonův ochlazovací zákon po úpravě. Během úpravy se nahradil součinitel přestupu tepla součinitelem prostupu tepla k a místo teplotní difference ΔT je využit střední logaritmický spád teplot Δt_{1s} . [33]

$$\dot{Q} = k A \Delta t_{1s} = V' \rho' c'_p (t'_1 - t'_2) \quad (20)$$

$$A = \frac{V' \rho' c'_p (t'_1 - t'_2)}{k \Delta t_{1s}} \quad (21)$$

$$\dot{Q} = k A \Delta t_{1s} \quad (22)$$

k – součinitel prostupu tepla

Intenzita přenosu tepla prostředím při prostupu rovinnou deskou

$$k = \frac{l}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{n=1}^i \frac{\delta n}{\lambda n} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (31)$$

Intenzita přenosu tepla prostředím postupu tepla u válcové desky

$$k = \frac{l}{\frac{1}{\alpha_1 r_1} + \sum_{n=1}^i \left(\frac{r_{n+1}}{r_n} \right) + \frac{1}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2 r_{n+1}}} \quad (32)$$

Intenzita tepelného toku

$$q = k \Delta t \quad (33)$$

[6]

3.5 Sálání (radiace)

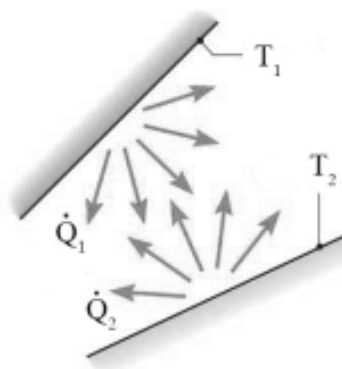
Přenos tepla sáláním neboli zářením je energie předávána tepelným zářením v celé oblasti vlnových délek. Z toho plyne, že intenzita závisí na teplotě tělesa z čehož plyne přeměna na teplo z energie vlnění při jejím dopadu na těleso. Při sdílení tepla sáláním se rozlišují dvě

specifikace, teplo se šíří všemi směry a šíření tepla není vázáno na hmotu. V praxi je tento jev např.: sluneční záření. Při dopadu tepelného záření mohou nastat následující tři jevy [34].

Částečné propouštění tepelného záření v závislosti na druhu látky a na tepelné propustnosti daného tělesa a na vlnové délce tepelného záření.

Dojde k částečnému odražení tepelného záření. Odražení závisí na druhu látky, ze kterého je dané těleso vyrobeno a zároveň na struktuře povrchu a vlnové délce tepelného záření. Dokonale černé těleso je ideální zářič, pro který platí maximální vysílající energie všech vlnových délek a všech směrech do poloprostoru s absorbujícím na něj dopadajícím zářením.

V posledním kroku dojde k pohlcení tepelného záření. Tento jev je v závislosti na barvě tělesa a jeho povrchu [33].



Obrázek 22. Těleso a jeho sálavost (33)

Stefan-Boltzmannův zákon stanovuje maximální možnou hodnotu energie vyzáření.

$$E_0 = \sigma T^4 \quad (34)$$

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta $5,67037 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

[33]

3.6 Kombinace proudění a sálání

Proudění tepla bývá velice často spojeno s šířením tepla vedením. Pro přenos tepla zářením je charakterizující vysílání záření s jeho následným pohlcováním. Výsledkem je zvýšená energie v látce, která pohlcuje záření. Rozhodujícím prvkem během tohoto záření je povrch. Jedna z věcí, na které záleží je, z jakého materiálu je povrch vyroben a jakou má barvu [7].

Rovnice pro tzv. černé těleso, čímž se myslí ideální zářič je charakterizována podle vztahu

$$\dot{Q} = E = \varepsilon_r \sigma T_w^4 \quad (34)$$

ε_r – poměrná zářivost, která nabývá hodnot 0 a 1. Udávání vyzařovací intenzity oproti absolutně černému tělesu.

T_o – teplota jiného tělesa

Určení výměny tepla mezi tělesy, zatímco určení vyzařované energie je snadné není tomu tak u energie, kterou si vyměňují více těles mezi sebou. U tohoto určení nastávají jistá ovlivnění, může docházet k odražení energie, absorpci energie nebo část energie může projít skrz sebe. Proto výsledný vztah je charakterizován viz níže.

Výpočet výměny tepla mezi dvěma černými povrchy sáláním

$$E = \varphi_{1-2} S \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (36)$$

[33]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 KONSTRUKCE POČÍTAČOVÉ SESTAVY

Při navrhování chladicího okruhu pro počítačovou sestavu jsem vycházel z co možná nejvhodnějších konstrukčních vlastností. Snaha byla, aby sestava měla co nejlepší chladicí účinek i za případné vyšší náklady na jednotlivé části chladicího okruhu. Základní částí počítače tvoří počítačová skříň Lian-Li. Tu jsem zvolil po velice důkladném zkoumání možností na trhu. Dalším důležitým prvkem je samotná základní deska. V prvním kroku bylo zapotřebí, aby deska měla integrované připojení pro regulaci vodní pumpy přes BIOS. To umožňuje, aby si pumpa regulovala za pomoci PWM regulace svůj dávkovací výkon, toho lze dosáhnout za pomoci integrovaného 4 pinu na základní desce „pump-pin“. Základní deska je osazena procesor od společnosti Intel. Modelové označení procesoru Intel Core i5 12600 KF s maximálním teplotním výkonem 150 W. Procesor spolupracuje s operačními paměťmi od Gigabyte Aorus RGB 16 GB na pracovní frekvenci 3733MHz a uložištěm pro operační systém s podpůrnými aplikacemi se stará SSD disk o velikosti 250 GB od výrobce Kingston KC2500. Všechny tyto základní komponenty jsou napájeny na modulární zdroj od společnosti Corsair CX750F, který má příkon 750 W. V navrhované sestavě byla využita grafická karta od společnosti MSI GeForce GTX 1070 SEA HAWK EK X. Výhodou této grafické karty je již nainstalován vodní blok z výroby od společnosti EKWB.

	Hardware
Skříň:	Lian-li PC-O11 Dynamic Black
Základní deska:	MSI MAG Z690 Tomahawk WIFI DDR4
Procesor:	Intel Core i5-12600KF
Grafická karta:	MSI GTX 1070 SEA HAWK EK X 8G
Pevný disk – systém:	Kingston KC2500 250 GB M.2 2280
Operační paměť:	GIGABYTE AORUS RGB 16 GB 2x8GB 3733MHZ
Zdroj:	Corsair CX750F 80 Plus Bronze
Operační systém:	Windows 10

Tabulka 1. Hardware testované sestavy



Obrázek 23. Dokumentace vybraných komponentů – foto autora

4.1 Počítačová skříň

Hlavním kritériem byla snaha o splnění co nejvhodnějších podmínek pro instalaci vodního okruhu a jeho otestování v závislosti na estetickém vzhledu.



Obrázek 24. Lian Li PC-O11 Dynamick Black – foto autora

4.2 Základní deska

Základní deska byla zvolena od firmy MSI. Formát základní desky je ATX, s nejnovějším socketem 1700 pro novou generaci procesorů Intel. Tato základní deska má podporu DDR4 operačních pamětí, kdy lze osadit dva DIMM sloty. Deska byla zvolená kvůli PWM regulaci pro vodní pumpu, kterou zajišťuje 4 PIN konektor „pump.fan“, aby si mohl BIOS regulovat intenzitu jakou bude protékat okruhem množství vody. Vzhledem k tomu, že se jedná o nejmodernější základní desku, tak je již implementován WIFI modul pro snadné připojení k bezdrátové síti.



Obrázek 25. MSI MAG Z690 TOMAHAWK WIFI DDR4 – foto autora

Msi MAG z690 Tomahawk WIFI DDR4	
Formát:	ATX
Socket:	1700
Chipset:	Z690
Podporovaná RAM:	DDR4
Maximální velikost RAM:	128 GB
Pracovní frekvence:	2133-5200 MHZ
DIMM sloty:	4
Typ SATA:	SATA 3 6Gb/s
Slot pro grafickou kartu:	3
WIFI&Bluetooth:	Intel WI-FI 6 module
Audio:	Realtek ALC4080 Codec

Tabulka 2. Interní specifikace základná desky [28]

4.3 Processor

Zvolený procesor byl vybrán jako kompromis s nejvyšší možným TDP. Model Intel Core i5-12600KF má ve svém segmentu nejvyšší TDP. Byl zvolen kvůli teplotám, aby bylo vidět, zda chlazení bude efektivní a v jakém rozsahu. Procesor má pracovní frekvenci 3700 MHz a v turbo režimu dosahuje až 4900 MHz. Je založen na architektuře Alder Lake a vyráběn technologií 10nm. Díky nejmodernější technologii využívá Hyperthreading, což znamená 10 fyzických jader s 16 vlákny. Vybraný procesor nedisponuje integrovaným grafickým čipem. Procesor spolupracuje s vylepšenými operačními paměťmi a může být zkompletován s RAM paměťmi o maximální pracovní frekvenci 4800 MHz. Závěrem tepelný výkon testovaného procesoru je udáván výrobcem 150 W.



Obrázek 26. Intel core i5-12600KF – foto autora

Intel Core i-5 12600 KF	
Počet fyzických jader:	10
Počet vláken:	16
Velikost L3 cache:	20 MB
Pracovní frekvence:	3700 GHz
Výrobní proces:	10 nm
Architektura:	Alder Lake
Socket:	1700
TDP:	150 W
Grafické jádro:	není

Tabulka 3. Interní specifikace [14]

4.4 Grafická karta

Mnou využívaný model je MSI GeForce GTX 1070 SEA HAWK EK X. Vybraný model disponuje nainstalovaným vodním blokem pro chlazení grafického čipu a pracovních pamětí. Samotný přední blok je skládán z měděného poniklovaného základu v kombinaci se zadní kovovou deskou. U takto chlazené grafické karty je výrobcem udáváno 150 W TPD. Základní pracovní frekvence v běžném modu je 1607 MHz, na druhou stranu v plné zátěži může pracovní frekvence stoupnout ke 1797 MHz. Grafická karta je osazena 8Gb pracovních pamětí, které pracují na frekvenci 8108 Hz.



Obrázek 27. MSI GeForce GTX 1070 SEA HAWK EK X – foto autora

Msi GeForce GTX 1070 SEA HAWK EK X	
Architektura:	Pascal
Výrobní proces:	16nm
Rychlost grafického čipu:	1797 MHz
Velikost grafické paměti:	8192 MB
Počet stream procesů:	1920
Standart sběrnice:	PCI-Express 3.0
Šířka sběrnice:	256 bit
Propustnost pamětí:	256 GB/s
TDP:	150 W
Napájení:	500 W

Tabulka 4. Specifikace [23,29]

4.5 Pevný disk – systém

V dnešní době se primárně využívá nejnovější a nejrychlejší M.2 disky. Výsledkem je rychlé načítání operačního systému a systémových podprogramů. SSD disk je od firmy Kingston, jméno konkrétního modelu KC2500 250 GB M.2 2280. Vysoký výkon vybraného disku je díky použití nejnovějšího řadiče Gen 3.0 x 4 a 96 vrstvé 3 D TLC NAND. Rychlost čtení a zápisu je udávána na hodnotách až 3500/2900 MB/s.



Obrázek 28. Kingston KC 2500 250 GB - foto autora

4.6 Operační paměť

Operační paměť testovaného počítače tvoří 2x8GB s pracovní frekvencí 3733 MHz. Paměti byli vybrány od společnosti GIGABYTE kvůli RGB prvku pro lepší vizuální efekt testovací sestavy. Časování paměti je CL 19 a pracují s napětím 1,2 V.

4.7 Zdroj

O napájecí výkon celé sestavy se stará zdroj od společnosti Corsair. Zvolený zdroj splňuje specifikaci 80 plus bronz a poskytovaný výkon pro celou sestavu má hodnotu 750 W. Zvolil jsem zdroj od společnosti Corsair z důvodu napájení celé soustavy napětím. Na kvalitnější zdroj je samozřejmě větší spolehlivost, čímž se minimalizují případné poruchy s dodávkou napětí.



Obrázek 29. Corsair CX750F 80 Plus bronze [27]

4.8 Vzduchové chlazení

Pro porovnání, jak je chlazení účinné bude probíhat s teplotami procesoru. Za tímto účelem jsou je vypočítán tepelný tok chladiče pro předávání tepla vedením a přestupem. Jedná se o běžně dostupný chladič, který má automatickou regulaci otáček na sobě připevněného ventilátoru. nainstalován klasický chladič ARCTIC Alpine 17.



Obrázek 30. Běžně dostupné chlazení [30]

Arctic Alpine 17	
Chlazení:	vzduchem
Kompabilita:	Intel 1700
Rozměr ventilátoru:	92 mm
Minimální rychlost:	100 RPM
Maximální rychlost:	2000 RPM
Napájení:	12 V
Regulace otáček:	4 - pin PWM

Tabulka 5. Technická specifikace pro vzduchový chladič. [30]

5 NÁVRH VODNÍHO OKRUHU

Pro návrh vodního okruhu byla zvolena počítačová skříň viz. obrázek 26. Zvolená skříň splňovala dispozice pro výslednou realizaci vodního okruhu.

Vizuálním návrhem vodního okruhu jsem se inspiroval na internetu a výběr vybraných součástí jsem uzpůsobil podle specifikací vodních bloků CPU a GPU. Nechal jsem se inspirovat současným trendem herních počítačových sestav, které již mají tento typ chlazení, který využívám při své realizaci.

5.1 Vodní blok CPU a GPU

Jako první na chlazení přichází dva stavební prvky v chladicím okruhu. Prvním je grafická karta a druhým samotný procesor. Pro oba tepelné zdroje byly zvoleny vodní bloky, které splňují instalační nároky a komptabilitu. Pro usnadnění byla zvolena grafická karta s předem nainstalovaným vodním blokem viz obrázek 29 a pro procesor byl využit vodní blok, který je kompatibilní se soketem základové desky Intel 1700.



Obrázek 31. Vnitřní pohled na chladicí blok pro procesor – foto autora

5.2 Vodní pumpa s výměníkem

Pro snadnou realizaci a dostatečně velkou kapacitou výměníku na chladicí kapalinu jsem zvolil kvalitní vodní pumpu s výměníkem od společnosti EKWB. Expanzní nádoba má obdélníkový tvar a samotná pumpa je umístěna ve spodní části. Díky vhodnému umístění výstupního otvoru šlo následně zkonstruovat i vypouštěcí ventil pro celý vodní okruh.



Obrázek 32. EK-Quantum Kinetic FLT 360 D5 PWM D-RGB-Plexi - foto autora

EK-Quantum Kinetic FLT 360 D5 PWM D-RGB – Plexi	
Kapacita:	435 ml
Maximální vedení:	3.9 m
Spotřeba:	23 W
Maximální průtok:	1500L/h
Maximální teplota systému:	60 °C
Připojovací konektory:	Sata napájecí a PWN konektor

Tabulka 6. Popis vodní pumpy [31]

5.3 Výměník tepla

Pro zvolení správného výměníku tepla bylo zapotřebí zjistit vhodnou pozici umístění. Výměník tepla je umístěn na horní část počítačové skříně. Proto byla zvolena varianta výměníku, na který lze nainstalovat 3x ventilátory o průměru 120 mm.



Obrázek 33. Výměník tepla – foto autora

EK-CoolStream Classic SE 360	
Délka:	393 mm
Šířka:	120 mm
Výška:	27 mm
Kapacita:	155 ml
Typ závitů:	G 1/4
FPI:	16

Tabulka 7. Parametry výměníku – [32]

5.4 Trubice, fitinky, chladicí kapalina, vizuální průtokoměr

Pro stavbu chladicího okruhu jsem zvolil tvrzené trubice z akrylu. Samotná instalace je složitější, ale díky tvrdosti trubic je celý okruh stabilní a nehrozí, že by někudy unikala chladicí kapalina. Trubky mají vnitřní průměr 10 mm a venkovní 13 mm.

Fitinky během realizace byly využity dva typy. První jsou jednoduché spojovací a druhé byly spojovací s 90 °C otočením. Všechny vybrané fitinky mají šroubovací uzávěr G1/4.

V poslední etapě následně byla vybrána chladicí kapalina s červenou barvou, aby bylo dosaženo vhodného estetického vzhledu.

Pro vizuální ověření funkčnosti proudění byl zvolen vizuální průtokoměr, který zobrazuje za pomoci vrtulky zda okruhem proudí kapalina.



Obrázek 34. Fitinky, spojovací fitinky, vrtulový průtokoměr a ventil – foto autora

5.5 Ventilátor

Při volbě ventilátoru jsem hleděl na hlučnost, průtok vzduchem a RGB podsvícení. Pro jednodušší instalaci na výměník jsem zvolil ventilátory od výrobce LIAN-LI od které je i samotná skříň.



Obrázek 35. LIAN-LI ST 120 Triple black – foto autora

LIAN-LI ST 120 Triple Black Galahad	
Typ ložiska:	Fuild Dynamic Bearing
Podsvícení:	RGB
Hmotnost:	800 g
Maximální rychlost:	800 RPM
Minimální rychlost:	1900 RPM
Maximální hlučnost:	32 dB
Průtok vzduchu:	114.12 m3/h
Pracovní napětí:	12 V
Napájecí konektor:	4 pin PWM

Tabulka 8. Specifikace [35]

5.6 Digitální průtokoměr

Digitální průtokoměr byl zvolen z důvodu okamžitých zpětných hodnot, které jsou vyhodnoceny ze zahřáté kapaliny na aktuálním zatížení zahřívacích částí např: procesor a grafická karta.



Obrázek 36. Digitální průtokoměr [37]

5.7 Seznam použitých částí vodního okruhu

V tabulce je popsán seznam využitých součástí vodního okruhu s jejich počtem kusů.

Název	Vlastnosti	počet kusů
Vodní nádoba s pumpou	PWM regulace, 360ml	1
vodní blok na procesor	Acetal	1
vodní blok grafická karta	nikl	1
Radiátor	400 mm	1
Fitinka pro trubice	13/10 mm nikl	12
Úhlová spojka	90° nikl	2
Úhlová fitinka	90° nikl	2
Splitter	3x vstup/výstup	1
Vypouštěcí ventil	nikl	1
Spojka G1/4	nikl 6 mm G1/4	1
Trubice	plexi čiré 600 mm	4
Digitální Průtokoměr	Polyacatel	1
Lian Li St 120 ventilátor set	Plast, RGB	1
Chladicí kapalina Red	destilovaná voda 1000ml	1
Vizuální průtokoměr	černý acetal a čiré plexisklo	1

Tabulka 9. Kompletní seznam využitých součástí

6 REALIZACE STAVBY

Stavbu počítače jsem realizoval základní instalací procesoru do čipsetu na základní desce. S tím byla spojená instalace paměťového disku s operačními paměťmi RAM. Po prvotním kroku byla instalována základní deska do počítačové skříně, a zároveň proběhla instalace výměníku pro kapalinu. Následně proběhla instalace zdroje a propojení jednotlivých částí napájecími kabely. Po úspěšné realizaci základní stavby proběhla stavba vodního okruhu na míru. Když byla práce hotova nainstaloval se operační systém a počítač běžel zátěžovou zkouškou pro případný únik kapaliny.

6.1 Instalace základních částí do počítačové skříně

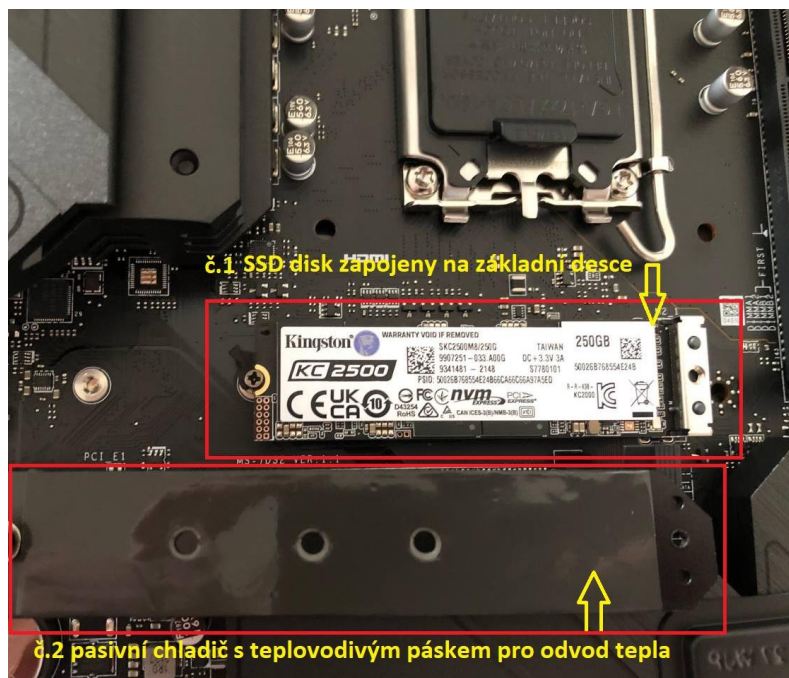
Samotná realizace lze rozdělit do čtyř po sobě jdoucích částí. V první části probíhala základní stavba počítačových komponentů. Instalace procesoru do čipsetu na základní desce, instalace uložště, pracovních pamětí RAM a atd.



Obrázek 37. Instalace základních komponentů – foto autora

Nové provedení pevných ssd disků je chlazeno za pomoci pasivního chladiče, který je umístěný na povrchu ssd disku. Na obrázku 38, který je uvedený níže je ukázané, jak pasivní

chladič na základní desce pro uložení vypadá. Vrchní strana SSD disku vyzařuje teplo, proto je potřeba ho odvést do okolí. K tomu slouží pasivní chladič s teplo vodivým páskem.



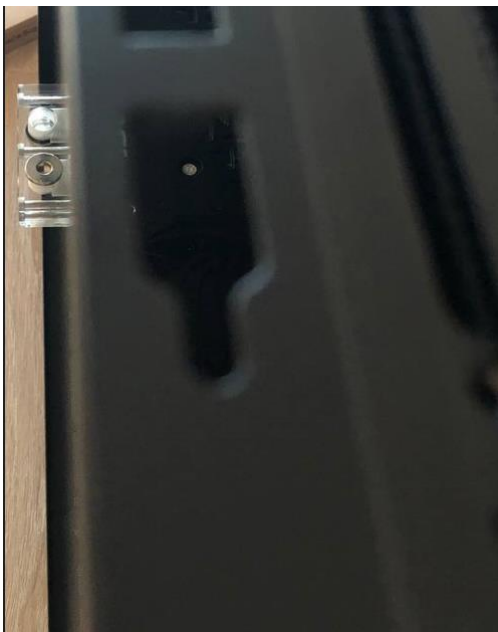
Obrázek 38. Osazení uložště – foto autora

Následně proběhla instalace základní desky do počítačové skříně s instalací výměníku kapaliny s vodní pumpou.



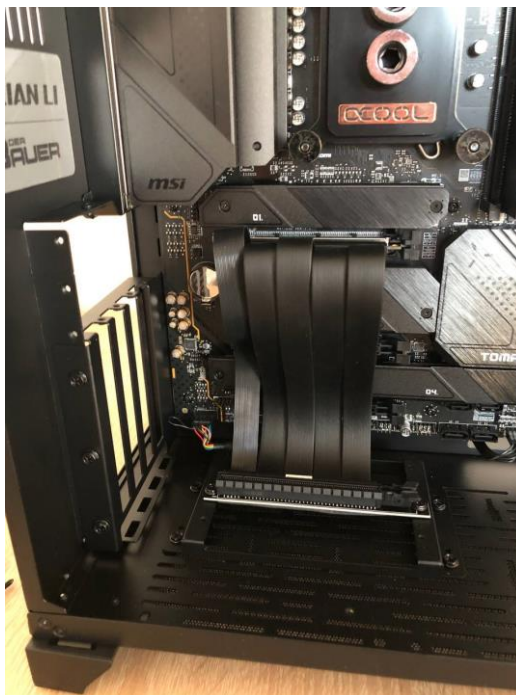
Obrázek 39. Přední pohled na základní část počítače – foto autora

Při osazení grafické karty do slotu na základní desce došlo k značné komplikaci. Grafická karta měla větší rozměry a byla širší než počítačová skříň. Tím nesplňovala rozměry skříně, což vedlo k eliminaci možnosti uzavření boční strany stěnou, viz obrázek 40.

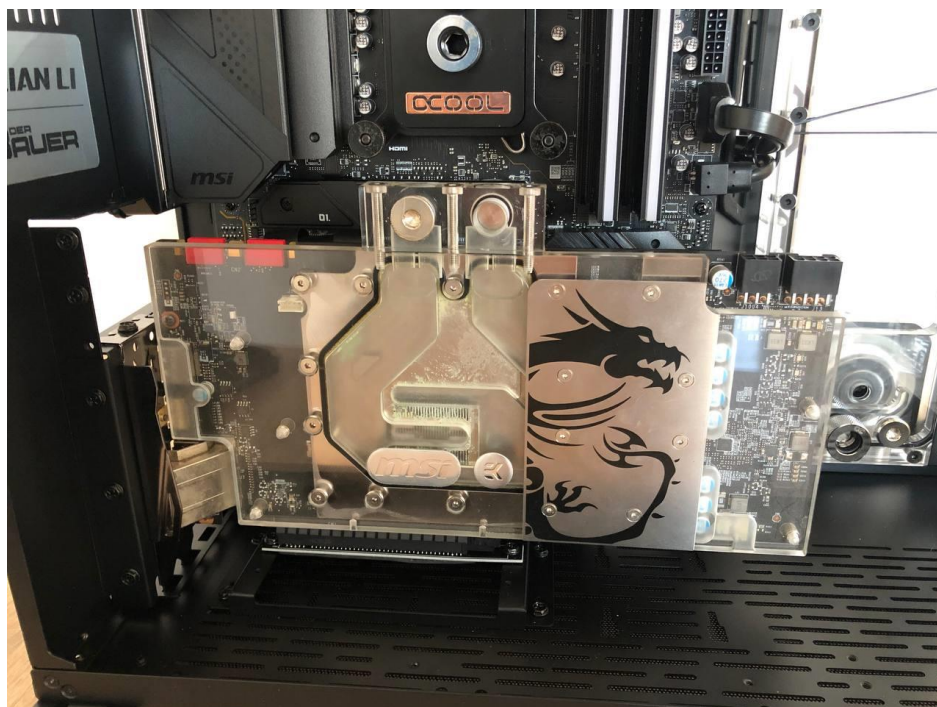


Obrázek 40. Přesah grafické karty – foto autora

Řešení v tomto případě nebylo mnoho. Z důkladné studie, jak zrealizovat chladicí okruh jsem nakonec přišel na řešení instalovat grafickou kartu ve vertikální poloze. K tomu ovšem byla potřeba odpovídající redukce, kterou lze koupit přímo od výrobce Lian-Li, který se specializuje na příslušenství ke svým skříním. Samotný adaptér se jmenuje Lian Li O11D-1 Riserkabel + PCI slot. Jeho instalace do počítačové skříně viz obrázek č.41.



Obrázek 41. Redukce pro grafickou kartu do vertikální polohy – foto autora
Výsledná instalace grafické karty a její upevnění v redukci, která je připevněna ke konstrukci počítačové skříně.



Obrázek 42. Výsledná instalace grafické karty – foto autora
Ve druhé části probíhala jednotlivá zapojení konektorů na základní desku a zapojení napájecích částí ke zdroji napětí.

Ve třetí části, která se jeví jako nejkomplicovanější došlo k instalaci vodního okruhu. Během této práce bylo zapotřebí zručnosti a manipulace s instalačním nářadím. Hlavním smyslem bylo uzpůsobení velikostí trubek na požadovanou velikost mezi jednotlivými částmi okruhu. K spojení trubek slouží spojovací fitinky. Ovšem nejsložitějším prvkem během celé stavby bylo samotné nahřívání a ohýbání trubek do požadovaného tvaru, aby se mohl propojit výstupní otvor z výměníku kapaliny do spojovacího článku ve spodní straně chladicího okruhu. Spojovací článek je instalován s vypouštěcím ventilem, který slouží pro servisní vypuštění vodního okruhu a následně je využit k propojení navazujících částí. První je vrtulkový průtokoměr, který ukazuje skrze otáčecí vrtulku, zda okruhem proudí nějaký tlak. Zmíněnou vrtulku pohání tlak z proudící kapaliny.



Obrázek 43. Propojení výměníku s roztojkou – foto autora

Navazující částí na vizuální průtokoměr je propojení s vodním blokem na grafické kartě. Zde se nachází první část zahřívacího prvku, v této části kapalina přebírá první teplo. Vyprodukované teplo není příliš vysoké a z tohoto důvodu může kapalina dále přebírat teplo z druhého zahřívacího prvku, kterým je procesor.



Obrázek 44. Kompletní propojení bez digitálního průtokoměru – foto autora

Obrázek 45 ukazuje výslednou podobu vnitřního prostoru celé sestavy. Spojovací část z procesoru je připojena na digitální průtokoměr, který ukazuje teplotu ohřáté vody, dále rychlost proudění kapaliny l/min a v neposlední řadě otáčení vrtulky v sekundách. Další část vedení zahřáté kapaliny je propojena s výměníkem tepla. V tomto bodě dochází k primárnímu sálání tepla do okolí, na samotném výměníku jsou nainstalovány ventilátory. Tyto ventilátory slouží k prohánění vzduchu přes žebra výměníku uvnitř počítačové sestavy. Účelem těchto ventilátorů je intenzivnější odvod vzduchu ven z počítačové sestavy.



Obrázek 45. Názorné vyobrazení vodního okruhu – foto autora

Výsledná teplota kapaliny při vyšším výkonu zátěže je pouhých cca 30 °C. Danou teplotu znázorňuje digitální průtokoměr, který obsahuje teplotní čidlo.



Obrázek 46. Znázornění hodnot z digitálního displeje v klidném režimu – foto autora



Obrázek 47. Finální podoba hotového projektu – foto autora

V poslední části probíhala zkouška těsnosti mezi jednotlivými částmi vodního okruhu a instalace operačního systému. Jakmile byl nainstalován operační systém, stáhl jsem zátěžové programy (např. ciberbench, pcmark10, superposition benchmark, nicehash-minning) pro maximalizaci výkonu zahřívacích elementů. Realizovaná stavba proběhla až na pár komplikací (např. osazení grafické karty, špatné zapojení vstupního spojení z výměníku tepla) úspěšně, ve výsledku jsem byl z vykazovaných hodnot v zátěžovém procesu velmi spokojen.

7 VÝPOČET TEPELNÉHO TOKU PŘI CHLAZENÍ

Dalším cílem této práce byl po realizaci a otestování vodního chladicího okruhu bylo provedení tepelné bilance pro jednotlivé části okruhu a porovnání s původním chlazením.

7.1 Výpočet pro klasické chlazení vedením tepla z procesoru do hliníkového chladicího elementu

K určení vedení tepla z procesoru je zapotřebí vycházet z rovnice (5)

\dot{Q}_1 – tepelný tok [W], π – Ludolfovo číslo, $d = 0,032m$, šířka chladiče [m], $t_{prostředí}$ – teplota uvnitř počítačové skříně [°C], $t_{procesoru}$ – teplota na povrchu procesoru, $d_1 = 0,25m$, šířka teplovodivé pasty v kontaktu s procesorem

Tepelný tok vedením:

$$\dot{Q}_1 = \frac{\lambda \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot (t_{procesoru} - t_{prostředí})}{d} \Rightarrow \frac{203 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,026^2}{4} \cdot (45 - 21)}{0,032}$$

$$\dot{Q}_1 = 80,792885 \text{ W}$$

Pro výpočet přestupu tepla jsem vycházel ze znalosti a využití rovnice (10).

λ - součinitel tepelné vodivosti hliníku = $203W.m^{-1}.K^{-1}$, Pr - Prandtlovo číslo pro vzduch, $Pr = 0,73$, $v = 5 \text{ m/s}$, střední hodnota rychlosti proudění vzduchu [m/s], ν - kinematická viskozita okolí $\nu = 18,8 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$, Gr - Grashofovo číslo, g - gravitační zrychlení $g = 9,81 [m.s^{-2}]$, β - teplotní součinitel objemové roztažnosti [K^{-1}], Δt - rozdíl teplot mezi povrchem a zprůměrněnou teplotou okolí [°C], $d_2 = 0,093$ průměr chladiče [m], $A_{žebra} = 0,244400$ plocha žebra chladiče [m^2], λ_1 - součinitel tepelné vodivosti okolí $0,0258W.m^{-1}.K^{-1}$

Hodnota teplot mezi povrchem a zprůměrněnou teplotou okolí s výpočtem součinitele objemové roztažnosti.

$$\Delta t = \frac{t_{procesoru} + t_{prostředí}}{2} \Rightarrow \frac{45 + 21}{2} = 33^\circ C \Rightarrow 33 + 273,15 = 310,15K$$

$$\beta = \frac{1}{T_s} \Rightarrow \frac{1}{310,15} = 3,2242 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

Z určení Reynoldsova čísla se určí empirická rovnice pro výpočet Nusseltova čísla.

$$Re = \frac{v \cdot d_2}{\nu} \Rightarrow \frac{5 \cdot 0,093}{18,8 \cdot 10^{-6}} = 24734,04255$$

Z výsledného výpočtu Reynoldsova čísla se určila empirická rovnice pro kritéria:

$$Nu: 10^4 < Re < 5 \cdot 10^6$$

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \Rightarrow 0,023 \cdot 24734,04255^{0,8} \cdot 0,73^{0,4} = 66,32741366$$

Výsledek Nusseltova čísla se následně využije pro výpočet α .

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_1}{d_2} \Rightarrow \frac{66,32741366 \cdot 0,0258}{0,093} = 18,40050831 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Výsledné vypočítání tepelného toku při ochlazování procesoru klasickým chladičem:

$$\dot{Q}_2 = \alpha \cdot A_{zebra} \cdot (t_{chlad} - t_{prostredi}) \Rightarrow 18,40050831 \cdot 0,244400 \cdot (45 - 21)$$

$$\dot{Q}_2 = 107,9000215 W$$

7.2 Přestup tepla do chladicí vody v CPU bloku

a_1 - šířka chladicího bloku = 55 mm, b_1 - výška chladicího bloku = 65 mm, A_1 - plocha chladicího bloku [m^2], $o_1 = 0,24$ smočený obvod [m], Prandtlovo číslo $Pr = 7,06$, $\lambda_2 = 0,6$ teplotní součinitel vodivosti vody [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$], v_2 - rychlost proudění kapaliny 1 ze 3 zdířek [m^3/s], ν - kinetická viskozita okolí [m^2/s^1],

Výpočet plochy A_1 :

$$A_1 = a_1 \cdot b_1 \Rightarrow 55 \cdot 65 = 3575 \text{ mm}^2 = 0,003575 \text{ m}^2$$

$$o_1 = 2(a_1 + b_1) \Rightarrow 2(55 + 65) = 240 \text{ mm} = 0,240 \text{ m}$$

Výpočet teplosměnné plochy deq :

$$deq_2 = \frac{4 \cdot A_1}{o_1} \Rightarrow \frac{4 \cdot 0,003575}{0,24} = 0,0595833 \text{ m}$$

Teplosměnnou plochu bylo zapotřebí znát, aby bylo možné určit Reynoldsovo číslo.

$$Re = \frac{v_2 \cdot deq_2}{\nu} \Rightarrow \frac{1,66667 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0595833}{8,04 \cdot 10^{-5}} = 1,235145505 \cdot 10^{-3}$$

Určení Grashofova čísla:

$$Gr = \frac{g \cdot deq_2^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2} \Rightarrow \frac{9,81 \cdot 0,0595833^3 \cdot 3,2242 \cdot 10^{-3} \cdot (45 - 21)}{(8,04 \cdot 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 24840,69735$$

Ze znalosti Grashofova čísla lze následně vypočítat Nusseltovo číslo.

$$Re < 2300, Pe > 1800, GrPr < 3,6 \cdot 10^6.$$

$$Nu = 0,74 \cdot Pe^{0,2} (Gr \cdot Pr)^{0,1}$$

$$Nu \Rightarrow 0,74 \cdot (8,720127265 \cdot 10^{-3})^{0,2} (24840,69735 \cdot 7,06)^{0,1}$$

$$Nu = 0,9588112759$$

Vypočítané Pe , se využije ve výpočtech Nusseltova čísla.

$$Pe = Re \cdot Pr \Rightarrow 1,235145505 \cdot 10^{-3} \cdot 7,06 = 8,720127265 \cdot 10^{-3}$$

V každém kroku se počítá součinitel přestupu tepla. Tuto hodnotu je potřebnou následně uplatnit ve vzorci pro výpočet tepelného toku. α_{proc} nám určuje hodnotu mezi stěnou procesoru a vodou.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot deq_2}{\lambda_2} \Rightarrow \alpha_{proc} \Rightarrow \frac{Nu \cdot \lambda_2}{deq_2} \Rightarrow \frac{0,9588112759 \cdot 0,618}{0,0595833}$$

$$\alpha_{proc} = 9,944822937 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet hodnoty tepelného toku mezi procesorem a vodou.

$$\dot{Q}_3 = \alpha_{proc} \cdot A_1 \cdot (t_{chlad} - t_{okoli}) \Rightarrow 9,944822937 \cdot 0,003575 \cdot (45 - 21)$$

$$\dot{Q}_3 = 0,853265808 \text{ W}$$

7.3 Výpočet tepelného toku z grafické karty do chladicí vody

Pro určení tepelného toku z bloku grafické karty se postupovalo podobně jak tomu bylo pro kapitolu 7.2. Pouze v tomto případě se měnily rozměrové hodnoty ploch.

a_2 – šířka chladicí plochy kterou prochází chladicí kapalina = 15 mm, b_2 – výška chladicí plochy = 90 mm, A_2 – plocha chladicího bloku grafické karty [m^2], $o_2 = 0,26$ smočený obvod [m], $\nu_3 = 5 \cdot 10^{-6}$, rychlost proudění kapaliny grafickou kartou [m/s],

Výpočet plochy A_2 :

$$A_2 = a_2 \cdot b_2 \Rightarrow 15 \cdot 90 = 1350 \text{ mm}^2 = 0,001350 \text{ m}^2$$

$$O_2 = 2 \cdot (a_2 + b_2) \Rightarrow 2 \cdot (80 + 90) = 340 \text{ mm} = 0,34 \text{ m}$$

Výpočet teplosměnné plochy.

$$deq_3 = \frac{4 \cdot A_2}{o_2} \Rightarrow \frac{4 \cdot 0,001350}{0,34} = 0,01588235294 \text{ m}$$

Výpočet teplosměnné plochy pro určení Reynoldsova čísla.

$$Re = \frac{v_3 \cdot deq_3}{\nu} \Rightarrow \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,01588235294}{8,04 \cdot 10^{-5}} = 9,95859399 \cdot 10^{-4}$$

Výpočet Grashofova čísla.

$$Gr = \frac{g \cdot deq_3^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2} \Rightarrow \frac{9,81 \cdot 0,01588235294^3 \cdot 3,2242 \cdot 10^{-3} \cdot (45 - 21)}{(8,04 \cdot 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 470,4729445$$

Výpočet Pe pro následné dosazení do vztahového výpočtu pro Nusseltovo číslo.

Ze znalosti Reynoldsova čísla, které určuje empirickou rovnici pro podmínky:

$$Pe = Re \cdot Pr \Rightarrow 9,95859399 \cdot 10^{-4} \cdot 7,06$$

$$Pe = 7,030555557 \cdot 10^{-3}$$

$$Re < 2300, Pe > 1800, GrPr < 3,6 \cdot 10^6.$$

Výpočet Nusseltova čísla:

$$Nu = 0,74 \cdot Pe^{0,2} (Gr \cdot Pr)^{0,1}$$

$$Nu \Rightarrow 0,74 \cdot (7,030555557 \cdot 10^{-3})^{0,2} (470,4729445 \cdot 7,06)^{0,1}$$

$$Nu = 0,6176800635$$

V opakujícím se kroku vypočítá součinitel přestupu tepla α z grafické karty.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot deq_3}{\lambda_2} \Rightarrow \alpha_{graf} \Rightarrow \frac{Nu \cdot \lambda_2}{deq_3} \Rightarrow \frac{0,6176800635 \cdot 0,618}{0,01588235294}$$

$$\alpha_{graf} = 24,03461758 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Výpočet hodnoty tepelného toku grafické karty a protékající vodou.

$$\dot{Q}_4 = \alpha_{graf} \cdot A_2 \cdot (t_{chlada} - t_{okolí}) \Rightarrow 24,03461758 \cdot 0,001350 \cdot (45 - 21)$$

$$\dot{Q}_4 = 0,7787216096 \text{ W}$$

7.4 Výpočet součinitele přestupu tepla na vnitřní straně potrubí, jedná se o nucenou konvekci

Výpočet Reynoldsova čísla.

$$Re = \frac{v_3 \cdot d_5}{\nu} \Rightarrow \frac{0,00066 \cdot 0,01}{8,04 \cdot 10^{-5}} = 0,08208955224$$

Výpočet Grashofovo číslo.

$$Gr = \frac{g \cdot d_5^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2} \Rightarrow \frac{9,81 \cdot (6,218905473 \cdot 10^{-4})^3 \cdot 3,2242 \cdot 10^{-3} \cdot (45 - 21)}{(8,04 \cdot 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 73030,46752$$

Výpočet Pe pro následné dosazení do vztahového výpočtu pro Nusseltovo číslo.

Ze znalosti Reynoldsova čísla, které určuje empirickou rovnicí pro podmínky:

$$Pe = Re \cdot Pr \Rightarrow 0,08208955224 \cdot 7,06$$

$$Pe = 0,5795522388$$

$$Re < 2300, Pe > 1800, GrPr < 3,6 \cdot 10^6.$$

Výpočet Nusseltova čísla:

$$Nu = 0,74 \cdot Pe^{0,2} (Gr \cdot Pr)^{0,1}$$

$$Nu \Rightarrow 0,74 \cdot (0,5795522388)^{0,2} (73030,46752 \cdot 7,06)^{0,1}$$

$$Nu = 2,472185845$$

V opakujícím se kroku vypočítá součinitel přestupu tepla α z grafické karty.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_5}{\lambda_{vody}} \Rightarrow \alpha_{in} \Rightarrow \frac{Nu \cdot \lambda_{vody}}{d_5} \Rightarrow \frac{2,472185845 \cdot 0,618}{0,010}$$

$$\alpha_{in} = 152,7810852 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

7.5 Výpočet součinitele přestupu tepla na vnější straně potrubí

Výpočet součinitele přestupu tepla mezi stěnou potrubí a okolním vzduchem, jedná se o volnou konvekci.

$d_4 = 0,013\text{m}$, vnější průměr trubice [m], Prandtlovo číslo pro vodu 5,5, $\lambda_{\text{vzduchu}} = 2,58 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $L_v = 0,67\text{m}$, výška trubic celého vedení [m],

<u>Gr Pr</u>	C	n
$< 10^{-3}$	0,6	0
$< 1 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^2 >$	1,18	1/8
$< 5 \cdot 10^2 \cdot 2 \cdot 10^7 >$	0,54	1/4
$< 2 \cdot 10^7 \cdot 1 \cdot 10^{13} >$	0.135	1/3

Obrázek 48. Tabulka hodnot pro výpočet Nusseltova čísla C a n

a: Výpočet součinitele přestupu tepla mezi vnějším povrchem vodorovné trubky a okolním vzduchem.

Výpočet Grashofova čísla.

$$\Delta t = \frac{45 + 21}{2} = 33 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Gr = \frac{g \cdot d_4^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2} \Rightarrow \frac{9,81 \cdot 0,013^3 \cdot 3,2242 \cdot 10^{-3} (45 - 21)}{(8,04 \cdot 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 258,0002829$$

Součin Grashofova a Prandtlova čísla.

$$Gr \cdot Pr \Rightarrow 258,0002829 \cdot 5,5 = 1419,001556$$

Ze znalosti Grashofova čísla a výpočetních vztahů budeme určovat rozmezí hodnot pro C a n z obr. 18. kde pro $5 \cdot 10^2 \leq GrPr \leq 2 \cdot 10^7$ je $C = 0,54$ a $n = 1/4$

$$Nu = c(GrPr)^n$$

$$Nu = 0,54 \cdot (1419,001556)^{1/4}$$

$$Nu = 3,314282149$$

Z výše uvedeného vypočtu lze určit součinitel tepelné vodivosti pro vodorovnou část.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_4}{\lambda_1} \Rightarrow \alpha_{vodorovná} \Rightarrow \frac{Nu \cdot \lambda_1}{d_4} \Rightarrow \frac{3,314282149 \cdot 0,0258}{0,013}$$

$$\alpha_v = 6,577575342 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

b: Výpočet součinitele přestupu tepla mezi vnějším povrchem svislé trubky a okolním vzduchem.

Určení Grashofova čísla.

$$Gr = \frac{g \cdot L_v^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2} \Rightarrow \frac{9,81 \cdot 0,67^3 \cdot 3,2242 \cdot 10^{-3} (45 - 21)}{(8,04 \cdot 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 35319498,9$$

Součin Grashofova a Prandtlova kritéria.

$$Gr \cdot Pr \Rightarrow 35319498,9 \cdot 5,5 = 194257244$$

Z určení $GrPr$ vyšly hodnoty, pro které odpovídají data z tabulky kdy omezení jsou následovná viz tabulku č.48: $2 \cdot 10^7 \leq GrPr \leq 1 \cdot 10^{13}$ z toho plyne $C = 0,135$ a $n = 1/3$

$$Nu = c(GrPr)^n$$

$$Nu = 0,135 \cdot (194257244)^{1/3}$$

$$Nu = 78,18549249$$

Z výše uvedeného vypočtu lze určit součinitel tepelné vodivosti pro vodorovnou část.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L_v}{\lambda_1} \Rightarrow \alpha_s \Rightarrow \frac{Nu \cdot \lambda_1}{L_v} \Rightarrow \frac{78,18549249 \cdot 0,0258}{0,67}$$

$$\alpha_s = 3,010724935 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

7.6 Výpočet tepelného toku pro výměník

a_3 – délka chladicí plochy kterou prochází chladicí kapalina = 393 mm, b_3 – šířka chladicí plochy kterou prochází chladicí kapalina = 120 mm

$$A_3 = a_3 \cdot b_3 \Rightarrow 393 \cdot 120 = 47160 \text{ mm}^2 = 0,047160 \text{ m}^2$$

Výpočet teplosměnné plochy pro určení Reynoldsova čísla.

$$Re = \frac{v_3 \cdot a_3}{\nu} \Rightarrow \frac{5 \cdot 0,393}{16,6 \cdot 10^{-6}} = 118373,494$$

$$10^4 < Re < 5 \cdot 10^6, 0,6 < Pr < 2500$$

Výpočet Nusseltova čísla.

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} (Pr)^{0,4}$$

$$Nu \Rightarrow 0,023 \cdot (118373,494)^{0,8} (5,5)^{0,4}$$

$$Nu = 520,5668221$$

V opakujícím se kroku vypočítá součinitel přestupu tepla α z výměníku tepla.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot a_3}{\lambda_3} \Rightarrow \alpha_3 \Rightarrow \frac{Nu \cdot \lambda_3}{a_3} \Rightarrow \frac{520,5668221 \cdot 0,393}{0,047160}$$

$$\alpha_3 = 4338,056851 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

Výpočet hodnoty tepelného toku z výměníku tepla.

$$\dot{Q}_8 = \alpha_3 \cdot A_3 \cdot (t_{chlada} - t_{okoli}) \Rightarrow 4338,056851 \cdot 0,047160 \cdot (40 - 21)$$

$$\dot{Q}_8 = 3887,072461 W$$

7.7 Výpočet tepelných ztrát z chladicí kapaliny do okolního vzduchu prostupem

Pro výpočet součinitele prostupu tepla k_1 – vodorovná trubka.

$$\frac{1}{k_1} = \frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_v} \Rightarrow \frac{1}{152,7810852} + \frac{0,003}{0,193} + \frac{1}{6,577575342}$$

$$\frac{1}{k_1} \Rightarrow 0,1741210602 \Rightarrow k_1 \Rightarrow \frac{1}{0,1741210602}$$

$$k_1 = 5,743130664 W \cdot m^2 \cdot K$$

Pro výpočet součinitele prostupu tepla k_2 – svislá trubka.

$$\frac{1}{k_2} = \frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_s} \Rightarrow \frac{1}{152,7810852} + \frac{0,003}{0,193} + \frac{1}{3,010724935}$$

$$\frac{1}{k_2} \Rightarrow 0,3542352735 \Rightarrow k_2 \Rightarrow \frac{1}{0,3542352735}$$

$$k_2 = 2,8229825628 W \cdot m^2 \cdot K$$

Výpočet tepelného toku \dot{Q} .

L_v – délka celého vodorovného vedení = 0,7m, L_s – délka celého svislého vedení = 0,67m

Výpočet plochy vedení vodorovné trubice.

$$A_v = \pi \cdot d_2 \cdot L_v \Rightarrow 3,14 \cdot 0,013 \cdot 0,7 = 0,028574m^2$$

Výpočet plochy vedení svislé trubice.

$$A_s = \pi \cdot d_2 \cdot L_s \Rightarrow 3,14 \cdot 0,013 \cdot 0,67 = 0,0273494m^2$$

$$\dot{Q}_5 = k_1 \cdot A_v \cdot (t_{chlad} - t_{okoli}) \Rightarrow 5,743130664 \cdot 0,028574 \cdot (45 - 20)$$

$$\dot{Q}_5 = 4,10260539 W$$

$$\dot{Q}_6 = k_2 \cdot A_s \cdot (t_{chlad} - t_{okoli}) \Rightarrow 2,8229825628 \cdot 0,0273494 \cdot (45 - 20)$$

$$\dot{Q}_6 = 1,930171983 W$$

Výsledné tepelná tok trubíc $\dot{Q}[W]$

$$\dot{Q}_7 = \dot{Q}_5 + \dot{Q}_6 \Rightarrow 4,10260539 + 1,930171983$$

$$\dot{Q}_7 = 6,032777373W$$

Z vypočítaných hodnot jsou tepelné toky následující.

Chlazení klasickým chladičem $v = 5 m/s$
$Q_1 = 80.792885 W$
$Q_2 = 107.9000215 W$
Vodní chlazení
$Q_3 = 0.853265808 W$
$Q_4 = 0.7787216096 W$
$Q_7 = 1.690935111 W$
$Q_8 = 3887.072461w$

Tabulka 10. Tabulka hodnot přestupu tepla pro jednotlivé části chlazení

ZÁVĚR

Při studování možností chlazení počítače jsem se seznámil s různými principiálními způsoby chlazení, které se dají využít pro ochlazování počítačových komponentů, popřípadě celého počítače. Během těchto zjištění bylo zapotřebí si projít kapitolu o sdílení tepla a s tím spojené možnosti, aby bylo možné realizovat výpočty pro tepelnou bilanci chladicího okruhu.

V průběhu návrhu vodního chlazení jsem zvolil základní počítačové komponenty s již předpřipravenými vodními bloky pro snazší realizaci propojení. Rozhodl jsem se tak, protože při navrhování vodního chlazení jsem zvolil trubice místo hadic. U trubic nastala komplikace, protože je potřeba zručnost k tomu, aby se mohli jednotlivé části propojit, zatímco u hadic tomu tak není. Hadice nejsou pevné, dají se různě ohýbat a tím je jejich instalace podstatně jednodušší. Jsem rád, že jsem se rozhodl pro trubicové propojení jednotlivých částí vodního okruhu, protože trubice mají specifickou vlastnost pevnost. Na druhou stranu jsem zvolil trubice z čirého plexiskla, ale v tento moment bych volil raději jiný typ trubic a to PETB. PETB trubice, protože mají lepší pracovní vlastnosti při montáži případně bych také mohl zvolit trubice, které mohou mít lepší součinitel tepelné vodivosti což by zapříčinilo intenzivnější chlazení. Vzhledem k tomu, že se jedná o vodní okruh na míru, tak v mnoha krocích byla potřeba postupovat systematicky. Nejdříve jsem nainstaloval části, které budou spojeny trubicemi. To je z důsledku atypických délek mezi jednotlivými částmi.

Ve výpočetní části jsem vypočítával tepelné toky jednotlivých způsobů chlazení k jejich následnému porovnání. Během výpočtů bylo důležité rozlišovat o jaké možnosti přestupu tepla se jedná, tím mám na mysli, jestli šlo o volnou konvekci nebo nucenou konvekci. To zapříčinil fakt, že chladicí prvky měly poháněcí element, což změnilo typ dané konvekce. Výpočty se povedlo zrealizovat pro klasické chlazení, které se nachází ve velké části počítačů, ale vypočítané tepelné toky z vodního chlazení měli zářející pozitivní výsledky. Z výsledků tepelné bilance pro vodní chlazení je patrné, že ztráty tepla mnou navrženým chlazením při maximálním výkonu mají hodnotu 3890,40 W, což je několikanásobně vyšší než tepelné ztráty pro klasické chlazení. Výkon chlazení se mění s výkonem počítače v zátěži a výpočet, který jsem provedl byl pro maximální zátěž počítače.

Během realizace stavby se vyskytlo několik na sebe navazujících komplikací, které bylo zapotřebí řešit. Největší komplikací byla instalace grafické karty, které byla širší než prostor uvnitř počítačové skříně. Vzniklý problém se podařilo vyřešit za pomoci redukce, která

umožňuje instalaci grafické karty ve vertikální poloze namísto vodorovné. Jako druhou komplikaci vodního okruhu jsem zaregistroval, že uživatel nedostane žádnou zpětnou informaci v reálném čase, pokud se nevyužije digitální průtokoměr. V praxi to znamená okamžité informace o teplotě vody v místě, kde se digitální průtokoměr s teploměrem nachází.

Během porovnání s běžně dostupným chlazením je zapotřebí rozlišit, co konkrétně porovnáváme. Pokud se zaměříme na klasické chlazení, kdy chladič odvádí teplo vyprodukované ze zahřívacích částí do prostoru počítačové skříně, tak následně je zapotřebí ventilátorů a na přední straně vytvořit tzv. větrný tunel. Ten se vytváří pro odvod tepla z prostoru počítačové skříně s tím jsou spojené vyšší teploty na zahřívacích částí s vyšším hlukem celého počítače. Na rozdíl od toho je u vodního chlazení na míru zapotřebí pomocí chladicí kapaliny transportovat vyprodukované teplo do výměníku, který odvede teplo mimo počítačovou skříň. Výsledky vodních tepelných toků pro vodu prokázali, že vedení s protékajícími částmi odvádí minimum tepla do prostoru počítačové skříně, čímž se eliminuje potřeba vytváření větrného tunelu uvnitř počítačové skříně a snižuje se tím teplota v celém prostoru počítače, což má za efekt nižší teploty na ostatních částí, a proto počítač je razantně tišší a počítačové komponenty pracují v nižších teplotách, což může ovlivnit délku jejich životnosti a pracovní výkonnost.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FUKÁTKO, Tomáš a Jaroslav FUKÁTKO. *Teplota a chlazení v elektronice II*. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 118 s., ISBN 8073001993. [cit. 2022-02-15].
- [2] MEČÍŘ, Martin, 2014. Multimediální učebnice hardwaru: *Základní desky* [online].28.4.2014 [cit. 2022-03-13]
Dostupné z: https://3zskadan.cz/hardware/ucebnice_zakladni_desky.html
- [3] HABERLE, Heinz a kol. *Průmyslová elektronika a informační technologie*. 1. vydání, překlad Handlíř Jiří, 719 s.,2003., ISBN 8086706044
- [4] BROŽA, Petr. *Stavíme si počítač*. 4. vydání, 194 s., 2004., ISBN 9788072269334
- [5] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika. Součástky a obvody*. Principy a příklady, 3. vydání. 220 s., 2005., ISBN 9788024712413
- [6] JANÁČOVÁ, Dagmar, *Sdílení tepla*, výukové materiály, UTB FAI 2020. [cit. 2022-04-16].
- [7] BEDNÁŘ, Radim, 2021. *Optimalizace spotřeby energie pro chlazení elektronických počítačových komponent*. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta Aplikované Informatiky. Vedoucí práce Dagmar Janáčová.
- [8] POKORNÝ, Marek. *Sálání tepla* [online]. Katedra konstrukcí pozemních staveb. Fakulta stavební ČVUT v Praze. [cit. 2022-03-05].
Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/1/1-4_Salani_tepla.pdf
- [9] JIRUŠKA, Dan, 2017. *Vodní chlazení osobních počítačů*. Bakalářská práce. Univerzita Hradec Králové. Katedra Informatiky. Vedoucí práce Štěpán Hubálovský.
Dostupné z: <https://theses.cz/id/s9t4lw/22101296>
- [10] VÍTEK, Jan. 2022. Svět Hardware: GeForce RTX 3090 Ti v testech: nejlepší výkon, ale ta spotřeba. [online] [cit. 1.4.2022]
Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/geforce-rtx-3090-ti-v-testech-nejlepsi-vykon-ale-ta-spotreba/57394>
- [11] ŠULC, Tomáš, 2013. Pc Tuning: *Teoretický i praktický průvodce vodním chlazením*. [online]. [cit. 14.4.2022]
Dostupné z: <https://pctuning.cz/article/teoreticky-i-prakticky-pruvodce-vodnim-chlazenim>
- [12] GeForce RTX 3090. <https://www.nvidia.com/cs-cz/geforce/graphics-cards/30-series/rtx-3090-3090ti/#wtb> [online]. [cit. 2022-04-25]
Dostupné z: <https://www.nvidia.com/cs-cz/geforce/graphics-cards/30-series/rtx-3090-3090ti/#wtb>
- [13] STAFF, Moyens, 2021. Moyens I/O Magazine: *Potřebuje váš M.2 NVMe SSD chladič?* [online] [cit. 2022-02-02]
Dostupné z: <https://cz.moyens.net/tech/testovano-potrebuje-vas-m-2-nvme-ssd-chladic/#rb-vysoke-rychlosti-vysoke-teploty-nizsi-zivotnost>
- [14] Intel. *Intel core i-5 12600KF* [online]. [cit. 2022-04-25].
Dostupné z: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/134590/intel-core-i512600kf-processor-20m-cache-up-to-4-90-ghz/specifications.html> specifikace intel

- [15] EAGLE, 2003. PC Tuning: *Spotřeba procesorů – komplexní přehled (Q1 2003)*. [online] [cit. 2022-03-05]
Dostupné z: <https://pctuning.cz/article/spotreba-procesoru-komplexni-prehled-q1-2003>
- [16] Operační paměť. *Gigabyte Aorus RGB 16Gb DDR4*. [online]. [cit. 2022-03-13]
Dostupné z: <https://www.gigabyte.com/cz/Memory/AORUS-RGB-Memory-16GB--2x8GB-3600MHz#kf>
- [17] SSD Disk. *Kingston NVMe PCIe SSD*. [online]. [cit. 2022-03-13]
Dostupné z: <https://www.kingston.com/en/ssd/kc2500-nvme-pcie-ssd>
- [18] Výměník tepla. *Vodní pumpa s výměníkem kapaliny*. [online]. [cit. 2022-03-13]
Dostupné z: <https://www.ekwb.com/shop/ek-quantum-kinetic-flt-360-d5-pwm-d-rgb-plexi>
- [19] Počítačová skříň. *Lian-li PC-O11 Dynamick black*. [online] [cit. 2022-03-13]
Dostupné z: <https://lian-li.com/product/st120/>
- [20] Trubice. *Tvrzené trubice 13/10 mm*. [online] [cit. 2022-03-13]
Dostupné z: <https://www.aquatuning.cz/vodni-chlazení/hard-tubes/pettubes/20940/alphacool-eisrohr-13/10mm-petg-hardtube-80cm-4pcs?c=20956>
- [21] Výměník. *Výměník tepla*. [online] [cit. 2022-03-13]
Dostupné z: <https://www.ekwb.com/shop/ek-coolstream-classic-se-360>
- [22] BRÁZDIL, Martin, 2011. *Peltierovy články pro výrobu elektrické energie*. [online] [cit. 8.1.2022]
Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2011/04_Br%C3%A1zdil.pdf
- [23] Specifikace grafické karty. *GeForce GTX 1070 SEA HAWK EK X*. [online] [2022-03-13]
Dostupné z: <https://www.msi.com/Graphics-Card/GeForce-GTX-1070-SEA-HAWK-EK-X/Specification>
- [24] Specifikace instalovaných operačních pamětí. *Gigabyte AORUS RGB DDR4*. [online] [cit. 2022-03-13]
Dostupné z: <https://www.gigabyte.com/Memory/AORUS-RGB-Memory-DDR4-16GB--2x8GB-3733MHz>
- [25] Operační paměť RAM. *Gigabyte Aorus 16Gb DDR4*. [online] [cit. 2022-04-15]
Dostupné z: <https://www.mironet.cz/gigabyte-aorus-rgb-16gb-2x8gb-3733-mhz-cerna-ddr4-pc429866u-cl19191943-12v-xmp20-s-chladicem+dp485284/>
- [26] Zdroj: *Corsair CX750F 80 PLUS BRONZE*. [online] [cit. 2022-03-14]
Dostupné z: <https://www.corsair.com/us/en/Categories/Products/CORSAIR-iCUE/Power-Supplies/iCUE-CXF-RGB-Power-Supplies/p/CP-9020218-NA>
- [27] Sata. *Popis sata parametrů*. [online] [cit. 2022-03-15]
Dostupné z: https://kb.sandisk.com/app/answers/detail/a_id/8142/~/difference-between-sata-i%2C-sata-ii-and-sata-iii
- [28] Základní deska. *MSI MAG Z690 Tomahawk WIFI DDR4*. [online] [cit. 2022-04-20]
Dostupné z: <https://www.msi.com/Motherboard/MAG-Z690-TOMAHAWK-WIFI-DDR4/Specification>
- [29] Grafická karta. *GeForce GTX 1070 sea hawk ek x 8Gb GDDR5*. [online] [cit. 2022-03-13]
Dostupné z: <https://www.czc.cz/msi-geforce-gtx-1070-sea-hawk-ek-x-8gb-gddr5/194965/produkt>
- [30] Klasický chladič. *Arctic Alpine 17*. [online] [cit. 2022-05-15]
Dostupné z: https://www.tsbohemia.cz/arctic-alpine-17_d403957.html

[31] Vodní pumpa. *EK-Quantum Kinetic FLT 360 D5 PWM RGB Plexi*. [online] [cit. 2022-04-15]
Dostupné z: <https://www.ekwb.com/shop/ek-quantum-kinetic-flt-360-d5-pwm-d-rgb-plexi>

[32] Výměník. *Výměník tepla Classic se 360*. [online] [cit. 2022-04-15]
Dostupné z: <https://www.ekwb.com/shop/ek-coolstream-classic-se-360> specifikace

[33] DVORŇÁK, Jakub, Současná produkce tepelných výměníků v ČR. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství energetický ústav. Vedoucí práce Michal Jaroš.

Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103059

[34] JANÁČOVÁ, Dagmar, *Sdílení tepla – mechanismy*, výukové materiály, UTB FAI 2020. [cit. 2022-05-12].

[35] Větráky. *Lian-Li ST 120* [online]. [cit. 2022-05-12].
Dostupné z: <https://lian-li.com/product/st120/>

[36] Výměník s vodní pumpou. *EK-Quantum Kinetic FLT 360 D5 PWM D-RGB-Plexi* [online]. [cit. 2022-05-12].
Dostupné z: <https://www.ekwb.com/shop/ek-quantum-kinetic-flt-360-d5-pwm-d-rgb-plexi>

[37] Digitální průtokoměr. *Digitální průtokoměr s oled displejem B-TFC-CS-S černý*. [online]. [cit. 2022-05-12].
Dostupné z: <https://www.aquatuning.cz/vodni-chlazení/monitorování/prutokomer/28560/byjski-b-tfc-cs-x-digital-durchflusssensor-with-oled-display-black?c=8272>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α_{graf}	součinitel přestupu tepla grafické karty	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
α_i	součinitel přestupu tepla vnitřní trubice	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
α_s	součinitel přestupu tepla pro svislé vedení	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
α_v	součinitel přestupu tepla pro vodorovné vedení	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
A_1	plocha chladičího bloku procesoru	[m ²]
a_1	šířka chladičího bloku procesoru	[mm]
A_2	plocha chladičího bloku grafické karty	[m ²]
a_2	šířka chladičího bloku grafické karty	[mm]
a_3	délka výměníku	[mm]
A_s	plocha vedení svislé trubice	[m ²]
A_v	plocha vedení vodorovné trubice	[m ²]
$A_{\text{žebra}}$	plocha žeber chladiče	[m ²]
β	teplotní součinitel objemové roztažnosti	[K ⁻¹]
b_1	výška chladičího bloku procesoru	[mm]
b_2	výška chladičího bloku grafické karty	[mm]
b_3	šířka výměníku	[mm]
C	konstanta Nusseltova kritéria	[1]
d	plocha chladiče	[m]
d	šířka chladiče	[m]
d_1	šířka teplovodivé pasty v kontaktu s procesorem	[m]
d_2	průměr chladiče	[m]
d_4	vnější průměr trubice	[m]
d_5	vnitřní průměr trubice	[m]
d_{eq}	ekvivalentní průměr	[m]
g	gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]

Gr	Grashofovo kritérium	[1]
K	Kelvin	[K]
k_1	součinitel prostupu tepla vodorovná trubka	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
k_2	součinitel prostupu tepla svislá trubka	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
L_v	výška trubice celého vedení	[m]
Nu	Nusseltovo číslo	[1]
o_1	smočený obvod bloku procesoru	[m]
o_2	smočený obvod grafické karty	[m]
Pe	Pecletovo číslo	[1]
Pr	Prandtlovo číslo	[1]
$t_{procesoru}$	teplota na povrchu procesoru	[°C]
$t_{prostředí}$	teplota uvnitř počítačové skříně	[°C]
v	střední hodnota rychlosti proudění vzduchu	[m.s ⁻¹]
v_2	rychlost proudění kapaliny 1 ze 3 zdířek	[m.s ⁻¹]
v_3	rychlost proudění kapaliny v grafické kartě	[m.s ⁻¹]
Δt	rozdíl teplot mezi povrchem a zprůměrněnou teplotou okolí	[°C]
λ	součinitel tepelné vodivosti hliníku	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_1	součinitel tepelné vodivosti okolí	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_2	součinitel tepelné vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
π	Ludolfovo číslo	[1]
ν	kinetická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
\dot{Q}_1	tepelný tok klasický chladič bez ventilátoru	[W]
\dot{Q}_2	tepelný tok klasický chladič s ventilátorem	[W]
\dot{Q}_3	tepelný tok mezi vodou a procesorem	[W]
\dot{Q}_4	tepelný tok mezi vodou a grafickou kartou	[W]
\dot{Q}_5	tepelný tok vodorovného vedení	[W]

\dot{Q}_6	tepelný tok svislého vedení	[W]
\dot{Q}_7	tepelný tok součet toků \dot{Q}_5 a \dot{Q}_6	[W]
\dot{Q}_8	tepelný tok výměníku tepla	[W]

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AIO	All in one – uzavřený vodní okruh
ATX	Formát základní desky
BIOS	Basic input-output system – základní program výpočetní techniky
CPU	Central processing unit – centrální procesorová jednotka
GB	Miliarda bajtů
GPU	Graphics processing unit – grafický procesor
Hz	Hertz – jednotka frekvence
MHz	Megahertz
NVme SSD	SSD disk s využitím flash paměti, použité v SSD
PCIe	standard systémové sběrnice
PWM	Diskrétní modulace pro přenos analogového signálu
RAM	Random access memory – druh počítačové paměti
RGB	Červená, zelená a modrá aditivní míchání barev
SSD	Solid state drive – polovodičový disk
TDP	Thermal design power – navržený tepelný výkon
V	Volt – jednotka elektrického napětí
W	Watt – jednotka výkonu
WIFI	Označení standardů IEEE 802.11

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Základní deska sestavy – foto autora	11
Obrázek 2. Instalovaný procesor na základní desku – foto autora	12
Obrázek 3. Kingston NVMe PCIe SSD [17]	13
Obrázek 4. Operační paměť Gigabyte aorus rgb 16gb [16].....	13
Obrázek 5. GEFORCE RTX 3090 [11]	14
Obrázek 6. Napájecí zdroj Corsair CX750F – foto autora	14
Obrázek 7. Peltierův článek [22]	15
Obrázek 8. Vodní blok na procesor – foto autora.....	18
Obrázek 9. Grafická karta s plnohodnotným vodním blokem – foto autora	19
Obrázek 10. Vodní pumpa s výměníkem kapaliny – foto autora	20
Obrázek 11. Výměník – foto autora.....	21
Obrázek 12. Tvrdé trubice [20].....	21
Obrázek 13. Fitinka pro hadici [8].....	22
Obrázek 14. Výměník s vodní pumpou [36].....	23
Obrázek 15. Ventilátor [19]	23
Obrázek 16. Mechanismy sdílení tepla [6]	24
Obrázek 17 Rozdělení teplot t v rámci desky [6]	25
Obrázek 18. Rozložená teploty t deskou (5).....	27
Obrázek 19. Ukázka ideálního a skutečného teploty. [6]	29
Obrázek 20. Prostup tepla mezi tekutinami A a B [6].....	31
Obrázek 21. Schéma protiproudého výměníku [6]	31
Obrázek 22. Těleso a jeho sálavost (33)	33
Obrázek 23. Dokumentace vybraných komponentů – foto autora	37
Obrázek 24. Lian Li PC-O11 Dynamick Black – foto autora	37
Obrázek 25. MSI MAG Z690 TOMAHAWK WIFI DDR4 – foto autora	38
Obrázek 26. Intel core i5-12600KF – foto autora.....	39
Obrázek 27. MSI GeForce GTX 1070 SEA HAWK EK X – foto autora	40
Obrázek 28. Kingston KC 2500 250 GB - foto autora	41
Obrázek 29. Corsair CX750F 80 Plus bronze [27].....	42
Obrázek 30. Běžně dostupné chlazení [30]	42
Obrázek 31. Vnitřní pohled na chladič blok pro procesor – foto autora	43
Obrázek 32. EK-Quantum Kinetic FLT 360 D5 PWM D-RGB-Plexi - foto autora	44
Obrázek 33. Výměník tepla – foto autora.....	45
Obrázek 34. Fitinky, spojovací fitinky, vrtulový průtokoměr a ventil – foto autora.....	45

Obrázek 35. LIAN-LI ST 120 Triple black – foto autora.....	46
Obrázek 36. Digitální průtokoměr [37]	47
Obrázek 37. Instalace základních komponentů – foto autora.....	48
Obrázek 38. Osazení uložiče – foto autora	49
Obrázek 39. Přední pohled na základní část počítače – foto autora	49
Obrázek 40. Přesah grafické karty – foto autora	50
Obrázek 41. Redukce pro grafickou kartu do vertikální polohy – foto autora	51
Obrázek 42. Výsledná instalace grafické karty – foto autora	51
Obrázek 43. Propojení výměníku s roztroučkou – foto autora.....	52
Obrázek 44. Kompletní propojení bez digitálního průtokoměru – foto autora.....	53
Obrázek 45. Názorné vyobrazení vodního okruhu – foto autora.....	54
Obrázek 46. Znázornění hodnot z digitálního displeje v klidném režimu – foto autora	54
Obrázek 47. Finální podoba hotového projektu – foto autora	55
Obrázek 48. Tabulka hodnot pro výpočet Nusseltova čísla C a n	61

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Hardware testované sestavy.....	36
Tabulka 2. Interní specifikace základná desky [28]	38
Tabulka 3. Interní specifikace [14]	39
Tabulka 4. Specifikace [23,29]	40
Tabulka 5. Technická specifikace pro vzduchový chladič. [30].....	42
Tabulka 6. Popis vodní pumpy [31].....	44
Tabulka 7. Parametry výměníku – [32]	45
Tabulka 8. Specifikace [35]	46
Tabulka 9. Kompletní seznam využitých součástí.....	47
Tabulka 10. Tabulka hodnot přestupu tepla pro jednotlivé části chlazení.....	64