

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace



## Vodní chlazení notebooku

Diplomová práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Zdeněk Bohuslávka, CSc.

Autor práce: Ondřej Zelený

Praha 2019

### Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Vodní chlazení notebooku“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 SB., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorském a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne .....

.....

Ondřej Zelený

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval prof. Ing. Zdeňku Bohuslávskovi, CSc. za cenné rady, věcné připomínky, vstřícnost při konzultacích a pomoc s vypracováním mé diplomové práce.

**Abstrakt:** Cílem diplomové práce je návrh řešení, jeho fyzická realizace a následný test vodního okruhu chlazení uvnitř notebooku. V teoretické části jsou popsány základní fyzikální principy přenosu tepla, vlastnosti chladících médií a seznámení se s parametry mikroprocesorů důležitých pro návrh chlazení. Důležitou kapitolou dané problematiky je popis používaných variant chlazení, materiálů sloužících k výrobě komponent a charakteristiky jednotlivých částí vodního okruhu. Praktická část práce se zabývá návrhem vodního chlazení vybraného notebooku, vlastní výrobou některých částí, výslednou kompletací a celkovým otestováním funkčnosti, které je věnována závěrečná část práce. Zde jsou porovnávány naměřené hodnoty aktivního a vodního chlazení notebooku podle vybraných kritérií spolu s jejich konečným vyhodnocením.

**Klíčová slova:** Vodní chlazení, notebook, GPU, GPU

### **Water cooling of the laptop**

**Summary:** The aim of the thesis is the design of the solution, physical implementation and the following test of the water cooling circuit inside the notebook. The theoretical part describes basic physical principles of heat transfer, properties of cooling media and clarification important parameters of microprocessors cooling design. An important chapter of the problematics is the description of the used cooling variants, the materials used for produced components and the characteristics of the individual parts of the water circuit. The practical part of the thesis deals with the design of water cooling for selected notebook, own fabrication of some parts, final assembly and overall functionality testing, which is devoted to the final part of the work. There are listed the measured values of active cooling and water cooling of the notebook and compared according with selected criteria together with their final evaluation.

**Key words:** Water cooling, notebook, GPU, GPU

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Cíl práce.....	2
3	Metodika práce .....	3
4	Teoretická východiska .....	4
4.1	Typy šíření tepla.....	4
4.1.1	Šíření tepla vyzařování .....	4
4.1.2	Šíření tepla prouděním .....	4
4.1.3	Šíření tepla vedením .....	5
4.2	Měrná tepelná kapacita .....	6
4.3	Mikroprocesory .....	6
4.3.1	Centrální procesorová jednotka .....	7
4.3.2	Grafická procesorová jednotka .....	8
4.3.3	Tepelný výkon procesoru.....	10
4.3.4	Tepelný výkon grafického procesoru .....	12
4.4	Pasivní a aktivní chlazení.....	13
4.4.1	Pasivní chlazení .....	13
4.4.2	Materiál chladičů .....	13
4.4.3	Heatpipe .....	14
4.4.4	Aktivní chlazení.....	15

4.4.5	Ventilátor .....	15
4.4.6	Teplovodivá pasta .....	17
4.4.7	Teplovodivý pad .....	17
4.5	Vodní chlazení .....	18
4.5.1	Materiály .....	18
4.5.2	Vodní čerpadlo .....	19
4.5.3	Vodní blok .....	20
4.5.4	Expanzní nádoba .....	21
4.5.5	Výměník tepla .....	22
4.5.6	Chladicí kapalina .....	23
4.5.7	Hadičky .....	23
4.5.8	Notebooky s vodním chlazením .....	23
5	Vlastní zpracování .....	27
5.1	Návrh vodního chlazení .....	27
5.1.1	Vodní blok CPU .....	28
5.1.2	Vodní blok GPU .....	29
5.1.3	Výměníky tepla .....	29
5.1.4	Expanzní nádoba .....	30
5.2	Výběr částí vodního okruhu .....	31
5.2.1	Trubičky a hadičky .....	31
5.2.2	Vodní čerpadla .....	32

5.3	Výroba vodního chlazení .....	33
5.3.1	Materiál .....	33
5.3.2	Technologický postup .....	34
5.3.3	Vodní blok CPU a GPU .....	34
5.3.4	Výměník tepla .....	37
5.3.5	Expanzní nádoba .....	38
5.3.6	Kompletace částí vodního okruhu .....	39
5.3.7	Vady a jejich řešení .....	41
5.3.8	Vodní okruh .....	41
5.4	Měření .....	42
5.4.1	Aktivní chlazení .....	42
5.4.2	Měření průtoku vodní pumpy .....	44
5.4.3	Vodní chlazení .....	45
5.4.4	Měření vlivu průtoku vodní pumpy na teploty komponent .....	46
6	Výsledky a jejich hodnocení .....	47
6.1	Porovnání vodního a aktivního chlazení notebooku .....	47
6.2	Měření průtoku vodní pumpy .....	50
6.3	Vliv napájecího napětí vodní pumpy na teploty komponent .....	51
7	Závěr .....	52
8	Seznam použitých zdrojů .....	53
9	Seznam obrázků .....	60

10	Seznam tabulek.....	61
11	Seznam grafů.....	62



# 1 Úvod

Od začátku 21. století došlo u notebooků k výrazné řadě změn, přesto je jejich původní koncepce stále zachována. Jsou vybaveny monitorem, klávesnicí, touchpadem a ke svému provozu po určitou dobu nevyžadují pevný zdroj elektrické energie. Největší změny probíhají v posledních letech zejména ve výrobních technologiích jednotlivých komponent. Mikroprocesory používané v notebookech, mohou v některých případech dosahovat výkonu procesorů stolních počítačů. Dosažení nárůstu výpočetního i grafického výkonu notebooků je však spojeno s vyšší energetickou náročností a tím také s většími nároky na jejich chlazení.

Výrobci notebooků se v posledním desetiletí zaměřují především na jejich rozměry a atraktivní design. V případě notebooků určených pro hraní počítačových her je též věnována pozornost zobrazovací kvalitě displeje a ergonomii klávesnice. V těchto případech však velmi často dochází k zanedbání požadavků na potřebné chlazení těchto komponent. To má za následek jejich přehřívání a následně také nadměrný akustický hluk, způsobený prouděním vzduchu u ventilátorů.

Dané téma jsem si vybral v návaznosti na předchozí zpracování části teoretické kapitoly své bakalářské práce, jejího závěru a také kvůli mému zájmu o obor informačních technologií. Druhým důvodem pro volbu tohoto tématu bylo zjištění příčin, proč výrobci notebooků po realizaci funkčních řešení od tohoto konceptu upustili.

V teoretických východiscích diplomové práce jsou popsány základní fyzikální principy přenosu tepla, vlastností chladících médií a seznámení se s parametry mikroprocesorů důležitých pro návrh chlazení. Dále jsou popsány principy pasivního a aktivního chlazení notebooků. Kapitola vodního chlazení je přizpůsobena pro použití v notebookech. Následně jsou popsány materiály používané k výrobě komponent vodního chlazení a jejich jednotlivé charakteristiky. Praktická část práce se zabývá návrhem vodního chlazení vybraného notebooku a vlastní výrobou některých částí. Poté je popsána výsledná kompletace s celkovým otestováním funkčnosti vodního okruhu. V závěrečné části diplomové práce je věnována pozornost porovnávání naměřených hodnot aktivního a vodního chlazení daného notebooku podle vybraných kritérií. Ty jsou následně vyhodnoceny.

## 2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je návrh vodního okruhu chlazení notebooku a výběr jednotlivých komponent včetně jejich úpravy. Následná realizace funkčního modelu chlazení pro využití uvnitř notebooku, jeho odzkoušení a porovnání s původním chlazením.

## 3 Metodika práce

V úvodu teoretické části jsou popsány typy šíření tepla spolu s tepelnou vodivostí materiálů používaných k výrobě komponent chlazení. V další části je popsána měrná tepelná kapacita s ohledem na výběr vhodného přenosového média, sloužícího k odběru tepla. Následuje charakteristika parametrů procesorů (CPU) a grafických karet (GPU). Zde je pozornost věnována především problematice generovaného tepelného výkonu, jeho obecných definic a výkladů jejich parametrů jednotlivými výrobci mikroprocesorů. Dalším tématem je pasivní a aktivní chlazení, kde jsou popsány jejich funkční principy a části. Závěr teoretické části práce je věnován vodnímu chlazení, popisu jeho jednotlivých komponent s důrazem na jejich parametry.

Praktická část se zabývá konkrétním návrhem vodního chlazení uvnitř vybraného notebooku. Nejprve je provedena simulace proudění v jednotlivých částech vodního okruhu a následně jsou navrhovány komponenty, zajišťující vhodné spojení a průtok chladicí kapaliny navrženým okruhem. Poté je popsána výroba částí vodního okruhu na základě výsledků simulací. Následuje jejich kompletace do funkčního celku, včetně popisu nedostatků a závad, způsobených použitými materiály i technologickým postupem. V poslední části je uveden postup měření aktivního a pasivního chlazení notebooku, včetně výkonu použitých vodních čerpadel a jeho vliv na teploty ve vodním okruhu.

## 4 Teoretická východiska

Ke správnému porozumění dané problematiky je důležité se seznámit s pojmy používanými v oboru výpočetní techniky. Dále je podstatné jejich objasnění, popis jednotlivých komponent a funkčních principů.

### 4.1 Typy šíření tepla

Šíření tepla je forma přenosu energie mezi zdrojem tepelné energie a ovlivňovaným objektem. Standardně jsou rozlišovány tři základní typy šíření tepla.

#### 4.1.1 Šíření tepla vyzařováním

Pro šíření tepla vyzařováním neboli radiací není zapotřebí žádné látky k vedení. Podstatou radiace je tepelný pohyb molekul a atomů tělesa. Tepelná energie je vyzářena do okolního prostředí v podobě infračerveného záření. Jedná se o druh elektromagnetického záření, jenž je závislý na teplotě tělesa. Šíření tepla radiací je ovlivněno spolu s hlavními faktory teploty a druhu materiálu, také barvou zahřívaného tělesa. Nejlépe teplo vyzařuje černá barva, ale vůči druhu materiálu je to zanedbatelná hodnota. Použití černé barvy u notebookových chladičů z estetických důvodů je v rozporu s její funkcí, neboť působí spíše jako izolant s ohledem na její nízkou tepelnou vodivost. Účinnost chlazení může být v tomto případě nižší, než s původním měděným chladičem (bez aplikace barvy). [1; 2]

#### 4.1.2 Šíření tepla prouděním

Při zahřívání kapaliny či plynu dochází k rozpínání a zároveň snižování jejich hustoty. Chladnější kapalina nebo plyn mají vyšší hustotu, pohybují se jednotlivými vrstvami okolí směrem dolů. Teplejší vrstvy tekutiny či plynu jsou vytlačovány směrem vzhůru, přitom předávají energii od teplých do studených míst. [2]

Konvencí je tepelná energie odváděna přes žebra pasivní části chladiče za pomoci proudění chladicího média. Výhradním chladicím médiem v případě notebooků je vzduch a pouze ve výjimečných případech je použita voda. U stolních počítačů je chladicím médiem vzduch

i voda. Proudící vzduch je možné nalézt u všech typů chladičů. Vlivem rozdílných teplot může docházet i k nepatrnému proudění vzduchu v okolí chladiče, který předává teplo. U konvekce je nutná komponenta, která zajistí proudění chladicího média. V případě aktivního chlazení je používán ventilátor, v případě vodního chlazení pumpa. Příliš vysoká rychlost proudění může způsobit nedostatečné předávání tepla. To se týká vzduchového i vodního chlazení. [1]

#### 4.1.3 Šíření tepla vedením

V případě kondukce je teplo šířeno kmitajícími částicemi uvnitř materiálu. Při pohybu těchto částic dochází k nárazu jedné částice do druhé a tím k předání kinetické energie. V kovových vodičích je přenos tepla vedením zprostředkován především jejich volnými elektrony. Vyšší teplota látky způsobuje rychlejší kmitání částic. Při tomto způsobu přenosu tepelné energie je potřebné zajistit dostatečný fyzický kontakt mezi součástkou, která generuje teplo a pasivním chladičem. Tento děj probíhá samostatně i v pasivním chladiči. [1; 3]

*„Vedení si lze představit např. na kovové tyči délky  $d$ , na jejichž koncích je udržován stálý teplotní rozdíl  $T_2 - T_1$ . Předpokládejme, že teplota klesá rovnoměrně od teplejšího konce k chladnějšímu. Výraz  $\frac{T_2 - T_1}{d}$  značí teplotní spád (teplotní gradient). Teplo  $Q$ , které projde za těchto podmínek libovolným průřezem  $S$  tyče za dobu  $\tau$ , je rovno:  $Q = \lambda S \frac{T_2 - T_1}{d} \tau$ , kde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti ( $[\lambda] = W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ).“ [3]*

Tepelná vodivost je schopnost materiálu přenášet teplo. Je to rychlost, kterou teplo proniká od ohřáté části materiálu do druhé, chladnější. Tepelná vodivost materiálu je závislá především na součiniteli tepelné vodivosti. Dle této hodnoty jsou materiály rozděleny mezi dobré a špatné tepelné vodiče. Čím je hodnota součinitele tepelné vodivosti vyšší, tím je daný materiál lepším tepelným vodičem. Nejlepší tepelnou vodivost mají kovy (viz. *Tabulka 1*), přičemž nejpoužívanějšími materiály na výrobu chladičů jsou měď a hliník. Naopak voda a vzduch mají nízkou tepelnou vodivost a využívají se při chlazení jako chladicí médium. [2]

Tabulka 1. Hodnoty tepelné vodivosti materiálů [2]

Materiál	$\lambda$ [W·m-1·K-1]
Vzduch	0,024
Voda	0,5
Hliník	229
Měď	395

## 4.2 Měrná tepelná kapacita

„Tepelnou kapacitu definujeme vztahem  $c = \frac{Q}{\Delta t}$ , [C] = J.kg<sup>-1</sup>. Měrná tepelná kapacita se pak definuje vztahem  $c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m \cdot \Delta t}$ , kde  $m$  je hmotnost tělesa. Platí [c] = J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. Z tohoto vztahu pro teplo dodané tělesu vyplývá  $Q = cm\Delta t$ .“ [4]

Měrná tepelná kapacita udává, kolik tepelné energie je třeba předat jednomu kilogramu materiálu, aby se jeho teplota zvýšila o jeden stupeň Kelvina (Celsia). Každá látka má rozdílnou hodnotu (viz. Tabulka 2). Na základě pokusů i přesných laboratorních měření se při změně teploty látky mění její měrná tepelná kapacita. Při snižování teplot dochází k jejímu mírnému poklesu. Z tohoto důvodu je udávaná hodnota měrné tepelné kapacity vztažena k určité teplotě. Největší měrnou tepelnou kapacitu z běžně dostupných látek má voda. To jí předurčuje k použití jako vhodné chladicí médium. Při ohřátí vody o jeden stupeň Celsia je zapotřebí přibližně čtyřnásobek energie oproti vzduchu a u mědi téměř jedenácti násobek. [4]

Tabulka 2. Měrná tepelná kapacita látek při 20 °C [5]

Materiál	c [J·kg-1·K-1]
Voda	4182
Olej	1480
Vzduch	1005
Hliník	895
Měď	385

## 4.3 Mikroprocesory

Mikroprocesor je součástka, navržena za účelem vykonávání aritmetických a logických operací. Mezi tyto operace patří i přidávání, odečítání a porovnání dvou čísel. Tyto operace jsou výsledkem sady instrukcí, které jsou součástí návrhu mikroprocesoru. [6]

### 4.3.1 Centrální procesorová jednotka

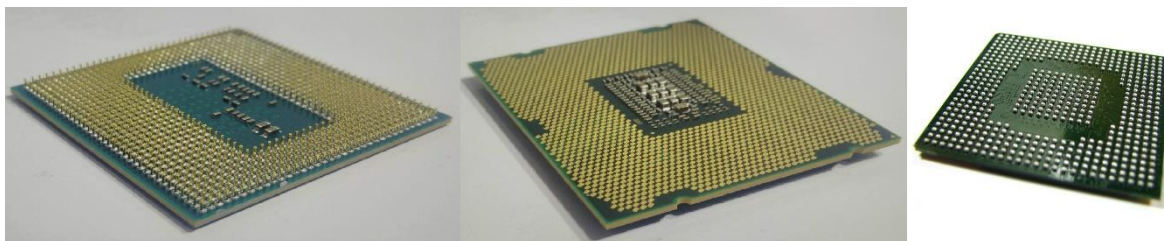
Central Procesor Unit neboli CPU je integrovaný obvod, složený z logických obvodů. Jeho úkolem je zpracování strojových instrukcí, které řídí činnost počítače či notebooku. Mezi čtyři základní funkce procesoru patří čtení, dekodování, provedení a zápis instrukce. Procesor je složený z aritmetické logické jednotky (ALU), jejíž hlavní úlohou je provádění aritmetických a logických operací. Dále matematický koprocesor (FPU) pracující s čísly, které mají plovoucí desetinnou čárku. Mimo to zahrnuje registry obsahující instrukce a data z mezivýpočtů ALU. Poslední částí jsou vrstvy vyrovnávacích pamětí s označením L1 a L2, a v případě vícejádrových procesorů také L3 (cache). Tyto paměti slouží k uložení prováděných instrukcí a dat při zpracování programu procesorem. Hlavním důvodem využití těchto pamětí je snížení latence (zpoždění) při přístupu k datům (oproti použití konvenčních pamětí RAM). Většina dnešních procesorů obsahuje více výpočetních jader, to znamená, že integrovaný obvod obsahuje dva a více procesorů. Cílem je zvýšit výpočetní výkon, snížit spotřebu a zvýšit efektivitu při zpracování více úloh najednou. Termín „procesor“ je nejčastěji používán ve spojení s termínem centrální procesorové jednotky, přestože počítač či notebook obsahují i další procesory, jako například grafický procesor. [7; 8]

Důležité parametry CPU jsou voleny s ohledem na jejich cílové použití v osobních počítačích, notebookech a serverech. Mezi tyto parametry patří především frekvence jádra procesoru (jednotky GHz), počet jader procesoru (v případě notebooků od 2 až po 6 jader) a velikost vyrovnávací paměti (cache). Dalším parametrem je zvýšení efektivitu zpracování dvou paralelních instrukcí jedním jádrem. Předními výrobci procesorů pro notebooky jsou firmy Intel a AMD. Firma Intel k tomuto využívá svoji technologii Hyperthreading a firma AMD technologii Simultaneous MultiThreading. Dalšími technologiemi, které zvyšují frekvenci jader procesoru, jsou Turbo Boost (Intel) a Turbo Core (AMD). Jedním z velmi důležitých parametrů procesoru je také generovaný tepelný výkon procesoru. [9; 10; 11]

Dalším důležitým faktorem je typ fyzického spojení procesoru se základní deskou notebooku (stolního počítače). Prvním typem spojení je Pin Grid Array (PGA). Spojení je vytvořeno mezi piny na straně procesoru (viz. *Obrázek 1*) a patičí na základní desce notebooku. Výhodou této technologie je možnost výměny procesoru. V notebookech byla

využívána velmi dlouhou dobu. Nevýhodou tohoto typu socketu může být ohnutí pinů procesoru při nevhodné manipulaci. [12]

Obrázek 1. Socket typu PGA (vlevo), LGA (uprostřed) a technologie BGA (vpravo) [13]



Druhou a dodnes nejvíce používanou technologií je Ball Grid Array (BGA), odvozenou od PGA. Namísto pinů na CPU propojených do otvorů v patici procesoru, využívá mřížku napájených kuliček (viz *Obrázek 1*). Ty se po zahřátí spojí s kontakty na základní desce a poté tvoří elektricky vodivý spoj. Tato technologie je používána pro povrchové osazení integrovaných obvodů, například centrální procesorové jednotky či paměťových čipů. Výhodou tohoto spojení je snížení konstrukční výšky a celkové velikosti spoje. Nevýhodou může být přerušení spoje při zvýšeném mechanickém či tepelném namáhání a jeho následná obtížná oprava. [14]

Poslední typem spojení procesoru a základní desky je socket Land Grid Array (LGA). Hlavním rozdílem oproti PGA je použití pružných pinů v patici základní desky stolního počítače. Procesor obsahuje kontaktní plochu tvořenou jednotlivými body (viz *Obrázek 1*). Tento typ patice je používán převážně pro procesory v osobních počítačích, ale může být použit i ve výkonném notebooku. Výhodou je možnost navýšení celkového počtu bodů na kontaktní ploše. Nevýhodou tohoto typu socketu může být ohnutí či poškození pinů patice základní desky při nevhodné manipulaci. [15]

#### 4.3.2 Grafická procesorová jednotka

Graphics Processing Unit (ve zkratce GPU) je druh procesoru, optimalizovaný k vykonávání rychlých matematických výpočtů. V praktické podobě je jejich účelem především vykreslování obrázků, animací a videí. GPU je toto schopen zpracovat několikanásobně rychleji, než samotné CPU, především díky paralelní procesorové architektuře. Ta dovoluje provádět současně velké množství výpočtů v jednom okamžiku. Oproti tomu CPU operuje



na vyšší pracovní frekvenci, což umožňuje řešit základní výpočetní úlohy rychleji než GPU. Konstrukčně může být grafický procesor řešen integrací přímo v CPU, na základní desce počítače nebo na externí grafické kartě. [16]

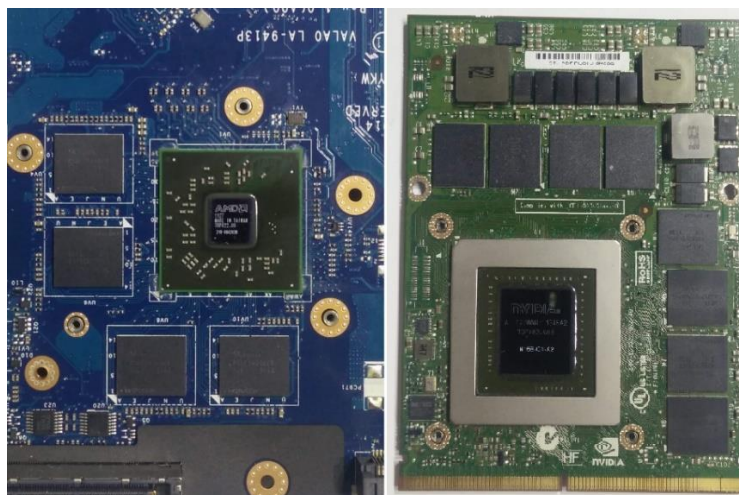
Předními výrobci GPU pro notebooky či osobní počítače jsou firmy Nvidia, AMD a Intel. Mezi hlavní parametry GPU patří frekvence jader procesoru, které se pohybují ve stovkách MHz až jednotkách GHz. Pro zvýšení frekvence je stejně jako v případě CPU použito přetaktování, které je nazýváno Boost. Další parametrem GPU je počet integrovaných stream procesorů. Výhodou oproti CPU jádrům je jejich mnohonásobně vyšší počet (v řádu jednotek tisíců). Dalším parametrem některých GPU je použití integrovaných grafických pamětí (AMD). Neméně důležitým parametrem je celková spotřeba elektrické energie grafické karty při maximálním výpočetním zatížení. Pohybuje se většinou v řádech desítek až stovek wattů. Pro stejnou generaci GPU platí, že celkový výkon grafické karty je úměrný jejímu příkonu. Dále tato hodnota slouží ke stanovení celkového potřebného výkonu napájecího zdroje počítače. [17; 18; 19]

Grafické karty jsou rozděleny do dvou kategorií: integrované a dedikované. Integrované obsahují grafický čip uvnitř CPU. Jsou používány převážně v notebookech a stolních počítačích, kde není kladen důraz na vysoký grafický výkon (kancelářská práce). Využívá výhradně operační paměť počítače, která je však několikanásobně pomalejší než paměť na grafické kartě. Druhým typem jsou dedikované grafické karty. GPU je integrován spolu s grafickou pamětí na vlastní kartě, nebo jsou součástí základní desky notebooku. Výhodou tohoto řešení je vyšší grafický výkon spojený s nárůstem spotřeby elektrické energie. S tím souvisí potřeba návrhu vhodné konstrukce chlazení notebooku. [19]

Stejně jako v případě CPU jsou GPU navrženy pro umístění přímo na desku s tištěnými spoji. Nejvíce používaným typem spojení je BGA, kdy GPU i paměti jsou umístěny přímo na základní desce notebooku (viz. *Obrázek 2*). Dalším řešením je použití slotu Mobile PCI Express Module zkráceně MXM (viz. *Obrázek 2*). Ten je standardem pro připojení dedikované grafické karty v notebooku nebo All-in-One počítačích. I v tomto případě je spojení GPU a grafické paměti k desce s tištěnými spoji řešeno technologií BGA. Aktuální třetí generace slotu je vyráběna ve dvou verzích. První verze je MXM-III A s rozměry 82 mm na šířku (strana s piny) a 70 mm na délku, která je používána především v 15,6“ notebookech a pro méně výkonné grafické čipy s maximální spotřebou elektrické energie 55 W. Druhou

verzí je MXM-III B se stejnou šířkou, ale délka je zvětšena na 105 mm. Maximální spotřeba elektrické energie je dimenzována na 200 W. Nachází využití především v herních notebookech a mobilních pracovních stanicích při použití nejvýkonnějších GPU a většího počtu paměťových čipů. Hlavní předností MXM slotu je vedle možnosti snadné výměny modulu grafické karty také kompatibilita verzí MXM-III B za MXM-III A. [20]

Obrázek 2. Grafická karta osazená pomocí technologie BGA (vlevo) a typ MXM-III B (vpravo)



#### 4.3.3 Tepelný výkon procesoru

Tepelný výkon procesoru tzn. Thermal Design Power (TDP) je hlavní parametr CPU, dle kterého je navrhováno chlazení notebooků a počítačů. Slouží především pro určení potřebné termální kapacity chladičů procesorů tak, aby byl zaručen jejich definovaný výkon. Hodnota TDP je uváděna ve wattech. Nejedná se však o spotřebu elektrické energie, ale o tepelný výkon CPU. V případě největších výrobců procesorů pro stolní počítače a notebooky se definice liší. [21; 22]

Firma Intel jej definuje, jako průměrný tepelný výkon ve wattech, který CPU vytvoří na základní frekvenci při zátěžovém výpočetním testu všech jader. Intel též garantuje, že jím vyráběné procesory na dané frekvenci při definovaném výkonu nepřesáhnou uvedenou hodnotu TDP. Část generované tepelné energie je odváděna skrze patici procesoru na základní desce. Z tohoto vyplývá, že potřebná tepelná kapacita chladiče může být nižší než hodnota TDP. Ve většině případů hodnota generované tepelné energie a spotřeba elektrické energie znamená stejnou věc. Tedy jaké nejvyšší spotřeby elektrické energie dosahuje

procesor při maximálním výpočetním zatížení. Hodnotu maximální spotřeby elektrické energie (nikoliv tepelné energie), lze upravovat prostřednictvím nastavení vstupních a výstupních hodnot základní desky počítače (BIOS firmware). [22]

Velmi často je zaměňováno TDP Intel procesorů za maximální hodnotu generovaného tepla, které je nutné pomocí chladiče odebrat. Pokud je základní frekvence procesoru přetaktována pomocí Turbo Boost Technology, maximální TDP je vyšší. Při nejvyšší možné zátěži CPU s použitím technologie Turbo Boost (maximální frekvence všech jader procesoru) není hodnota TDP na stránkách výrobce uvedena. Tato hodnota vychází z parametrů, uvedených ve specifikačním listu (datasheetu) výrobce pro danou generaci procesorů. Těmito parametry jsou „Turbo Time Parameter (Tau)“, „Power Limit 1“ (PL1) a „Power Limit 2“ (PL2). Tau je časové rozpětí, během kterého procesor pracuje ve stavu PL2, před návratem do stavu PL1. Hodnota Tau není závislá na spotřebě elektrické energie, ale na teplotě procesoru. PL1 je dlouhodobá očekávaná spotřeba elektrické energie procesorem. Pro všechny účely a záměry je PL1 obvykle definována jako TDP procesoru. PL2 je krátkodobá maximální spotřeba elektrické energie procesorem. Tato spotřeba je vyšší než v případě PL1 a procesor pracuje v tomto režimu, pokud je vyžadován větší výpočetní výkon. Stav PL2 je tedy dosaženo až při použití Turbo Boost technologie (zvýšením základní frekvence jader CPU). Výpočet hodnoty stavu PL2 je dán násobkem hodnoty stavu PL1 konstantou 1,25. Např. procesor Intel Core i7-8700K s hodnotou TDP 95 W má základní frekvenci 3,2 GHz. Definovaná frekvence při Turbo Boost tohoto procesoru na jedno jádro je 4,7 GHz, na všechny výpočetní jádra společně však 4,3 GHz. Maximální hodnota TDP procesoru dosahuje tedy ve stavu PL2 hodnoty 118,75 W. [23; 22; 24]

Firma AMD oficiálně neuvádí definici Thermal Design Power. Dle dostupných informací je TDP specifikováno odlišným způsobem než definuje firma Intel. Výpočet TDP firmou AMD je definován *Vzorec 1*. Rozdíl teploty procesoru při maximálním výpočetním výkonu a teplotou procesoru v klidovém stavu bez výpočetní zátěže dělený hodnotou tepelné kapacity chladiče, definovaný firmou AMD. [21]

#### Vzorec 1. Výpočet TDP pro procesory AMD [21]

$$TDP = \frac{\text{Load Temperature in Celsius} - \text{Idle Temperature in Celsius}}{\text{Thermal Capacity of Cooler}}$$

Měření TDP probíhá v režimu CPU Turbo Core (nejvyšší možné výpočetní zatížení všech jader procesoru), při kterém je dosaženo maximální spotřeby elektrické energie. Například CPU AMD Ryzen 7 2700X dosahuje maximální teploty při plném zatížení 62 stupňů Celsia a v klidovém režimu 42 stupňů Celsia. V případě použití chladiče Wraith Max, dodávaného přímo výrobcem AMD, spolu s CPU je jeho tepelná kapacita 0,189 C na Watt. Výsledné TDP CPU je přibližně 105 W. Definice ovšem obsahuje dvě nepřesnosti. První je ta, že teplota procesoru při maximálním výpočetním zatížení může být ovlivněna změnou průtoku vzduchu skrze chladič. Druhou nepřesností může být použití chladiče s odlišnou tepelnou kapacitou, která má také vliv na výslednou hodnotu TDP. Příkladem je použití vodního chlazení s hodnotou 0,400 C na Watt (vysoká tepelná kapacita). Výsledný tepelný výkon procesoru bude tedy snížen na hodnotu 50 W. Pro notebookové procesory se obdobná definice výpočtu TDP neuvádí, neboť není výrobcem procesorů AMD definován přesný typ chladiče CPU s blíže specifikovanou hodnotou tepelné kapacity. [24; 21; 25]

#### 4.3.4 Tepelný výkon grafického procesoru

V případě GPU nejsou výrobci uváděny hodnoty TDP, jako v případě výrobců procesorů. Pro grafické karty je používán termín TGP (Total Graphic Power), udávající hodnotu maximálního příkonu elektrické energie, kterou napěťový zdroj pro dedikovanou grafickou kartu musí splňovat. Firma Nvidia definuje pro jimi vyráběné grafické karty pouze tento maximální příkon. Firma AMD tento parametr uváděla pouze u starších modelů grafických karet. Výrobci nereferenčních desktopových grafických karet (výroba grafické karty není realizována přímo výrobcem GPU), uvádějí stejnou hodnotu spotřeby elektrické energie, ale tepelný výkon uveden není. Hodnoty TDP pro grafické karty používané v noteboocích jsou dostupné pouze z neoficiálních zdrojů. Např. pro grafickou kartu Nvidia GeForce GTX 1060 (mobile) je výrobcem Nvidia uvedena hodnota TGP od 60 do 80 W. Dle neoficiálních zdrojů pro tuto grafickou kartu v MXM provedení je TGP 78 W a TDP GPU je 65 W. [17; 26; 27; 28; 29]

## 4.4 Pasivní a aktivní chlazení

Komponenty uvnitř notebooku vytvářející teplo, je nezbytné udržovat na provozních teplotách definovaných výrobcem, s ohledem na dosažení jejich správné funkčnosti. Toho je možné dosáhnout použitím vhodného chlazení.

### 4.4.1 Pasivní chlazení

Pasivní chlazení počítače je realizováno chladičem, který je obklopen chladicím médiem (nejčastěji vzduch). Ty slouží k odvodu tepla generovaného CPU případně GPU. Pasivní chlazení neobsahuje žádné pohyblivé části a nevytváří žádný akustický hluk. Je často používaným řešením s malým počtem negativ. Hlavní výhodou tohoto typu chlazení je jeho vysoká spolehlivost, bezúdržbovost a bezpečnost po celou dobu provozu zařízení. Mezi nevýhody pasivního chlazení patří (s ohledem na zachování dostatečného odvodu tepelného výkonu) také jeho rozměry. To platí především u výkonných notebooků, kde množství generovaného tepelného výkonu CPU i GPU dosahuje vysokých hodnot. Pasivní průtok vzduchu skrze žebrování chladiče je velmi malý. V uzavřené konstrukci takového notebooku se při jeho provozu teplota vzduchu uvnitř postupně zvyšuje a tím dochází k nedostatečnému ochlazení chladiče. [1]

### 4.4.2 Materiál chladičů

Nejpoužívanějšími materiály pro výrobu chladičů jsou hliník a měď. Hliník má oproti mědi dvojnásobně nižší tepelnou vodivost (viz. *Tabulka 1*). Při velkém výpočetním zatížení CPU a GPU dochází ke generování vysokého tepelného výkonu, a proto je vhodné zvolit jako materiál chladiče měď. Ta má oproti hliníku až třikrát vyšší hustotu. Hmotnost chlazení je v tomto případě méně významná a důraz je kladen na vyšší chladicí účinek. Konstrukce chladiče je tvořena tělem (základnou) a žebry (žebrováním). Materiálem pro základnu chladiče bývá většinou měď, a žebra (konstruovaná k optimálnímu předávání tepelného výkonu médiu) jsou vyráběna nejčastěji z hliníku. Hliník je také používán na výrobu šasi notebooků, kde zároveň slouží jako pasivní chladič. Hlavním představitelem této koncepce výroby je firma Apple. [1]

### 4.4.3 Heatpipe

Heatpipe je tvořena měděnou trubičkou s vnitřní houbovitou nebo drážkovitou strukturou (Obrázek 3). Je hermeticky uzavřená. Uvnitř trubičky proudí de-ionizovaná voda, do které bývá přidán argon či vybraný druh alkoholu. Přesné složení kapalin v heatpipe výrobci záměrně neuvádějí. V místě generování tepla se kapalina uvnitř trubičky zahřívá, dochází k jejímu vypařování, a v plynném skupenství proudí na chladnější konec trubičky. Zde se ochladí a změní své skupenství zpět na kapalné. Odtud proudí k teplejšímu konci, kde se opět zahřeje a cyklus pokračuje od začátku. V heatpipe je podtlak, a tak dochází ke změně skupenství při nižších teplotách. [1]

Obrázek 3 Heatpipe (vlevo) a vnitřní drážkovitá struktura (vpravo)



Cílem používání heatpipe je odvést generované teplo od procesoru a grafické karty do míst kde je možné jej lépe odebrat (žebrování chladiče). Hlavní výhodou je vysoká tepelná vodivost, až tisíci násobně vyšší než u mědi. Rychlost přenášení tepelné energie uvnitř heatpipe se blíží rychlosti zvuku. Následné odebírání tepla z trubičky zajišťuje chladič z mědi nebo hliníku, opatřený žebrováním. Nejčastěji je nalisován nebo napájen přímo na heatpipe. Při jejím ohnutí dochází ke snížení tepelné vodivosti. Výhodou je nezávislost na poloze, tedy zda je svisle nebo vodorovně. To je zapříčiněno houbovitou strukturou, kde se projevuje kapilární efekt a zajišťuje proudění kapaliny i proti gravitační síle. [1]

Technologie heatpipe je vždy používána u výkonných notebooků. Při dnešních požadavcích na co nejmenší rozměry notebooků není dostatek prostoru pro chladič nad procesorem. Proto je obvykle heatpipe na straně CPU a GPU spojena přímo s chladičem. Zakončení trubičky je nejčastěji realizováno do zadní nebo boční části notebooku. Na jejím konci je žebrování

chladiče ochlazováno proudem vzduchu od ventilátoru. U výkonných notebooků může být k přenosu tepla použito až tři heatpipe. [1]

#### 4.4.4 Aktivní chlazení

Pro zajištění dostatečné cirkulace vzduchu skrze chladič lze doplnit pasivní chlazení ventilátorem. V tomto případě se jedná již o aktivní chlazení. Ventilátor zvyšuje průtok vzduchu přes žebrování chladiče a tím je chlazení účinnější. Při použití ventilátoru však dochází vlivem průtoku proudícího vzduchu ventilátorem i chladičem ke zvýšení hodnoty akustického hluku zařízení. Dalším možným zdrojem akustického hluku může být použité konstrukční řešení ložisek ventilátoru. [1]

#### 4.4.5 Ventilátor

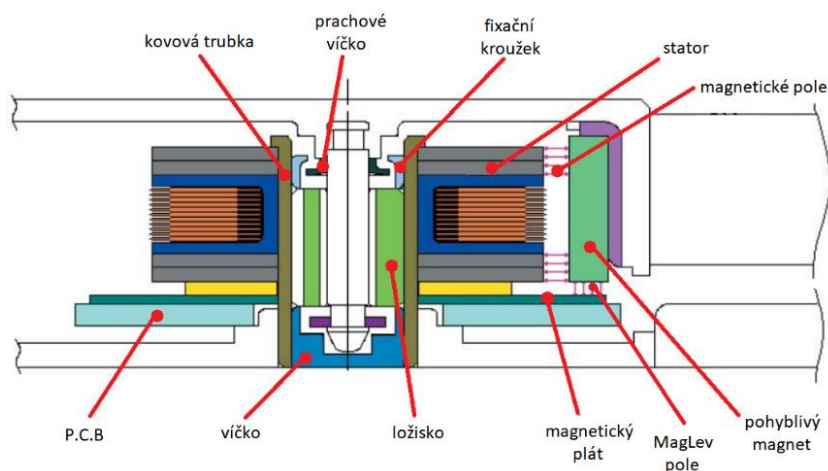
Ventilátory, používané pro chlazení v notebookech, jsou axiální lopatkové, napájené stejnosměrným napětím 5 V. Jsou tvořeny statorom (pouzdro), rotorem (hřídel, na které jsou umístěny lopatky) a elektronikou, jež slouží k řízení otáček elektromotoru. Pro zajištění dlouhodobé správné funkčnosti ventilátoru je velmi důležitou částí ložisko. Ložiska existují v různých typech a od toho se odvíjí jejich charakteristické vlastnosti. Typ ložiska je většinou možné nalézt na výrobním štítku ventilátoru. Pokud štítek tuto informaci neobsahuje, je potřeba ji dohledat v produktovém listu výrobce, případně ventilátor rozebrat. U kvalitních ventilátorů se při zvýšení jejich otáček výrazně nezvyšuje akustická hluchost. [1]

Mezi nejvíce používaná ložiska ventilátoru v notebookech patří kluzná (Sleeve bearing), kuličková (Ball bearing) a fluidní (Fluid bearing). V případě kluzných ložisek je prostor mezi uložením a hřídelí vyplněn vazelínou. Pohyblivá část klouže v pouzdra vyplněném vazelínou. Nevyváženost rotoru s lopatkami spolu s nerovností povrchu pouzdra statoru způsobují jeho nízkou životnost v porovnání s níže uvedenými typy. Hluchost ložiska je závislá také na jeho teplotě, a proto není vhodné jej používat přímo na chlazení CPU a GPU, kde teploty přesahují 40 stupňů Celsia. Druhým typem jsou kuličková ložiska složená ze dvou prstenců (vnitřní a vnější). Mezi nimi jsou uloženy hladké kuličky mazané vazelínou přenášející rotující pohyb. Výhodou oproti kluzným ložiskům je menší náchylnost na změnu teploty, nižší tření, a tedy jeho vyšší životnost. Nevýhodou je vyšší akustický hluk

způsobený více prvky ložiska. Fluidní ložiska jsou z výše uvedených nejvíce používaná a pracují na obdobném základu, jako kuličková. Kuličky jsou nahrazeny olejem, který funguje na principu kapilárních sil mezi olejem, pouzdrem z jedné strany a ložiskem ze strany druhé. Výhodou je, že při otáčení rotoru nedochází ke styku pevných částí, což má za následek jen velmi malé opotřebení a žádný akustický hluk ložiska. Další výhodou je vysoká odolnost vůči otřesům, jenž jsou tlumeny olejovým filmem mezi hřídelkou rotoru a pouzdrem statoru. [1; 30]

Ventilátor s magnetickým ložiskem se příliš od ostatních typů neliší. Hlavním rozdílem je magnetické uložení, které zajišťuje axiální souosost rotoru a statoru (viz. *Obrázek 4*). Zajištění rotoru při změně polohy zajišťuje fixační kroužek a víčko. Výhodou tohoto typu ventilátoru je nezávislost na teplotě včetně vysoké životnosti, jež je zaručena neopotřebováváním a nezanášením ložisek. Tento typ ventilátorů je převážně používán u notebookových pracovních stanic, kde je potřeba dlouhodobá životnost v řádech let. [1]

Obrázek 4. Princip ventilátoru s ložiskem typu MagLev [1; 31]



Důležitým parametrem ventilátorů je počet otáček za minutu neboli RPM. V případě stolních počítačů jsou ventilátory rozdělovány na pomaloběžné a vysokootáčkové. Otáčky pomaloběžných ventilátorů se pohybují v rozmezí 600-1200 a vysokootáčkové dosahují až 4000 RPM. U notebooků to může být až 6000 otáček za minutu. [1]



#### 4.4.6 Teplovodivá pasta

Při montáži chladiče na mikroprocesor vzniká mezi těmito komponentami velmi malá mezera, která je vyplněna vzduchem. V tomto prostoru působí vzduch jako izolant z důvodu nízké tepelné vodivosti viz. *Tabulka 1*. Důležitým parametrem je také přesnost a čistota styčných ploch. Pro zvýšení přenosu tepla mezi CPU, GPU a chladičem je zapotřebí aplikovat teplovodivou pastu. Termální pasta neslouží přímo ke chlazení, a proto je nutné dbát na její správné množství při aplikaci. Má též mnohem nižší tepelnou vodivost v porovnání s mědí a hliníkem. [1]

Teplovodivé pasty jsou rozdělovány podle složení. Nejvíce je používána pasta na bázi silikonu. Není elektricky vodivá a její tepelná vodivost dosahuje až  $8,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Nevýhodou pasty na silikonové bázi je nestálost při dlouhodobém tepelném namáhání, kdy dochází k jejímu vysychání a tvrdnutí. Poté již neplní svůj účel a působí jako izolant. [1; 32]

Druhým typem teplovodivých past jsou metalické s obsahem stříbra nebo mědi. Jejich výhodou je velmi vysoká tepelná vodivost až  $38,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a časová stálost při tepelném namáhání. Rozdíl teploty při aplikaci nové termální pasty na CPU nebo GPU mezi metalickou a nejlepší silikonovou pastou je až  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při dlouhodobém tepelném namáhání se tato hodnota výrazně zvyšuje. Nevýhodou může být elektrická vodivost, která při špatné aplikaci pasty může způsobit zkrat na komponentě notebooku či počítače. [1; 33; 34]

#### 4.4.7 Teplovodivý pad

Teplovodivý pad, častěji znám pod označením „Thermal pad“, je používán za totožným účelem, jako teplovodivá pasta. Pad většinou nenahrazuje pastu, ale je používán především na chlazení paměťových čipů, cívek, rezistorů a stabilizátorů. Jsou případy, kdy je termální pad používán na vyplnění mezery mezi chladičem a CPU nebo GPU, především u méně výkonných notebooků. Hlavním důvodem jeho použití je větší prostor mezi chladičem a zdrojem tepla, kde tato mezera může být až 3 mm. Pro výrobu termálních padů jsou obvykle používány směsi na silikonové nebo grafitové bázi. Kvalitní teplovodivé pady, které nejsou elektricky vodivé, dosahují tepelné vodivosti  $6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . V případě grafitových teplovodivých padů je tato hodnota od 25 do  $45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , nevýhodou je elektrická vodivost. [35; 36]

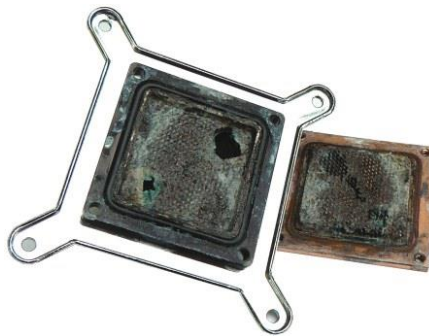
## 4.5 Vodní chlazení

Vodní chlazení je uzavřený systém, který slouží stejně jako technologie heatpipe, k odvodu tepla od jeho zdroje pomocí cirkulace kapaliny v chladicím okruhu. Hlavními prvky chladicího (vodního) okruhu jsou čerpadlo, vodní blok, výměník tepla, propojovací hadičky, případně expanzní nádoba. Chladicí kapalina protéká v okruhu čerpadlem skrze propojovací hadičky do vodního bloku, tam odebere teplo od CPU či GPU. Dále protéká výměníkem tepla, kde předává nahromaděné teplo. Výměník následně toto teplo odvádí aktivním chlazením do okolního prostoru. Odtud chladicí kapalina proudí do expanzní nádoby nebo zpět do čerpadla. Chladicí výkon soustavy je závislý na více faktorech od průtoku čerpadla, přes schopnost předávat teplo vodním blokem, odvodu převzatého tepla radiátorem, až po celkové konstrukční řešení chladicího okruhu. K důležitým vlastnostem vodního chlazení patří také jeho akustická hlučnost, odvíjející se od použitých ventilátorů a čerpadla. [1]

### 4.5.1 Materiály

Nejvíce používaným materiálem pro výrobu vodních bloků je měď, především kvůli svým fyzikálním vlastnostem. Její vyšší hustota nemá příliš vliv na hmotnost vodního bloku s ohledem na jeho malou velikost. Při volbě použitých materiálů k vodnímu chlazení je žádoucí, aby jeho části byly vyrobeny ze stejného materiálu. Při použití mědi a hliníku společně dochází k elektrochemické reakci, která způsobuje galvanickou korozi hliníku (Obrázek 5). Například u hliníkového tepelného výměníku s tenkými chladicími kanálky může dojít k jeho perforaci. Z toho důvodu jsou často používány měděné radiátory s hliníkovým žebrováním. Přesto je možné při použití speciální chladicí kapaliny použít ve vodním okruhu společně měď i hliník. [1; 37; 38; 39]

Obrázek 5 Galvanická koroze vodního bloku [37]



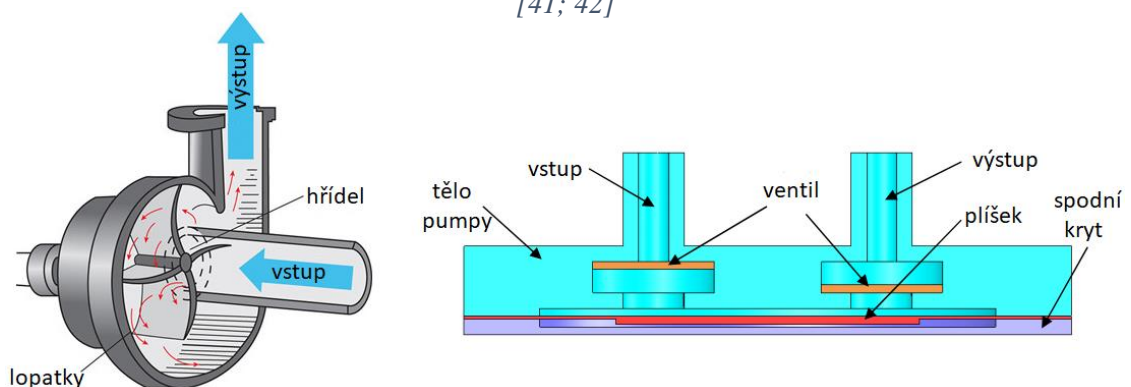
## 4.5.2 Vodní čerpadlo

Důležitým prvkem vodního okruhu je vodní čerpadlo (pumpa), jenž má vliv na celkovou účinnost a hlučnost. Vstupní otvor čerpadla slouží k nasávání vody, přes druhý, výstupní otvor proudí kapalina do vodního okruhu. Umístěním čerpadla za expanzní nádobu a výměník tepla prodloužíme jeho životnost. Ta může být snížena také průtokem teplé vody a jeho nadměrným zahříváním. [1]

Výkon vodního čerpadla je definován průtokem uváděným v litrech za určitý časový úsek, nejčastěji za jednu hodinu. Druhým parametrem je maximální výška vodního sloupce, do které je čerpadlo schopno vodu vytlačit. Tento parametr je důležité zohlednit při návrhu vodního chlazení především u stolních počítačů (výšku skříně). V případě notebooku se jedná o jednotky milimetrů a můžeme tento parametr zanedbat. Při výběru čerpadla je zapotřebí správně navrhnout také jeho průtok. Při vysokém průtoku chladicí kapaliny může docházet k jeho značnému zahřívání, naopak při nízkém průtoku nebudou komponenty dostatečně ochlazovány. Dalším kritériem je způsob elektrického napájení vodního čerpadla. Nejčastěji jsou v počítačích používána vodní čerpadla pro stejnosměrné napětí 12 V. [1]

Odstředivé čerpadlo je nejčastěji používaným typem pro zajištění průtoku vody ve vodním chladicím okruhu. Jeho principem je využití odstředivé síly, která působí na kapalinu. Hřídel z elektrického motoru je spojena se zahnutými lopatkami, které se rozbíhají od jejího středu a předávají kapalině rotační pohyb. Poté je kapalina vytlačena výstupním otvorem (viz. *Obrázek 6*). Výhodou je vysoký průtok až jednotek tisíců litrů za hodinu a velmi nízký akustický hluk. Nevýhodou může být nižší sací efekt a vhodnost použití pro kontinuální provoz. [40]

Obrázek 6 Princip odstředivé pumpy (vlevo) a piezoelektrické membránové pumpy (vpravo) [41; 42]



Druhým typem je piezoelektrická membránová pumpa. Ta se skládá ze vstupu, výstupu, ventilů, hlavního rámu, piezoelektrického plíšku a spodního krytu. Principem jsou vibrace plíšku, pomocí kterého je při pohybu dolů kapalina nasávána a při pohybu nahoru vytlačována. Membránové pumpy jsou používány z důvodu nízké spotřeby elektrické energie, jednoduché konstrukce, velikosti a vysoké spolehlivosti. Nevýhodou je malý průtok v jednotkách litrů za hodinu. [42]

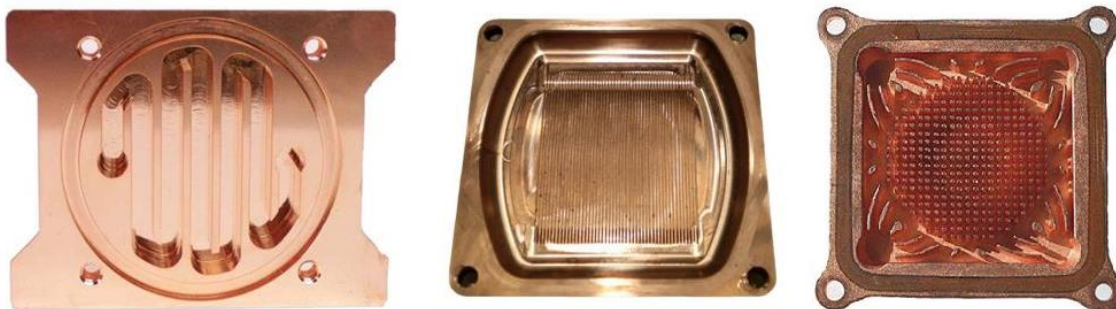
Pístomembránová čerpadla pracují na obdobném principu jako piezoelektrická. Jsou založena na střídavém pohybu membrány, která je u tohoto typu vyrobena z pryže, plastu nebo kovu. Výška zdvihu je závislá na použitém materiálu membrány. Rotační pohyb z elektromotoru je převáděn na posuvný. Při pohybu ventilu směrem dolů je nasávána kapalina do prostoru mezi sacím ventilem a membránou a pohybem ventilu nahoru je kapalina vytlačována ven. Výhodou tohoto typu, s ohledem na chlazení notebooků, jsou především jeho malé rozměry. Nevýhodou je složitá konstrukce, velmi malý průtok, hlučnost a vibrace. [43]

### 4.5.3 Vodní blok

Vodní blok je další částí chladicího okruhu. Obsahuje vstup a výstup, mezi kterými proudí chladicí kapalina. Je montován přímo na komponentu generující teplo. Vodní blok zajišťuje přenos tepelné energie mezi CPU či GPU a chladicí kapalinou v okruhu. Nahrazuje funkci chladiče. Jeho chladicí výkon závisí na použitém materiálu a vnitřním uspořádání. Jednoduché uspořádání chladicího bloku je tvořeno pouze spojovacím kanálkem mezi vstupním a výstupním otvorem. Složitější uspořádání zahrnuje varianty tvaru kanálku v podobě jednoduchého hada, hada s větším počtem ohybů nebo spirálou viz. *Obrázek 7*. Při použití čistě jednoduchého kanálku voda proudí velmi rychle a není schopna účinně odvést teplo od vodního bloku. U složitějšího vnitřního uspořádání dochází při průtoku kapaliny blokem k odporu a tím ke snížení rychlosti jejího proudění. Nejvíce používaným konstrukčním typem vodního bloku pro procesory je varianta s mikrokanálky. Důvodem použití složitějšího vnitřního uspořádání je zvětšení styčné plochy pro předávání tepla chladicí kapalině. Povrch spodní strany vodního bloku je hladký a zajišťuje kontakt s procesorem. Horní strana bloku obsahuje jemně vyfrézované kanálky (viz. *Obrázek 7*), skrze které je teplo předáváno do chladicí kapaliny. Kryt vodního bloku je obvykle vyroben

z plexiskla, dále obsahuje šroubení či trubičky sloužící k uchycení hadiček. K zabránění úniku chladicí kapaliny je mezi tělem vodního bloku a jeho krytem použito těsnění. Stejně jako u pasivního chladiče je potřeba nanést teplovodivou pastu mezi vodní blok a součástku generující teplo. [1; 44; 45]

Obrázek 7 Typy vodních bloků: typ had (vlevo), mikro kanálky (uprostřed), válce (vpravo) [45]



Pro chlazení grafické karty je možné vybrat ze dvou typů chladicích bloků. „Fullcover“ je většinou vyráběn přímo pro daný model grafické karty. Blok umožňuje kompletní chlazení grafické karty, především grafického jádra, paměti a napájecí kaskády. Druhou možností je použití univerzálního bloku, který je téměř totožný s vodním blokem pro procesory (rozdílem jsou jeho úchytné otvory). Výhodou tohoto bloku oproti fullcover typu je možnost použití na různých modelech grafických karet. Nevýhodami univerzálního vodního bloku jsou velké rozměry a nutnost pasivního či aktivního chlazení paměti a dalších komponent grafické karty. [44]

#### 4.5.4 Expanzní nádoba

Expanzní nádoba neslouží pouze jako zásobník vody, ale také ke snadnému doplnění chladicí kapaliny a odvzdušnění vodního okruhu. Přítomnost vzduchových bublinek v chladicí kapalině je nežádoucí, jelikož se snižuje schopnost chlazení vodního bloku. Při použití expanzní nádoby je objem kapaliny v okruhu větší, a to má za následek jen malé výkyvy teplot. V uzavřeném chladicím okruhu je nutné doplňovat kapalinu, protože může docházet k jejímu úniku přes spoje a stěny hadiček. Expanzní nádoba by měla být umístěna před vodním čerpadlem. [1; 44]

#### 4.5.5 Výměník tepla

Další důležitou součástí ve vodním okruhu je výměník tepla, též nazývaný jako „radiátor“ (viz. *Obrázek 8*). Radiátor má značný vliv na celkový výkon chladicí soustavy. Jeho cílem je odevzdávat nahromaděné teplo z chladicí kapaliny do okolního prostředí. V současné době se výhradně používá výměník tepla v kombinaci s ventilátory (aktivní radiátor). Ke chlazení výkonných komponent je vhodné zvolit větší radiátor, což umožňuje použití ventilátoru s nižšími otáčkami. Tím se sníží celkový akustický hluk při stejném chladicím účinku. Rozměry výměníku tepla jsou přizpůsobeny standardním rozměrům ventilátorů. Nejvíce používaným rozměrem ventilátoru pro stolní počítače je velikost 120 mm. Pro výrobu výměníku tepla se používají hliníkové nebo měděné trubky, kterými protéká chladicí kapalina. Na ně jsou připevněny chladicí plechy z mědi nebo hliníku, obdobně jako u heatpipe. Je důležité, aby radiátor byl ze stejného materiálu jako vodní bloky. Jeho žebrování může být z odlišného materiálu, jelikož nepřichází do kontaktu s vodou. Ve většině případů je na žebra používán hliník, především z ekonomických důvodů. Radiátor je možné čistit chemickými čistícími prostředky. [1; 44]

Obrázek 8 Paralelní výměník tepla použitý v notebookech [46; 47]



Výměníky tepla rozdělujeme v závislosti na způsobu průchodu chladicí kapaliny. Nejčastější je sériové zapojení, kdy trubičky prochází skrze celý radiátor a poté se přes něj znovu vrací. Takovýto radiátor obsahuje více těchto trubiček, což umožňuje cirkulaci vody po delší dobu. Paralelní zapojení radiátorů je tvořeno z trubiček obdélníkového průřezu, které jsou na obou koncích propojeny jednou trubkou (viz. *Obrázek 8*). Ta má větší rozměry, než trubičky s obdélníkovým průřezem. Při paralelním zapojení proudí kapalina jen jedním směrem. Hlavní výhodou je nižší odpor a vyšší účinnost při ochlazování. [1]

#### 4.5.6 Chladicí kapalina

Chladicí kapalina je médium, které slouží k přenosu tepelného výkonu uvnitř vodního okruhu. Většinou se pro účely vodního chlazení používá destilovaná voda s přidavkem aditiv. Neobsahuje minerály, které by mohly způsobit zanášení okruhu, případně další chemické reakce. Při použití vody z vodovodního řadu může docházet k postupnému usazování vzduchových bublinek v jednotlivých komponentách chlazení a snížení jejich účinnosti. Mimo to způsobuje usazování řas. Pro zpomalení galvanické koroze mezi mědí a hliníkem je možné použít speciální aditiva. [1; 37]

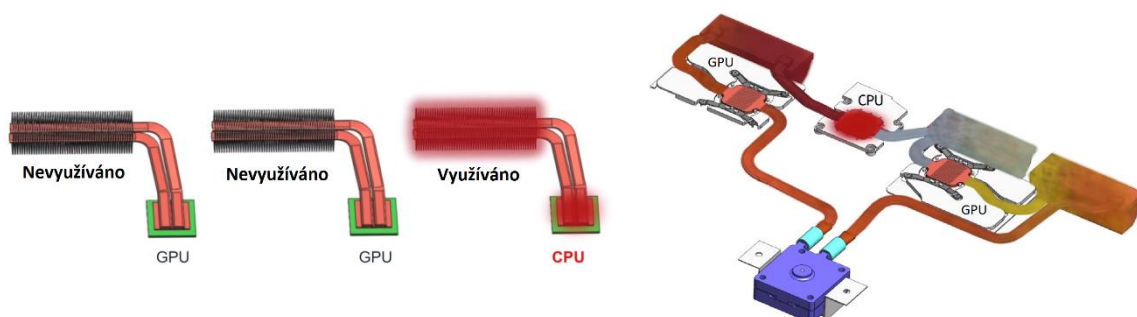
#### 4.5.7 Hadičky

Hadičky v chladicím okruhu slouží k vedení chladicí kapaliny. Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu hadiček je silikon. Výhodou je odolnost při průtoku teplé vody a dlouhodobé používání. Nevýhodou je snadná deformace především při ohybu a možnost následného zablokování průtoku vody. Mimo to dochází při použití silikonu k mírnému odpařování vody. U výkonného čerpadla může dojít při nevhodně zvoleném rozměru hadiček k prasknutí či uvolnění spoje. Při návrhu vodního okruhu je třeba dbát na přesné a jednotné rozměry hadiček při propojení jednotlivých komponent. [1; 44]

#### 4.5.8 Notebooky s vodním chlazením

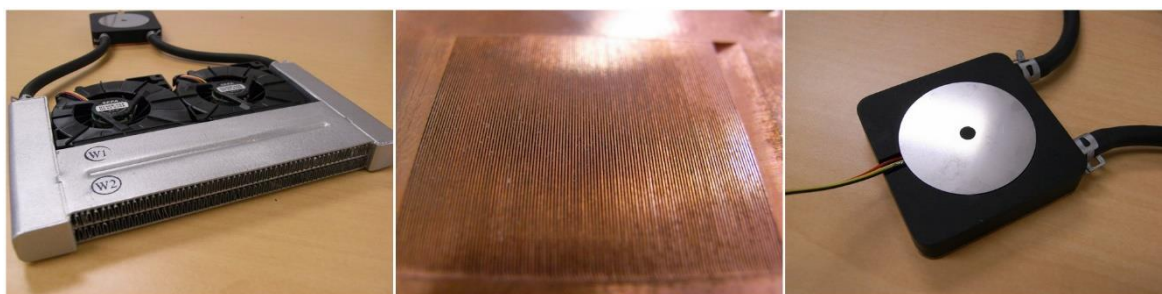
Vodní chlazení může být použito ve výkonných noteboocích a též v All-in-One počítačích. Hlavní výhodou je nízký akustický hluk, snížení teplotního zatížení komponent nebo v opačném případě zvýšení jejich výkonu. Vodní chlazení u notebooků je velmi málo používáno a ve většině případů jde pouze o experimenty. Klasické chlazení notebooku pomocí heatpipe není schopné efektivně ochlazovat CPU nebo GPU při náročných výpočetních procesech. V tomto případě dochází k nadměrnému zahřívání vybraných komponent a není tím dostatečně využit potenciál chladicí soustavy viz. *Obrázek 9*. Naproti tomu vodní chlazení nabízí rovnoměrnější rozložení tepelného výkonu do vodního okruhu (viz. *Obrázek 9*) a nedochází k přehřívání dílčích komponent. [48; 1]

Obrázek 9 Rozdíl mezi rozložením tepelného výkonu u heatpipe (vlevo) a vodního chlazení (vpravo) [49]



Jednou z prvních firem, které vytvořily funkční model vodního chlazení uvnitř notebooku, je firma Hitachi v roce 2007. Hlavním důvodem bylo nabídnout výkonný herní notebook s využitím procesorů řady Intel Core 2 Extreme, které je možné přetaktovat. Pro tento účel byl navržen měděný vodní blok s mikro kanálky (viz. *Obrázek 10*), které bylo možné vyrobit novou technologií s tloušťkou pouhých 0,09 mm. Výměník tepla byl vyroben z hliníku s výškou 14 mm, chlazený tichými ventilátory (viz. *Obrázek 10*). Větší rozměry pro uchycení vodního chlazení byly navrženy pro montáž na víko displeje notebooku. Byly vyrobeny dvě varianty. První variantu tvoří 2 ventilátory (jeden ventilátor uchladí 50 W) a je schopna uchládit 90 W odpadního tepla. U druhé varianty jsou použity 3 ventilátory a její chladicí výkon dosahuje 130 W. Při použití obou variant současně je chladicí výkon TDP 200 W, při zvýšeném akustickém hluku až 260 W. Poslední částí vodního chlazení umístěnou na vodním bloku je piezoelektrické membránové vodní čerpadlo s tloušťkou pouhých 8,3 mm viz. *Obrázek 10*. [47]

Obrázek 10 Vodní okruh (vlevo), Vodní blok s mikrokanálky (uprostřed), piezoelektrické membránové pumpa (vpravo) [47]





Prvním výrobcem, který oficiálně uvedl do prodeje notebook s vodním chlazením je firma Fujitsu s modelem FMW-BILBO NW. Cena notebooku byla v roce 2009 pouze 12 300 Kč (250 000 yenů). Toto řešení bylo uvnitř 16“ šasi notebooku. [46; 50]

Poslední známý koncept vodního okruhu uvnitř notebooku vyrobila firma Asetek v roce 2011. Ta jej vytvořila pouze jako prototyp. Mimo jiné sloužil jako ukázka schopností této firmy v oblasti chlazení počítačů. Cílem bylo vytvořit vodní chlazení s malou výškou pro velmi výkonné notebooky a All-in-One PC. Toto řešení se zaměřovalo především na zvýšení výpočetního výkonu CPU a GPU. Další odlišností jejich řešení bylo vytvoření vodního chlazení pro již vyrobený notebook, který využíval technologii heatpipe. Předchozí řešení tuto možnost nenabídlo a notebooky byly navrhovány s ohledem na velikost chladicího okruhu. Vodní okruh byl implementován do notebooku Dell Alienware 18x viz. *Obrázek 11*. Ten měl procesor Intel Core i7-2920XM s odemčným násobičem a umožňoval přetaktování CPU. Grafický výkon zajišťovaly dvě grafické karty AMD Radeon HD 6970M v režimu CrossFire. Toto řešení umožnilo zvýšit stabilně frekvenci procesoru z 3,5 GHz na 4,4 GHz a frekvenci GPU z 680 MHz na 800 MHz. Touto modifikací se zvýšil výpočetní výkon notebooku až o 23 %. Informace o výsledných hodnotách účinnosti chlazení nejsou dostupné. Vodní chlazení notebooku bylo dimenzováno na více jak 205 W generovaného tepelného výkonu. Tato výsledná hodnota TDP je počítána pro komponenty v základním taktu, bez přetaktování. [49; 51; 8]

Obrázek 11 Vodní chlazení notebooku Dell Alienware 18x od firmy Asetek [49]



První odlišnou koncepci a zatím poslední řešení vodního chlazení notebooku představila firma Asus. Koncepce je však od předchozích odlišná. Notebook využívá standardní aktivní chlazení jako většina notebooků. Navíc je doplněn vodním okruhem s bloky na CPU a GPU (první část okruhu). Druhou částí vodního okruhu je dokovací stanice, která obsahuje čerpadlo a výměníky tepla. Po připojení notebooku do dokovací stanice se uzavře vodní okruh, a tím se aktivuje Hydro Overclocking System. Ten přetaktuje CPU, GPU a operační paměti. Výsledkem je zvýšení výpočetního výkonu CPU o 48 %, GPU 43 % a operačních paměti 31 %. Toto řešení umožňuje odvádění generovaného tepelného výkonu mimo notebook. Výpočetní výkon je poté srovnatelný s výkonem stolní počítačové sestavy. Nevýhodou, na kterou upozorňuje výrobce, je možný únik kapaliny při odpojení notebooku od dokovací stanice. [52]

## 5 Vlastní zpracování

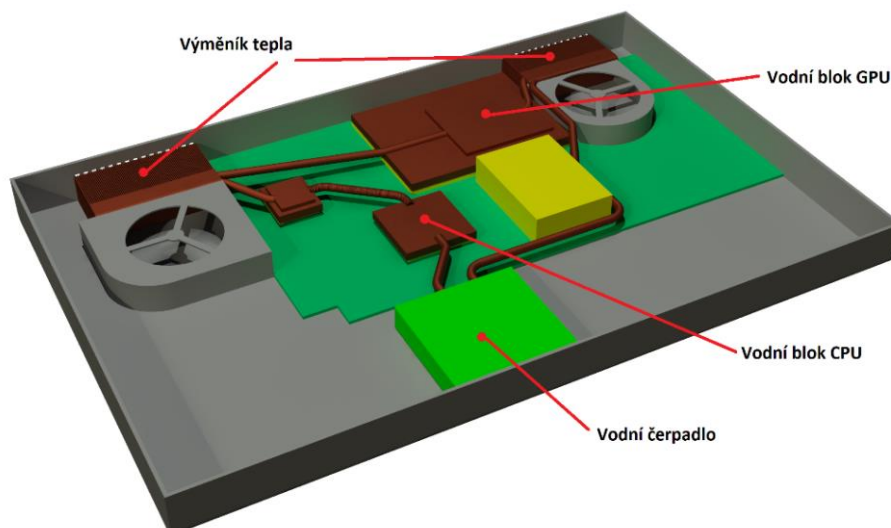
Tato část práce popisuje návrh vodního chlazení do šasi zvoleného notebooku, včetně výběru jednotlivých komponent vodního okruhu. Následně je popsán postup při výrobě a popis vad, které způsobují netěsnosti. Závěr kapitoly je věnován metodice měření.

### 5.1 Návrh vodního chlazení

Pro integraci vodního chlazení do notebooku byl zvolen Dell Precision M6600. Ten je vybaven displejem s úhlopříčkou 17,3 palců a PGA patičí pro procesor a MXM slotem na grafickou kartu. To umožňuje vysokou variabilitu při výměně komponent (CPU a GPU), následném měření a testování.

Při návrhu vodního okruhu pro notebook bylo jedním z cílů zachovat jeho plnou kompaktnost a funkčnost, včetně minimální úpravy šasi. Z toho důvodu byl vytvořen návrh rozložení jeho jednotlivých částí uvnitř notebooku. Tento byl zpracován v programu AutoCAD 2017, na základě kterého je možné vidět umístění komponent vodního okruhu (viz. *Obrázek 12*). Je zachováno původní umístění procesoru (vodní blok CPU), grafické karty (vodní blok GPU), ventilátorů a žebrování pasivního chladiče (výměník tepla). Části vodního okruhu byly simulovány v programu ANSYS ve verzi 19.2. Cílem simulace bylo zjistit, jakým způsobem probíhá proudění a ve kterých místech těchto částí dochází k nežádoucí turbulenci. [53; 54]

Obrázek 12 Návrh vodního okruhu do notebooku v programu AutoCAD 2017

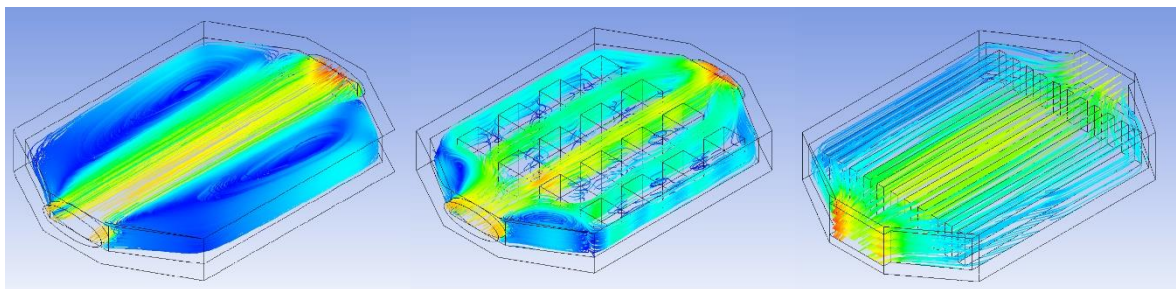


### 5.1.1 Vodní blok CPU

Úkolem vodního bloku CPU je předávání tepelné energie od procesoru do chladicí kapaliny. Jeho účinnost je závislá na vnitřním uspořádání a velikosti styčné plochy. Při navrhování vodního bloku pro procesor byly důležitým parametrem jeho vnější rozměry. Ty jsou stanoveny pro simulaci 38 mm na délku 26 mm na šířku a 5 mm na výšku, jež je omezena prostorem mezi horním krytem šasi notebooku a procesorem. Pro dostatečnou pevnost při mechanickém namáhání a následné usnadnění výroby vodního bloku je navržena tloušťka stěn 1 mm. Otvory pro průtok chladicí kapaliny v bloku mají rozměry 8 mm na šířku a 3 mm na výšku. Ty byly zvoleny na základě původní velikost heatpipe trubičky grafické karty originálního chladiče notebooku.

Jak již bylo zmíněno, je pro účinnost vodního bloku podstatné vnitřní uspořádání a aktivní styčná plocha. Na obrázku 13 je zobrazen vodní blok bez vnitřního uspořádání. Chladicí kapalina proudí přímo mezi otvory a po jeho stranách dochází k turbulencím. Tento typ slouží pouze pro ukázkou a následné návrhy vnitřního uspořádání. Při simulaci průtoku kapaliny s vnitřním uspořádáním tvaru čtvercové matrice byl z důvodu omezení studentské licence zvětšen rozměr čtvercového výstupku z 1 mm na 3 mm. Následně bylo možné získat částečnou představu o proudění kapaliny ve vodním bloku. V této vnitřní struktuře je proud chladicí kapaliny kladen odpor čtvercovými výstupky, za kterými dochází k její turbulenci. Tato plocha není schopna efektivně předávat teplo (viz. *Obrázek 13*). Posledním typem simulovaného vnitřního uspořádání vodního bloku jsou drážky o rozměru 1 mm (viz. *Obrázek 13*). Mezi těmi dochází pouze k velmi malým turbulencím a výsledná styčná plocha je ze simulovaných největší. Na základě výsledků bylo pro výrobu vodního bloku CPU zvoleno vnitřní drážkové uspořádání.

Obrázek 13 Simulace proudění chladicí kapaliny uvnitř vodního bloku CPU. Bez vnitřního uspořádání (vlevo), čtvercová matrice (uprostřed) a drážky (vpravo)

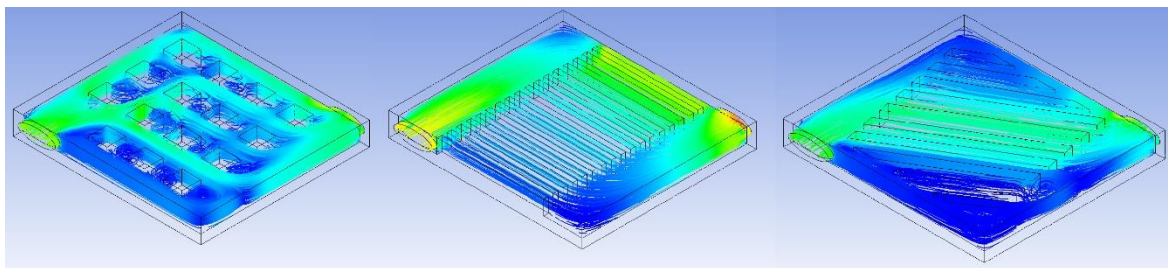


### 5.1.2 Vodní blok GPU

Při navrhování vodního bloku pro GPU byly pro simulaci navrženy větší rozměry bloku: 40 mm šířka, 36 mm délka. Další odlišností jsou otvory pro přívod a vývod chladicí kapaliny. Ty byly přemístěny z důvodu použití části původního chladiče grafické karty. Ostatní rozměry zůstaly pro simulaci nezměněny.

Předchozí simulace vnitřního uspořádání vodních bloků CPU potvrdila optimální variantu vnitřního uspořádání bloku s drážkami také pro použití s GPU. Pozornost byla tedy věnována především směru průtoku chladicí kapaliny. Při simulaci čtvercové maticové struktury (viz. *Obrázek 14*) nedocházelo k rovnoměrnému proudění ve vodním bloku. Především na straně vstupu a u výstupků uprostřed bloku se projevil výrazné turbulence. To by způsobilo neefektivní předávání tepelné energie od GPU do chladicí kapaliny. Následná simulace drážkového uspořádání (viz. *Obrázek 14*) poskytla důležité zjištění o chování proudění, které probíhalo především v druhé polovině vodního bloku. Tento poznatek byl použit pro vytvoření závěrečné simulace. Pro dosažení cíleného proudění ve vodním bloku byly drážky zvětšeny z 1 na 2 mm, natočeny pod úhlem 30° a následně navrženo jejich zkosení. Tím bylo docíleno proudění chladicí kapaliny skrze střed vodního bloku GPU. Nevýhodou tohoto uspořádání je snížení průtoku v rozích naproti otvorům. Přesto byla tato varianta zvolena pro nejlepší očekávaný chladicí účinek i následnou výrobu.

Obrázek 14 Simulace proudění chladicí uvnitř vodního bloku GPU. čtvercová matice (vlevo), drážky (uprostřed) a změněný úhel drážek (vpravo)



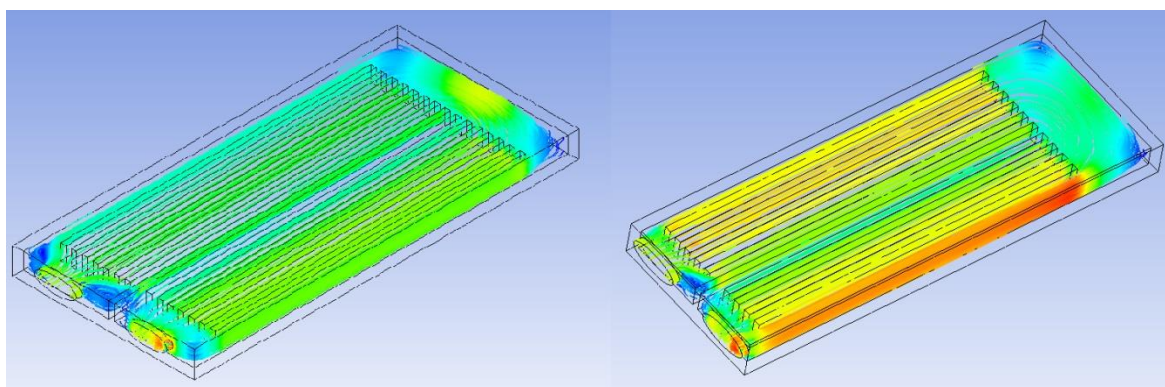
### 5.1.3 Výměníky tepla

Předchozí simulace se zabývaly odebráním tepla od dílčích komponent, ale neméně důležitou částí vodního chlazení je předání nahromaděné tepelné energie kapaliny do okolí. K tomu slouží výměníky tepla. Jejich rozměry jsou omezeny prostorem mezi ventilátorem

a šasi notebooku. Na výměníky musí být připevněno žebrované chladiče, skrze které bude teplo odebíráno prouděním vzduchu od ventilátorů. Dle návrhu obsahuje vybraný notebook dva radiátory s ohledem na dosažení maximálního chladicího účinku. Pro zjednodušení následujícího popisu jsou výměníky tepla pojmenovány podle vzdálenosti od CPU a GPU. První radiátor je blíže k vodnímu bloku CPU. Jeho rozměry jsou 72 mm na délku a 34 mm na šířku. Druhý radiátor je umístěn vedle vodního bloku GPU. Jeho rozměry jsou 64 mm na délku a 24 mm na šířku. Jejich výška včetně otvorů je stejná jako u vodních bloků pro CPU a GPU.

Předchozí simulace prokázaly nejvyšší účinnost drážkové vnitřní struktury, a proto byla tato zvolena i pro výměník tepla. Dalším důvodem volby drážkové vnitřní struktury je také navržený výrobní postup. U výměníku tepla pro CPU jsou drážky u otvorů na jeho konci odebrány (viz. *Obrázek 15*). To umožňuje rovnoměrnější průtok chladicí kapaliny skrze drážky. Na konci výměníku je vytvořen prostor, ve kterém dochází ke změně směru průtoku kapaliny. V případě simulace proudění v radiátoru GPU (viz. *Obrázek 15*) je jediným rozdílem menší počet drážek, čímž dochází k rychlejšímu pohybu chladicí kapaliny.

Obrázek 15 Simulace proudění chladicí kapaliny ve výměníku tepla. CPU (vlevo) a GPU (vpravo)

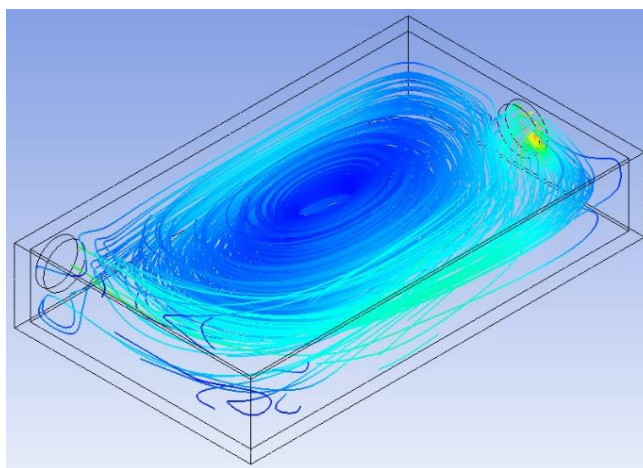


#### 5.1.4 Expanzní nádoba

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, expanzní nádoba slouží především k doplňování a případné výměně chladicí kapaliny ve vodním okruhu. Původní návrh ji neobsahoval a doplňování mělo být řešeno propojkou mezi hadičkami před vodní pumpou. Při zkušebních testech doplňování vodního okruhu chladicí kapalinou však nebylo možné dostatečně odvzdušnit okruh. Propojka proto byla nahrazena expanzní nádobou, která umožňuje snadné

doplňování chladicí kapaliny a odvzdušnění vodního okruhu. To je umožněno správnou cirkulací kapaliny v expanzní nádobě (Obrázek 16). Při vstupu chladicí kapaliny dochází k lomení jejího směru o stěnu expanzní nádoby, kapalina následně uprostřed cirkuluje a tím umožňuje dostatečné zpomalení proudění (tmavě modrá barva) pro únik vzduchu. Výhodou přidání expanzní nádoby do vodního okruhu je také zvětšení objemu chladicí kapaliny, což má za následek výrazné omezení výkyvu teplot komponent při výpočetním zatížení.

*Obrázek 16 Simulace proudění chladicí kapaliny v expanzní nádobě*



## 5.2 Výběr částí vodního okruhu

Na základě vytvořeného návrhu a provedených simulací je potřebné zajistit vhodné propojení navržených komponent, včetně volby správného čerpadla, k zajištění cirkulace chladicí kapaliny ve vodním okruhu.

### 5.2.1 Trubičky a hadičky

Ke spojení vodních bloků CPU, GPU a výměníků tepla bylo nutné zvolit vhodný materiál trubiček. Hlavními požadavky na jejich materiál je snadná deformace a dostatečná pevnost při manipulaci s následně vyrobeným vodním okruhem. Tyto nároky splňují vinuté měděné trubičky s vnějším průměrem 6 a 8 mm.

Následně bylo třeba zajistit vhodné pružné spojení mezi vyrobenými částmi okruhu a vodním čerpadlem. Pro tyto účely se nejlépe osvědčily ohebné hadičky vyrobené ze silikonu, který je časově a chemicky stálý. Jejich dalším důležitým parametrem je vnější a

vnitřní průměr, včetně tloušťky stěny. Při použití nesprávného rozměru by mohlo ve spoji dojít k úniku chladicí kapaliny. K propojení byly vybrány hadičky o vnějším průměru 4, 6, 8 a 10 mm. Tím bylo možné zvolit jejich správné použití s ohledem na rozměry daného spoje.

### 5.2.2 Vodní čerpadla

Vodní pumpa zajišťuje cirkulaci chladicí kapaliny ve vodním okruhu, a proto je důležité navrhnout její dostatečný výkon. Hlavním omezením při výběru pumpy jsou rozměry zvoleného notebooku. Při maximální výšce šasi notebooku 30 mm (bez víka displeje), je čerpadlo možné umístit uvnitř notebooku do prostoru pro baterii s maximální výškou 25 mm. K tomu lze připočítat výšku 3 mm gumových podložek, které snižují jeho pohyb po ploše a tlumí provozní vibrace. V tom případě je možné zvýšit výšku prostoru pro čerpadlo na 28 mm, ale na úkor otvoru ve spodním (snímatelném) víku notebooku. Dalším parametrem je průtok čerpadla, který je závislý na použitém typu. Pohybuje se mezi 18 až 280 litry za hodinu. Důležitá je též hodnota napájecího napětí čerpadla, jež je u notebooku limitována použitým USB portem o napětí 5 V a proudem 0,5 až 1 A (závisí na generaci použité verze USB portu). Většina vyráběných vodních pump splňujících dané podmínky, má rozměry do 28 mm na výšku a napájecí napětí od 3 do 12 V. Pro zvýšení napětí z USB portu je pro výkonnější čerpadla zapotřebí použít měnič napětí, který umožní napájet vodní pumpu napětím až 12 V.

Prvním a nejdostupnějším typem je odstředivé čerpadlo (viz. Obrázek 17). To splňuje všechny výše uvedené parametry. Lze je možné zakoupit na zahraničních prodejních serverech v nabízených dvou variantách. První variantou je pumpa s průtokem 150 litrů za hodinu, výtlakem 1,1 metru, napájecím napětím od 4 až 6 V a maximálním příkonem 1,8 W. Vnější rozměry čerpadla jsou 25,5 mm na šířku a 43 mm na délku. Druhá varianta vodní pumpy je téměř totožná s předchozí, ale její maximální průtok je 280 litrů za hodinu, provozní napětí od 6 do 12 V a její průměr je o 1 mm větší tedy 26,5 mm. Výhodou těchto čerpadel je nízká hlučnost při provozu, vysoký průtok (v poměru k jeho velikosti), voděodolnost a jednoduchost konstrukce. Nevýhodou jsou vibrace v případě přímého dotyku s povrchem. Tento nedostatek je možné snížit použitím gumové nebo silikonové podložky.



Obrázek 17 Odstředivé vodní čerpadlo



Pístovomembránové čerpadlo je dalším typem, který lze použít pro cirkulaci chladicí kapaliny ve vodním okruhu. Pro požadované rozměry byly vybrány dvě výkonové varianty. První má průtok 0,18 litru za minutu (10,8 litru za hodinu) a je napájen provozním napětím 3 V. Vnější rozměry čerpadla jsou 43 mm na délku 30 mm na výšku a 18 mm na šířku. Druhá výkonová varianta se liší provozním napětím 12 V a průtokem 18 litrů za hodinu. Výhodou jsou velmi malé rozměry, které jsou zachovány také u výkonnější varianty. Nevýhodou jsou především vibrace, způsobené nevyvážením odstředivého mechanismu pro pohyb gumové membrány. Tento typ vodní pumpy však nebyl pro testování použit z důvodu netěsnosti spojů mezi vstupem, výstupem a hadičkami.

### 5.3 Výroba vodního chlazení

Výroba jednotlivých navržených částí vodního okruhu zahrnuje několik fází. Správnou volbu materiálu, vhodný technologický postup, jejich samotnou výrobu a dále popis vad s následnými úpravami šasi notebooku.

#### 5.3.1 Materiál

Volba materiálu použitého k výrobě vodního okruhu do notebooku může mít zásadní vliv na výslednou účinnost chlazení. Zároveň určuje pracovní postup pro výrobu navržených částí vodního okruhu. V předchozí kapitole byly vybrány pro spojení těchto částí měděné vinuté trubičky. Z důvodu nedostatku vhodných měděných plechů potřebných k výrobě vybraných částí byl zvolen jako konstrukční materiál hliníkový plech. Ten byl dostupný v dostatečném množství i provedeních a při výskytu případných nedostatků v pracovním postupu mohl být

snadno nahrazen jiným kusem. Po vyrobení prototypu bylo záměrem zhotovit celý vodní okruh výhradně z měděných trubiček a plechů.

### 5.3.2 Technologický postup

Z návrhu vodních bloků a výměníků tepla byly známé rozměry drážek, tedy jejich šířka 1 mm a výška 3 mm. Tyto drážky měly být vyřezány na řezačce dlaždic s kotoučem HSS o průměru 125 mm a tloušťce 1 mm do 4 mm hliníkového plechu. Z důvodu rozměrů kotouče musel být plech podložen, aby bylo možné dosáhnout výšky řezu 3 mm. Při řezání docházelo vlivem nerovnoměrného přítlaku řezného kotouče a hliníkovému plechu k hlubšímu průřezu drážky, a zbylá tloušťka plechu byla místy 0,1 mm proti požadovanému 1 mm. Tímto postupem tedy nebylo možné vytvořit požadovaný blok s dostatečnou tuhostí a pro další zpracování musela být zvolena jiná technologie výroby. Tou bylo použití již vyrobených hliníkových chladičů z poškozených základních desek stolních počítačů. Při hledání vhodného kusu bylo potřeba najít chladiče, které se svými rozměry jen málo liší od vytvořeného návrhu.

Dále bylo zapotřebí zvolit vhodnou technologii spojení vinutých měděných trubiček a hliníkových bloků tak, aby nedošlo k případnému úniku kapaliny v místě spoje. Nejlepším možným řešením bylo použití pájky s tavidlem pro pájení mědi a hliníku. Teplota tání této pájky je 450 °C, ale z důvodu její vysoké ceny byla pro pájení hliníkových bloků použita levnější pájka (cín 70 % a zinek 30 %) s teplotou tání 350 °C. Na základě vybraných typů pájek se jedná o pájení naměkko. Pro dosažení teploty tavení pájek byl použit propanbutanový hořák.

### 5.3.3 Vodní blok CPU a GPU

Před výrobou konečného provedení vodního bloku CPU a zvolením vhodných postupů při jeho výrobě bylo vytvořeno několik prototypů. První z nich byl vyroben z chladiče, který měl seříznuté žebrování do tvaru čtverce s následně zkosenými stěnami. Při pájení stěn nebylo možné dostatečně zafixovat jejich umístění a při chladnutí pájky docházelo k jejich posunu. Zároveň nastávalo zalití kanálků pájkou. Při výrobě dalšího vodního bloku byl chladič seříznut na tvar obdélníku. Na jeho kratších stranách bylo naříznuto žebrování do určité hloubky. To umožnilo ohnutí stěny vodního bloku. Opakovaným ohýbáním

naříznutého přebytečného žebrování došlo k jeho lomu, odstranění a následnému zabroušení. Při ohýbání stěny vodního bloku do správné polohy za účelem zajištění správného proudění chladicí kapaliny skrze drážky došlo vlivem opakovaného ohýbání k odlomení jedné ze čtyř stěn. I když byla tomuto jevu věnována velká pozornost, při opakování docházelo k odlomení stěny. Při pájení stěn tohoto bloku bylo docíleno jejich správné polohy, ale mezera mezi žebrováním a chladičem, která vznikla odebráním materiálu, způsobovala slévání pájky na nesprávných místech. Přesto byl tento vodní blok dále použit ke zjištění dalších nedostatků při pracovním postupu. Dalším krokem bylo umístění a připájení krycího hliníkového plechu na připravený vodní blok, tak došlo k zakrytí žebrování. Pro ověření funkčnosti byly k tomuto bloku připájeny 8 mm měděné trubičky zploštěné na 5 mm, čímž bylo dosaženo stejné výsledné výšky s vodním blokem. Po výsledném pájení byla testována těsnost spojů. Ta nebyla dostatečná a docházelo k úniku chladicí kapaliny okolo horního plechu vodního bloku. Při pokusu o zajištění těsnosti opětovným ohřátím a přidáním pájky došlo k posunutí horního plechu a kompletnímu zalití vnitřních kanálků. U výsledné výroby vodního bloku CPU (viz. Obrázek 18) byly využity předchozí zkušenosti. Použitá pájka na pájení mědi a cínu zajistila snazší slévání a lepší těsnost spojů. Zkosené vnější stěny vodního bloku byly ohnuty dolů směrem k základně vodního bloku a k odebrání přebytečného žebrování byla využita vrtačka s frézou.

*Obrázek 18 Vnitřní uspořádání vodního bloku GPU (vlevo) a vodního bloku CPU (vpravo)*



U výroby vodního bloku GPU (viz. Před výrobou konečného provedení vodního bloku CPU a zvolením vhodných postupů při jeho výrobě bylo vytvořeno několik prototypů. První z nich byl vyroben z chladiče, který měl seříznuté žebrování do tvaru čtverce s následně zkosenými stěnami. Při pájení stěn nebylo možné dostatečně zafixovat jejich umístění a při chladnutí pájky docházelo k jejich posunu. Zároveň nastávalo zalití kanálků pájkou. Při výrobě dalšího vodního bloku byl chladič seříznut na tvar obdélníku. Na jeho kratších stranách bylo naříznuto žebrování do určité hloubky. To umožnilo ohnutí stěny vodního

bloku. Opakovaným ohýbáním naříznutého přebytečného žebrování došlo k jeho lomu, odstranění a následnému zabroušení. Při ohýbání stěny vodního bloku do správné polohy za účelem zajištění správného proudění chladicí kapaliny skrze drážky došlo vlivem opakovaného ohýbání k odlomení jedné ze čtyř stěn. I když byla tomuto jevu věnována velká pozornost, při opakování docházelo k odlomení stěny. Při pájení stěn tohoto bloku bylo docíleno jejich správné polohy, ale mezera mezi žebrováním a chladičem, která vznikla odebráním materiálu, způsobovala slévání pájky na nesprávných místech. Přesto byl tento vodní blok dále použit ke zjištění dalších nedostatků při pracovním postupu. Dalším krokem bylo umístění a připájení krycího hliníkového plechu na připravený vodní blok, tak došlo k zakrytí žebrování. Pro ověření funkčnosti byly k tomuto bloku připájeny 8 mm měděné trubičky zploštěné na 5 mm, čímž bylo dosaženo stejné výsledné výšky s vodním blokem. Po výsledném pájení byla testována těsnost spojů. Ta nebyla dostatečná a docházelo k úniku chladicí kapaliny okolo horního plechu vodního bloku. Při pokusu o zajištění těsnosti opětovným ohřátím a přidáním pájky došlo k posunutí horního plechu a kompletnímu zalití vnitřních kanálků. U výsledné výroby vodního bloku CPU (viz. Obrázek 18) byly využity předchozí zkušenosti. Použitá pájka na pájení mědi a cínu zajistila snazší slévání a lepší těsnost spojů. Zkosené vnější stěny vodního bloku byly ohnuty dolů směrem k základně vodního bloku a k odebrání přebytečného žebrování byla využita vrtačka s frézou.

Obrázek 18) byly opět využity poznatky a zkušenosti z předchozí výroby. Rozdíl spočíval v natočení žebrování pasivního chladiče, aby dle simulace docházelo ke správnému proudění chladicí kapaliny. Protože nebylo možné využít žebrování pasivních chladičů k vytvoření stěny vodního bloku, bylo potřebné najít jiné řešení. Tím bylo použití plechu pro krytí vodního bloku jako v předchozím případě, ale strany plechu byly ohnuty. Výsledný rozměr tohoto krycího plechu byl menší než spodní část, aby při pájení obou částí k sobě došlo k vytvoření správného koutového spoje. Dále byla spodní část vodního bloku po stranách zbroušena (viz. Před výrobou konečného provedení vodního bloku CPU a zvolením vhodných postupů při jeho výrobě bylo vytvořeno několik prototypů. První z nich byl vyroben z chladiče, který měl seříznuté žebrování do tvaru čtverce s následně zkosenými stěnami. Při pájení stěn nebylo možné dostatečně zafixovat jejich umístění a při chladnutí pájky docházelo k jejich posunu. Zároveň nastávalo zalití kanálků pájkou. Při výrobě dalšího vodního bloku byl chladič seříznut na tvar obdélníku. Na jeho kratších stranách bylo naříznuto žebrování do určité hloubky. To umožnilo ohnutí stěny vodního bloku.

Opakovaným ohýbáním naříznutého přebytečného žebrování došlo k jeho lomu, odstranění a následnému zabroušení. Při ohýbání stěny vodního bloku do správné polohy za účelem zajištění správného proudění chladicí kapaliny skrze drážky došlo vlivem opakovaného ohýbání k odlomení jedné ze čtyř stěn. I když byla tomuto jevu věnována velká pozornost, při opakování docházelo k odlomení stěny. Při pájení stěn tohoto bloku bylo docíleno jejich správné polohy, ale mezera mezi žebrováním a chladičem, která vznikla odebráním materiálu, způsobovala slévání pájky na nesprávných místech. Přesto byl tento vodní blok dále použit ke zjištění dalších nedostatků při pracovním postupu. Dalším krokem bylo umístění a připájení krycího hliníkového plechu na připravený vodní blok, tak došlo k zakrytí žebrování. Pro ověření funkčnosti byly k tomuto bloku připájeny 8 mm měděné trubičky zploštěné na 5 mm, čímž bylo dosaženo stejné výsledné výšky s vodním blokem. Po výsledném pájení byla testována těsnost spojů. Ta nebyla dostatečná a docházelo k úniku chladicí kapaliny okolo horního plechu vodního bloku. Při pokusu o zajištění těsnosti opětovným ohřátím a přidáním pájky došlo k posunutí horního plechu a kompletnímu zalití vnitřních kanálků. U výsledné výroby vodního bloku CPU (viz. Obrázek 18) byly využity předchozí zkušenosti. Použitá pájka na pájení mědi a cínu zajistila snazší slévání a lepší těsnost spojů. Zkosené vnější stěny vodního bloku byly ohnuty dolů směrem k základně vodního bloku a k odebrání přebytečného žebrování byla využita vrtačka s frézou.

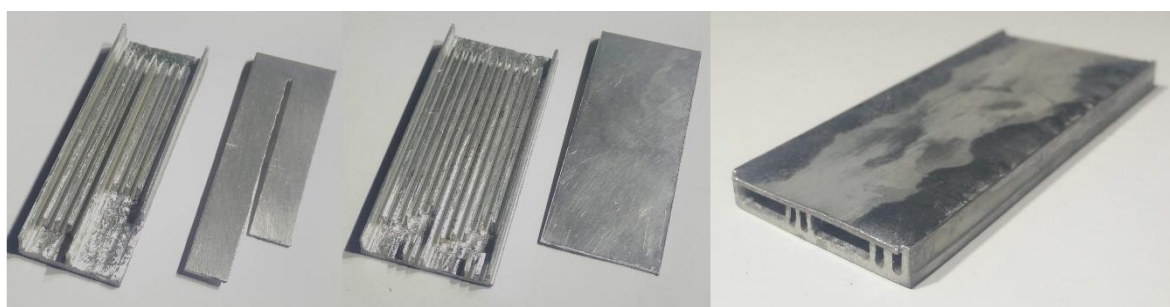
Obrázek 18), a tak vytvořena podpora, která jej udržela na daném místě v původní části chladiče GPU. Stejná technologie výroby byla použita také pro výrobu vodního bloku CPU za účelem testování jeho účinnosti.

#### 5.3.4 Výměník tepla

Výroba výměníků tepla pro CPU a GPU probíhala mírně odlišným způsobem, než u vodních bloků. Základ byl vytvořen z již vyrobeného hliníkového chladiče, používaného pro chlazení CPU stolního počítače. Ten byl podélně rozříznut mezi jeho žebrováním do odpovídajících rozměrů radiátorů. Následně byla jeho základna zroušena pro snadnější manipulaci a zpracování na tloušťku 3 mm. Výška žebrování byla seříznuta na 5 mm a poté byl frézou na požadovaných místech odebrán základní materiál. U výměníku tepla CPU (viz. Obrázek 19) bylo zapotřebí odebrat část žebrování, aby docházelo ke správnému průtoku chladicí kapaliny do všech kanálků. Jeho vstupní a výstupní otvory byly mírně posunuty z důvodu

umístění v šasi notebooku. Dále u něj bylo zbrušeno vnitřní žebrování na výšku 3,5 mm tak, aby bylo možné po nasazení horního krycího plechu vytvořit správný a těsnící koutový spoj (viz. Obrázek 19). Stejný postup byl použit i při výrobě výměníku tepla GPU. Na základě rozměrů původního chladiče grafické karty byla délka drážek na jedné straně přizpůsobena frézou (viz. Obrázek 19). Následně byla jemně zbrušena a srovnána do roviny základna výměníků tepla přibližně na tloušťku 1,5 mm tak, aby bylo možné k ní dobře připájet žebrování původního chlazení.

*Obrázek 19 Vnitřní uspořádání výměníku tepla GPU (vlevo), CPU (uprostřed) a výsledný stav (vpravo)*



### 5.3.5 Expanzní nádoba

Při výrobě expanzní nádoby bylo použito stejného postupu jako při výrobě horního krycího plechu vodního bloku GPU. Do krycího plechu expanzní nádoby byly vyvrtány otvory o průměru 8 mm, umožňující následné vložení měděné trubičky. Trubičky a krycí plech byly k sobě připájeny pájkou o teplotě tání 450 °C. Dalším krokem bylo připájení spodního plechu expanzní nádoby o tloušťce 1 mm k hliníkovému plechu o tloušťce 12 mm s předvrtaným otvorem, sloužícím k naplnění vodního okruhu kapalinou. Pro jeho správnou těsnost byl do něj vyřezán závit pro šroub M8 vybavený gumovým těsněním. Při kontrole rozměrů horního plechu bylo zjištěno, že u něj došlo v části naproti plnicímu otvoru k propadnutí, a proto bylo nutné přidat podporu (viz. Obrázek 20). Ta byla vyrobena ze stejného materiálu, jako část expanzní nádoby vybavená plnicím otvorem. Po spájení všech částí expanzní nádoby byl proveden závěrečný test na její těsnost. Ten vykázal několik míst, ve kterých docházelo k úniku chladicí kapaliny. K jejich utěsnění bylo nutné ohřátí expanzní nádoby a následné přidání většího množství pájky, která tyto netěsnosti odstranila. S ohledem na možnost vytvoření dalších míst pro únik kapaliny nebyl následně zabroušen její povrch (viz. Obrázek 20).

*Obrázek 20 Vnitřní struktura expanzní nádoby (vlevo) a výsledná expanzní nádoba (vpravo)*



### 5.3.6 Kompletace částí vodního okruhu

Před závěrečným pájením všech částí vodního okruhu (viz. Obrázek 21) bylo třeba upravit tloušťku měděných trubiček, aby je bylo možné zasunout do otvorů výměníků tepla a vodních bloků. Ty byly zploštěny na výšku 4 mm a následně zabroušeny na konečnou tloušťku 3,5 mm. Následovalo pájení těchto trubiček k vodnímu bloku CPU. Po dokončení pájení byla provedena zkouška těsnosti, jež ukázala vady na několika místech. Proto byly spoje znovu ohřáty, rozpojeny, očištěny a opět spájeny. Následná opětovná zkouška těsnosti prokázala únik pouze v jednom místě. To bylo očištěno, ale při pokusu o opravu přidáním většího množství pájky došlo k propálení hliníkového plechu a zalití vnitřního prostoru vodního bloku CPU pájkou.

*Obrázek 21 Vodní okruh před závěrečným pájením*



Při pájení měděných trubiček k vodnímu bloku a výměníku tepla GPU docházelo po jejich pájení včetně následného testu k netěsnostem spojů. Ve snaze opravit těsnost spoje byl vodní blok GPU několikrát ohřát, přesto došlo k jeho propálení. Následně byla pozornost věnována výměníku tepla, kde se podařilo až na jeden malý únik vše utěsnit.

Protože došlo k poškození obou vodních bloků a nebylo možné je opravit, bylo zvoleno náhradní řešení. To bylo vytvořeno ze samostatného vodního bloku CPU, který byl vyroben na testování účinnosti předávání tepla do chladicí kapaliny. Na základě výsledků to bylo pro danou situaci nejlepší možné řešení. Náhradní použitý vodní blok CPU se oproti simulacím od předchozího řešení mírně lišil vnitřním uspořádáním (viz. Obrázek 22).

*Obrázek 22 Vnitřní struktura vodního bloku CPU (vlevo), vodní blok CPU před pájením měděných trubiček (uprostřed), vnitřní struktura vodního bloku GPU (vpravo)*



Druhou poškozenou částí vodního okruhu byl vodní blok GPU. Ten musel být vyroben znovu a byl použit odlišný postup při jeho výrobě. K jeho vnitřní struktuře bylo použito měděného žebrování z chladiče notebooků (viz Obrázek 22). To bylo následně napájeno na měděný plech původního chladiče grafické karty. K napájení byla použita pájka s obsahem cínu 97 % a 3 % mědi. Poté byl k této části připájen měděný krycí plech, který provedením vycházel z původního vodního bloku. Následovalo pájení spojů mezi vodními bloky a výměníky tepla.

Po dokončeném pájení těchto částí a kontrole těsnosti tohoto řešení bylo k tepelným výměníkům CPU a GPU napájeno žebrování z původního aktivního chlazení. S ohledem na potřebu odebírat co nejlépe nahromaděné teplo z chladicí kapaliny, bylo důležité zajistit mezi nimi co největší kontaktní plochu. To bylo možné přidáním dostatečného množství pájky a následným přitlačením žebrování chladiče k výměníku tepla tak, aby spojení mezi nimi zůstalo po vychladnutí zachováno.



### 5.3.7 Vady a jejich řešení

Vodní okruh byl po dokončení pájení otestován na těsnost chladicí kapalinou. Test ukázal na netěsnosti v místě spojení výměníku tepla a měděných trubiček. Výměník tepla CPU se podařilo zcela utěsnit jeho opětovným ohřátím až na třetí pokus. V místě úniku chladicí kapaliny výměníku tepla GPU nebylo možné netěsnost opravit opětovným ohřátím spoje, proto bylo použito k zajištění těsnosti dvousložkové epoxidové lepidlo. Závěrečná zkouška těsnosti neodhalila žádné úniky chladicí kapaliny.

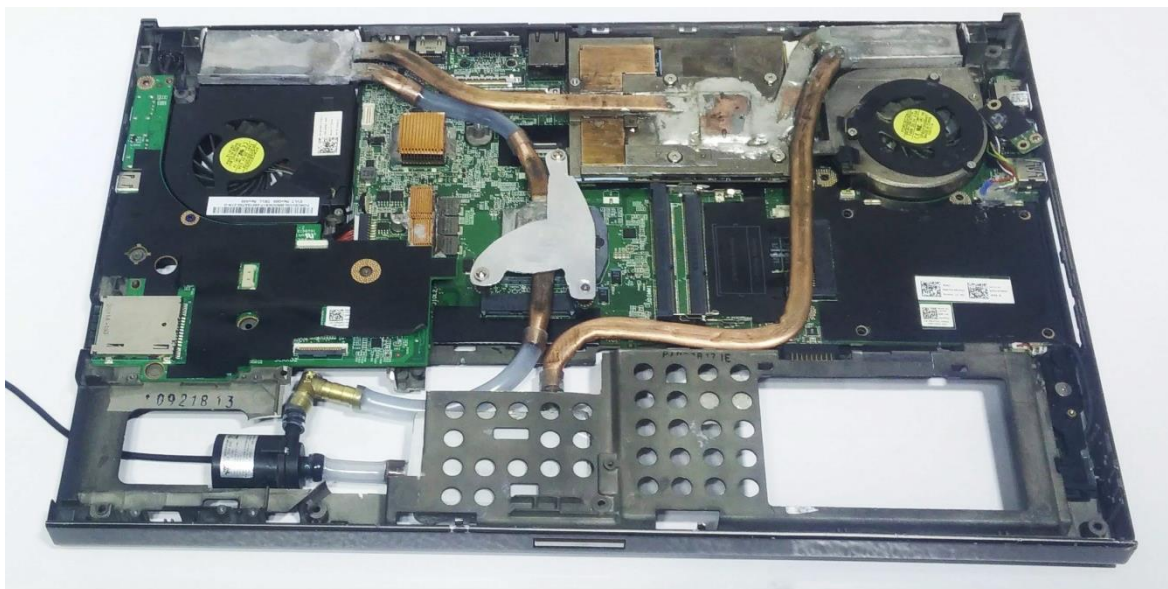
Druhým velmi častým důvodem úniku chladicí kapaliny byla netěsnost spojů mezi měděnými trubičkami, čerpadlem a silikonovými hadičkami. Použitím 6 mm hadičky, která zajišťovala těsnost spoje, došlo při jejím několikanásobném rozpojení k následným netěsnostem vlivem jejího nadměrného roztažení. To bylo možné vyřešit odstraněním této roztažené části.

### 5.3.8 Vodní okruh

Při implementaci vodního okruhu (viz. Obrázek 23) do vybraného notebooku bylo zapotřebí upravit jeho šasi tak, aby bylo možné vyrobené vodní chlazení umístit na správné místo a zabránit kontaktu s ostatními komponentami notebooku. Rozměrové nepřesnosti vznikly především při závěrečném pájení vyrobených částí vodního okruhu. Přizpůsobení šasi notebooku se především týkalo oblasti výměníků tepla, kde byly odebrány výztuhy zvyšující celkovou tuhost konstrukce notebooku. Dále byl upraven spodní odnímatelný kryt v místě výměníku tepla GPU a vodní pumpy. Drobné nedostatky byly vyřešeny dodatečným ohybem měděných trubiček. Protože byl změněn původní návrh vodního bloku CPU, bylo nutné přidat pasivní měděné chladiče na komponenty, které byly součástí původního chlazení. Dále bylo zapotřebí vyrobit plech, zajišťující dostatečný kontakt procesoru s vodním blokem CPU. Po všech těchto úpravách byla snížena tuhost hořčikového šasi notebooku, přesto s ohledem na jeho použitý materiál nedocházelo ke zdatelné deformaci. Z důvodu vnitřního umístění komponent vodního chlazení byla notebooku odebrána možnost použití druhého slotu pro HDD o velikost 2,5 palce, DVD mechaniky a PCI express slotu. Všechny tyto části většina moderních notebooků již neobsahuje. Zbývající součásti notebooku zůstaly plně

funkční. Pro vytvoření fotografie byl odebrán horní kryt s klávesnicí včetně touchpadu, spodní kryt a víko LCD displeje.

*Obrázek 23 Vodní okruh uvnitř notebooku*



## 5.4 Měření

Kvůli měření hodnot bylo nutné vybrat vhodný software pro monitorování parametrů procesoru a grafické karty. Dále programy, které zajistí dostatečné výpočetní zatížení těchto komponent. Ty byly vybrány na základě předchozích zkušeností při testování notebooků s aktivním chlazením.

### 5.4.1 Aktivní chlazení

Pro měření aktivního i vodního chlazení byly vybrány dva notebooky značky Dell, model Precision M6600. Stejně modely notebooků byly zvoleny především s ohledem na dosažení relevantního porovnání účinnosti chlazení a rozdílů teplot CPU a GPU. První z nich je osazen procesorem od firmy Intel i7-2860QM s hodnotou TDP 45 W (viz. Tabulka 3) a grafickou kartou AMD FirePro M6100 s TGP 75 W (výrobní technologie 28 nm). Druhý notebook je osazen procesorem téže firmy Intel i7-2920XM s hodnotou TDP 55 W (viz. Tabulka 3) a grafickou kartou NVIDIA Quadro 4000M s TGP 100 W (výrobní technologie 40 nm). Hlavním rozdílem mezi těmito notebooky jsou grafické karty v provedení

MXM-III B, které se liší především výrobní technologií. Ostatní komponenty, tedy operační paměť RAM, úložiště HDD a SSD byly v tomto testu zanedbány. Oba notebooky byly vyčištěny od prachu a na CPU i GPU byla nanesena nová teplovodivá pasta MX-4 od výrobce Cooler Master s tepelnou vodivostí  $8,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . To umožnilo při měření a výsledném porovnání výsledků zachovat stejné podmínky. [32; 55]

*Tabulka 3 Použité procesory od firmy Intel [56]*

Procesor	Počet jader / vláken	Základní frekvence	Maximální frekvence	Cache paměť	TDP
i7-2920XM	4/8	2,5 GHz	3,5 GHz	8 MB	55 W
i7-2860QM	4/8	2,5 GHz	3,6 GHz	8 MB	45 W
i7-2760QM	4/8	2,4 GHz	3,5 GHz	6 MB	45 W

Měření bylo prováděno na operačním systému Windows 10 v 64 bitové verzi. Celkem byly použity tři metodiky měření. První pro teploty procesorů, druhá pro grafické karty a třetí pro měření obou těchto komponent současně. K dosažení maximálního výpočetního výkonu procesoru byl použit zátěžový (stress test) program OCCT. Pro monitorování a zaznamenávání teplot procesoru program MSI Afterburner, pro monitorování otáček ventilátorů SpeedFan a udržení maximální frekvence procesoru program TrottleStop. Nastavením frekvence použitých CPU na stabilní maximální hodnotu tak nedocházelo k jejímu snížení operačním systémem na minimální možnou hodnotu 800 MHz. Teplota vzduchu v místnosti byla 24 °C. Před testováním maximálních teplot byly stanoveny limitní hodnoty teplot pro GPU a CPU. Důvodem těchto limitů bylo zamezení poškození testovaných komponent. Po zahřátí komponent notebooku na běžné provozní teploty byl spuštěn program OCCT. Test první metodikou probíhal po dobu 15 minut, po kterou bylo možné přesně určit maximální teploty CPU. Limitní teplotou CPU, při které byl test ukončen, bylo 85°C. Druhou metodikou bylo měření maximálního výpočetního zatížení grafické karty (včetně jejich paměti) programem FurMark. Test probíhal po dobu 15 minut a limitní teplotou k ukončení testů bylo 80 °C na GPU. Pro zaznamenávání teploty GPU a monitorování otáček ventilátorů byly použity stejné programy jako v předchozí a následující metodice. Poslední metodikou bylo maximální výpočetní zatížení grafické karty s částečným výpočetním zatížením CPU. Tento test byl použit s ohledem na reálné používání notebooku, především při hrách. K tomu byl použit program Heaven Benchmark s nastavením rozlišení použitého LCD monitoru na 1366 x 768 bodů. Test komponent touto

metodikou probíhal opět 15 minut. Během všech testů byly také odečítány hodnoty otáček ventilátorů, které není možné nastavit ručně (jsou řízeny notebookem na základě teplot na GPU nebo CPU). Stejný postup měření byl proveden i u druhého notebooku s teplotou vzduchu v místnosti 23,5 °C. [57; 58; 59; 60; 61]

#### 5.4.2 Měření průtoku vodní pumpy

Vodní pumpa je důležitou částí vodního okruhu. Hlavním parametrem ke sledování je její průtok. Při měření bylo použito dvou metodik ke zjištění reálného průtoku čerpadla přes navrženou a vyrobenou část chladicího okruhu (vodní bloky, výměníky tepla, trubičky). Při první metodice byly použity dvě nádoby, hadičky, vodní odstředivá čerpadla, měnič napětí, napájecí adaptér a stopky. Do jedné nádoby byla nalita voda z vodovodního řadu, druhá obsahovala rysku na hodnotě půl litru. Na vstup a výstup čerpadla byla nasazena silikonová trubička o vnějším rozměru 8 mm (tloušťka stěny 1,5 mm). Napájecí kontakty čerpadla byly připojeny na měnič napětí, napájený z AC adaptéru o výstupním napětí 5 V a výkonem 2,1 A. Po nastavení výstupního napětí na měniči (4 V u méně výkonné a 4,5 V u výkonnější pumpy), byla vodní pumpa ponořena do nádoby s vodou. Na začátku měření byly spuštěny stopky a výstupní hadička od čerpadla přesunuta do nádoby s ryskou. Při dosažení hladiny v této nádobce byly stopky zastaveny a hadička vrácena zpět do nádoby s vodou. Vstupní napětí vodní pumpy bylo navyšováno v krocích po 0,5 V. Tato metodika byla použita u obou odstředivých vodních pump. U méně výkonného čerpadla bylo konečné napětí 7 V. V případě výkonnější pumpy byla maximální hodnota napětí 12 V. Druhá metodika navíc obsahovala část vodního okruhu (vodní bloky, výměníky tepla, trubičky). Připojení výstupu vodní pumpy bylo přímo na vodní blok CPU. Měření probíhalo stejně, jako v předchozím případě. Při této metodice byla navíc testována těsnost vyrobeného vodního okruhu. Výsledné hodnoty byly přepočítány na průtok v litrech za hodinu. Měnič napětí nebyl při měření připojen na výstup USB konektoru notebooku z důvodu nesplnění minimálních požadavků na hodnotu proudu. Navíc při výstupním napětí měniče 9,6 V docházelo již k odpojování USB výstupu notebooku. Toto opatření slouží zároveň jako ochrana základní desky notebooku před přetížením či zkratem.

### 5.4.3 Vodní chlazení

Jak již bylo zmíněno, byl pro testování vodního chlazení použit notebook Dell M6600 osazený procesorem firmy Intel i7-2760QM s TDP 45 W (viz. Tabulka 3) a grafickou kartou AMD Radeon HD 6970M s TGP 75 W (výrobní technologie 40 nm). Pro vyplnění mezery (nerovností) mezi chladičem GPU a CPU byla použita teplovodivá pasta MX-4. K notebooku byl připojen menší LCD displej o velikosti 15,6“ s rozlišením 1366 x 728 pixelů. Pro předchozí testy aktivního chlazení byly použity notebooky s velikostí LCD displeje 17,3“ a rozlišením 1920 x 1080 bodů. Pro cirkulaci chladicí kapaliny ve vodním okruhu bylo vybráno na základě výsledků měření méně výkonné odstředivé čerpadlo. Stejně jako při první metodice měření bylo čerpadlo napájeno měničem s výstupním napětím 7 V. Pro napájení měniče nebyl použit USB výstup z notebooku, aby v případě úniku chladicí kapaliny z okruhu mohlo dojít k okamžitému zastavení jejího proudění. Při testování byla jako chladicí kapalina použita destilovaná voda namísto vody z vodovodního řádu. Destilovaná voda by neměla být elektricky vodivá. Přesto byla před měřením několikrát vyměněna z důvodu postupného uvolňování nečistot (především měděné štěpiny vzniklé mechanickým opracováním obrobku) uvnitř vodního okruhu. Při měření byla do okruhu přidána expanzní nádoba. Ta umožnila snadné doplnění chladicí kapaliny a pomocí plnicího vstupu také vložení teplotního čidla sloužícího k měření teploty vody v okruhu. Vodní čerpadlo a expanzní nádoba byly během testování umístěny mimo notebook pro jednodušší kontrolu stavu vodního okruhu. [55]

Měření bylo prováděno na operačním systému Windows 10 v 64 bitové verzi. Metodika testování byla shodná s metodikou použitou u aktivního chlazení, včetně teplotních limitů na CPU a GPU. Navíc byla měřena teplota chladicí kapaliny v expanzní nádobě, na základě které byly spouštěny výpočetní zátěžové testy pro CPU a GPU. Manuální regulace otáček ventilátoru u tohoto notebooku není možná, a proto byla stanovena teplota chladicí kapaliny pro spuštění testů na 46 °C. V některých případech ventilátory ochladily přes výměníky tepla destilovanou vodu pod 40 °C, poté bylo nutné vodu opětovně ohřát výpočetní zátěží na stanovenou teplotu. Při měření byla teplota vzduchu v místnosti 24 °C. K předchozím metodikám byla přidána ještě další. Ta se zaměřila především na maximální účinnost vyrobeného vodního chlazení. Pro tu metodiku bylo použito programu OCCT a FurMark. Nastavení testovacího programu pro grafickou kartu zůstalo neměnné a u programu na

výpočetní zatížení bylo omezeno z 8 na 6 vláken CPU. Teplotní limit v této metodice byl ponechán pro GPU na 80 °C. Po skončení výpočetních testů následovalo dochlazování chladicí kapaliny na nejnižší možnou teplotu. [57; 59; 60; 58; 61]

#### 5.4.4 Měření vlivu průtoku vodní pumpy na teploty komponent

Pro měření vlivu průtoku na teploty CPU a GPU byl použit měnič napětí, voltmetr, teploměr a program pro výpočetní zatížení procesoru a grafické karty Heaven Benchmark. Monitorování teplot CPU a GPU zajišťoval program MSI Afterburner. Nejprve bylo na měniči napětí pro napájení vodní pumpy (výstup z USB konektoru notebooku o napětí 5 V) nastaveno napětí na 7 V, přeměřeno voltmetrem. Odchylka od nastaveného napětí byla 0,02 V. Poté byl vložen teploměr do plnicího otvoru expanzní nádoby. Následovalo spuštění programu pro výpočetní zatížení až do ustálení teplot chladicí kapaliny a GPU. Test byl pozastaven na statické scéně tak, aby nedocházelo ke změně výpočetního zatížení grafické karty. Po jejich ustálení bylo vstupní napětí vodní pumpy postupně snižováno ze 7 na 4 V s krokem po 0,5 V a časovém intervalu 5 minut. Před každým snížením napětí byly odečteny hodnoty teploty chladicí kapaliny a GPU. [59; 58]

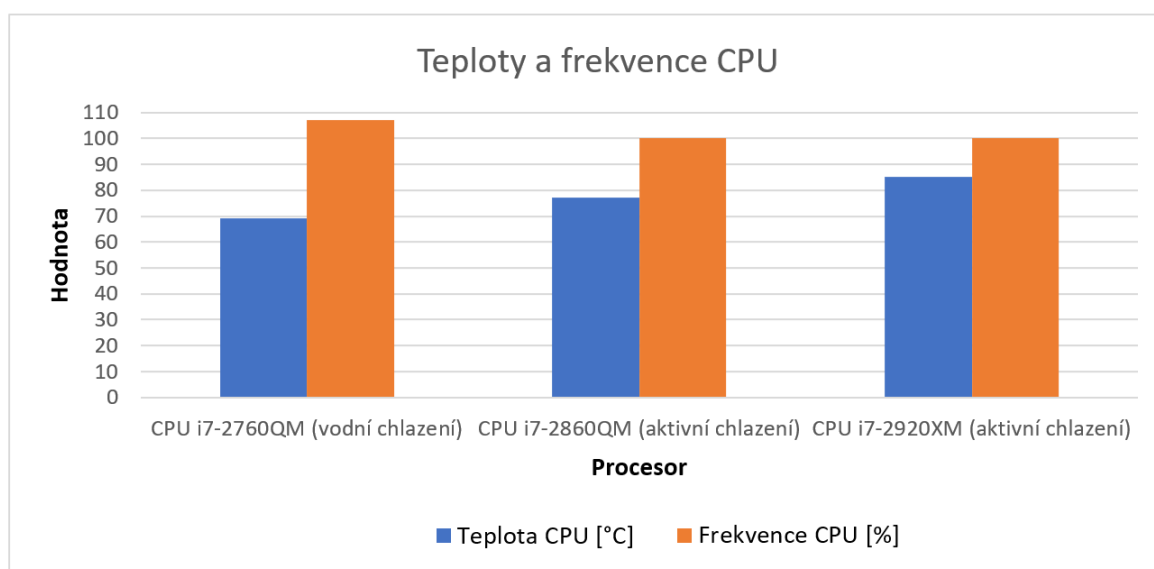
## 6 Výsledky a jejich hodnocení

Na základě výsledků jednotlivých měření je možné stanovit kritéria pro výběr použití aktivního nebo vodního chlazení v notebooku. Následně je možné provést výběr vhodného typu vodní pumpy s odpovídajícím výkonem.

### 6.1 Porovnání vodního a aktivního chlazení notebooku

Na základě výsledných hodnot měření procesorů, lze z grafu 1 zjistit účinnost vodního chlazení uvnitř notebooku v porovnání s původním typem chlazení. První notebook s aktivním chlazením a CPU i7-2860QM, který má TDP 45 W dosáhl průměrné teploty procesoru v zátěži 77 °C. U druhého notebooku s CPU i7-2920XM a TDP procesoru 55 W je průměrná teplota 85 °C. Při dosažení této teploty došlo k zastavení výpočetního zatížení procesoru a testování bylo předčasně ukončeno. Výsledná teplota CPU by dosáhla vyšších hodnot. Notebook s vodním chlazením a procesorem i7-2760QM s TDP 45 W dosáhl průměrné teploty CPU 69 °C. Při porovnání notebooků s procesory, které generují stejný tepelný výkon je rozdíl teploty CPU 8 °C.

*Graf 1 Porovnání teplot a frekvence CPU*

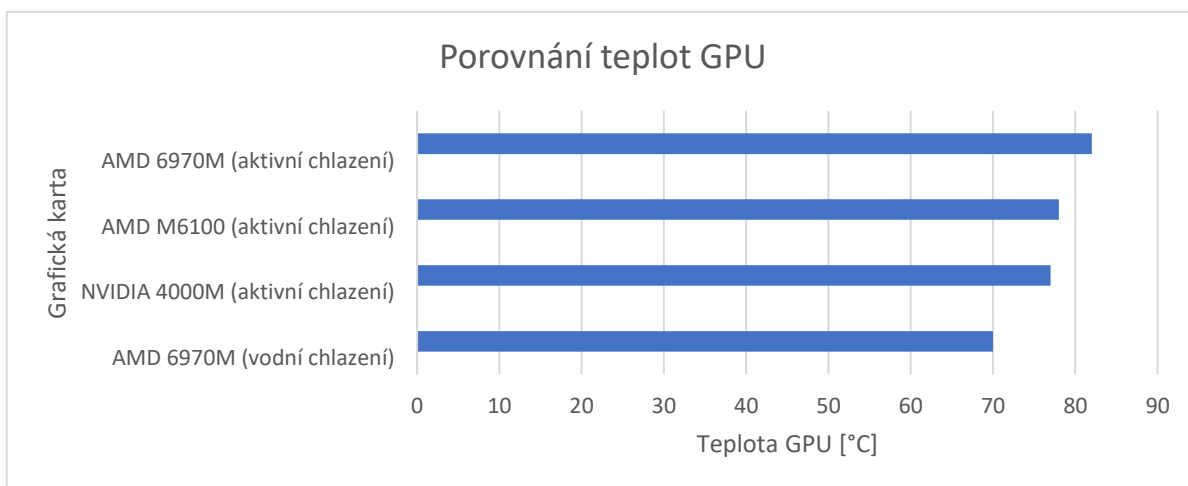


Druhým parametrem, který poukazuje na rozdíly v grafu 1 mezi oběma typy chlazení je frekvence CPU. Procesory u notebooků s aktivním chlazením po většinu testu pracovaly na

jejich základní frekvenci 2500 MHz. Notebook s vodním chlazením během testu měl frekvenci 2600 MHz. Oproti jeho základní frekvenci 2400 MHz došlo k jejímu nárůstu o 8,3 %. To bylo umožněno automatickým navýšením frekvence (technologie Turbo Boost) na základě nižší teploty CPU. Následkem tohoto nárůstu došlo ke zvýšení výpočetního výkonu procesoru. Řízené nastavení vyšších frekvencí procesoru, než je jeho základní frekvence, není u tohoto notebooku možné. Důvodem je omezení výrobce, který se zaměřuje u této modelové řady především na dlouhodobou spolehlivost.

Teploty GPU jsou dalším parametrem, kterým je možné na základě výsledků měření z grafu 2 porovnávat účinnost obou typů chlazení v notebooku. Grafická karta AMD 6970M v notebooku s aktivním chlazením dosáhla při výpočetním testu teploty GPU 82°C. Druhá grafická karta od výrobce AMD má stejnou hodnotu TGP a dosáhla teploty GPU 78°C. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben jejich rozdílnou výrobní technologií (40 nm oproti 28 nm). Poslední testovanou grafickou kartou v notebooku s původním chlazením je NVIDIA 4000M. Hodnota jejího TGP je 100 W, přičemž teplota GPU v zátěžovém testu byla 77 °C. Přestože grafická karta od firmy NVIDIA má hodnotu TGP o 25 W vyšší, na výsledných hodnotách teplot se rozdíl neprojevil. Notebook s vodním chlazením a grafickou kartou AMD 6970M byl schopen uchládit GPU při zátěžovém testu na teplotu 70 °C. Při použití stejné grafické karty u aktivního a vodního chlazení je tedy výsledný rozdíl teplot 12 °C.

*Graf 2 Porovnání teplot GPU měřených při jejich výpočetním zatížení*

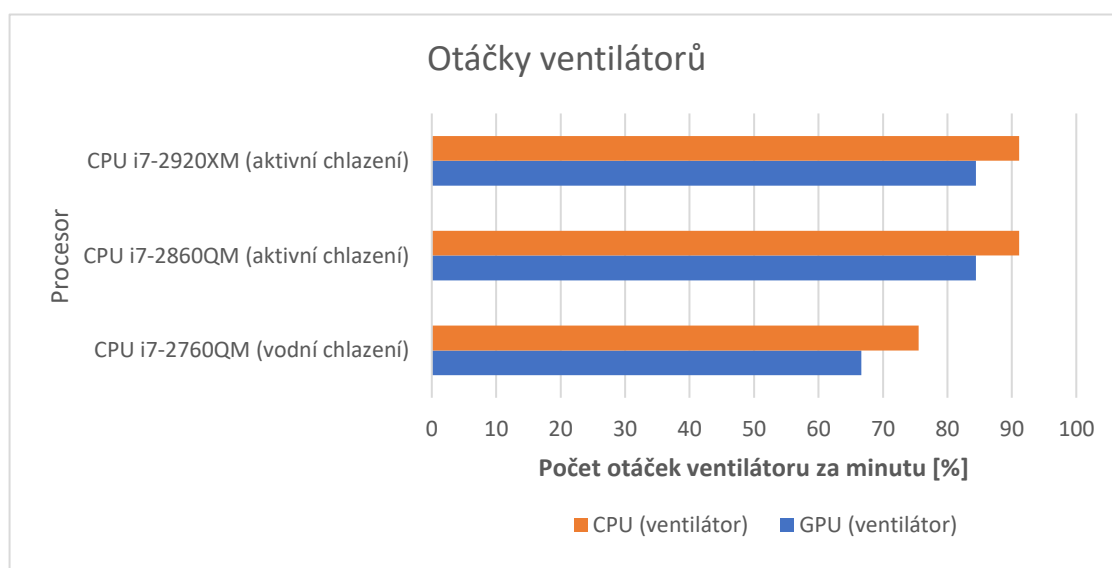




U grafické karty AMD 6970M je možné dále navyšovat frekvence GPU i jeho paměti. Při použití této grafické karty v kombinaci s notebookem chlazeným vodou, lze dosáhnout vyššího výpočetního výkonu. Zároveň zůstanou zachovány teploty grafického čipu jako u notebooku s aktivním chlazením.

Dalším parametrem, který má výrazný vliv na účinnost obou typů chlazení, jsou otáčky ventilátorů. Byly porovnávány otáčky ventilátorů u jednotlivých použitých CPU s oběma typy chlazení notebooku. Naměřené hodnoty otáček ventilátorů notebooku při použití vodního i aktivního chlazení jsou vyobrazeny v grafu 3. Maximální naměřená hodnota otáček ventilátoru CPU i GPU byla zjištěna programem SpeedFan. Bylo dosaženo hodnoty 4500 otáček za minutu. K této hodnotě se zároveň vztahuje porovnání otáček ventilátorů uvedených v grafu 3. V případě aktivního chlazení procesorů jsou v obou případech naměřené hodnoty otáček ventilátoru CPU 91,1 % (4100 otáček za minutu). Hodnoty otáček u GPU ventilátorů u tohoto typu chlazení dosahovaly 84,4 % (3500 otáček za minutu). U notebooku s vodním chlazením je hodnota CPU otáček ventilátoru 75,5 % (3400 otáček za minutu) a u ventilátoru GPU je hodnota otáček 66,6 % (3000 otáček ventilátoru). Rozdíl otáček mezi vodním a aktivním chlazením u ventilátoru CPU je tedy 16,5 %. V případě ventilátoru GPU je rozdíl těchto hodnot 17,8 %. Při použití procesoru i7-2920XM byl test výpočetního zatížení ukončen předčasně z důvodu překročení stanovené limitní teploty.

Graf 3 Porovnání otáček ventilátorů při výpočetním zatížení CPU

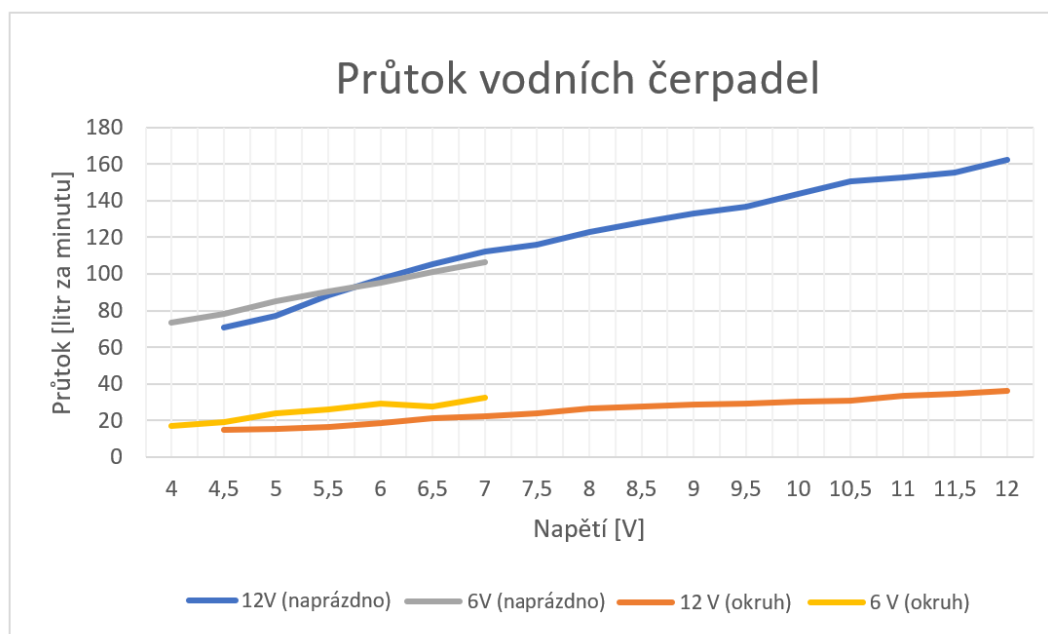


Z těchto výsledků lze odvodit, že vodní chlazení je oproti aktivnímu účinnější, a vlivem nižších otáček ventilátorů dochází také ke snížení akustického hluku. Pro zvýšení chladicího účinku u notebooku s vodním chlazením, je takto možné zvýšit otáčky ventilátorů a dosáhnout tak nižších provozních teplot procesoru a grafické karty.

## 6.2 Měření průtoku vodní pumpy

U odstředivých čerpadel byly měřeny hodnoty průtoku chladicí kapaliny naprázdno. Závislost průtoku na napájecím napětí vodní pumpy je pro porovnání zobrazena v grafu 4. Výkonnější pumpa (jmenovité napětí 12 V) dosáhla při napájecím napětí 4,5 V průtoku 70,6 litrů za hodinu. Při maximálním napájecím napětí 12 V dosáhl její maximální průtok hodnoty 162,2 litrů za hodinu. U méně výkonného vodního čerpadla (jmenovité napětí 6 V) s napájecím napětím 4,0 V dosáhl průtok 78,3 litrů za hodinu. Maximální hodnoty průtoku 106,7 litrů za hodinu bylo dosaženo při napětí 7 V. Rozdíl průtoků naprázdno mezi odstředivými čerpadly byl 55,5 litrů za hodinu (55 %).

Graf 4 Porovnání průtoku odstředivých čerpadel naprázdno a po připojení k vodnímu okruhu



Pro výběr vhodného čerpadla jsou však podstatnější hodnoty maximálního průtoku chladicí kapaliny skrze vyrobený vodní okruh. Průtok u méně výkonného čerpadla při napájecím napětí 4 V byl 16,9 litrů za hodinu a při napájecím napětí 7 V dosahoval 32,7 litrů za hodinu.

Výkonnější čerpadlo při napájecím napětí 4,5 V mělo průtok 14,8 litrů za hodinu. Maximálního průtoku 36 litrů za hodinu dosáhlo čerpadlo při napájecím napětí 12 V. Dále jsou porovnány hodnoty průtoku naprázdno a po připojení do vodního okruhu u méně výkonného čerpadla. Rozdíl maximálních průtoků byl 74 litrů za hodinu. U výkonnější varianty čerpadla byl tento rozdíl 126,2 litrů za hodinu. Rozdíl mezi čerpadly při maximálním průtoku chladicí kapaliny vodním okruhem byl tedy 1,3 litru za hodinu.

Z výsledků měření vyrobeného vodního okruhu vyplývá, že výrobcem udávaný parametr maximálního průtoku zvolených čerpadel nemá výrazný vliv na výsledný průtok chladicí kapaliny vodním okruhem.

### 6.3 Vliv napájecího napětí vodní pumpy na teploty komponent

Na základě výsledků měření uvedených v tabulce 4, je možné stanovit vliv napájecího napětí vodní pumpy na změnu teploty GPU. Při napájení vodního čerpadla napětím 4 a 4,5 V byla teplota GPU 71 °C. Po zvýšení jeho napětí na 5 V byl ve vodním okruhu zvýšen průtok chladicí kapaliny a tím došlo ke snížení teploty GPU na 70 °C. Následné zvyšování napětí vodního čerpadla již nemělo na teplotu GPU vliv. Rozdíl mezi naměřenou minimální a maximální teplotou GPU v závislosti na napájecím napětí čerpadla byl jen 1°C.

*Tabulka 4 Vliv napájecího napětí vodní pumpy na teploty GPU*

Teplota GPU [°C]	71	71	70	70	70	70	70
Napětí vodní pumpy [V]	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7

Z naměřených výsledků vyplývá, že je možné snížit napájecí napětí vodní pumpy, a tím také průtoku chladicí kapaliny, aniž by došlo ke zdatelnému zvýšení teploty CPU a GPU.

## 7 Závěr

Ve své diplomové práci jsem se zabýval návrhem vodního okruhu chlazení notebooku za účelem zjištění možnosti účinnějšího chlazení moderních výkonných notebooků. Téma vodního chlazení lze pojmut rozsáhlým způsobem, proto jsou uváděny pouze základní pojmy a informace z dané problematiky. V teoretické části jsou popsány základní fyzikální principy důležité pro návrh i následnou realizaci řešení vodního okruhu chlazení. Dále je popsán úvod do problematiky přenosu tepla, vlastnosti různých chladících médií i důležité parametry procesorů a grafických čipů. Závěr teoretické části je věnován nejčastěji využívaným typům chlazení, přehledu materiálů používaných k výrobě jednotlivých komponent a popisu částí vodního okruhu.

V praktické části práce jsem se zabýval návrhem vodního chlazení pro vybraný notebook. Nejprve simulací částí vodního okruhu na základě návrhu, dále ruční výrobou těchto částí, konečným sestavením chladícího okruhu a následným otestováním jeho funkčnosti. Důležitým poznatkem je nutnost dodržet správný průtok chladicí kapaliny, která zajišťuje předávání tepla od procesoru a grafického čipu chladicí kapalině. Při navrhování vodních bloků a výměníků tepla je tedy důležité jejich vnitřní uspořádání. Podstatná je také volba vhodného materiálu, ze kterého jsou vytvořeny a následně spojeny části vodního okruhu. S tím souvisí i výběr správných technologických postupů od řezání, přes broušení, pájení až po závěrečné spojení vodního okruhu. Důležitá je také volba vhodných pracovních nástrojů. Závěr praktické části je věnován metodice měření původního aktivního a vyrobeného vodního chlazení notebooku, spolu s měřením průtoku vodních čerpadel.

Ze závěrečných výsledků a měření vyplývá několik podstatných zjištění. Mezi ně patří u aktivního chlazení notebooku především vysoké teploty CPU a GPU při výpočetní zátěži, spojené s vysokou hlučností ventilátorů. V případě vodního chlazení je to dosažení požadovaného chladícího účinku vodního okruhu, a s tím spojený výběr vhodného vodního čerpadla. Na základě těchto zjištění je pro výkonné notebooky a All-in-One počítače lepší volbou použití správně navrženého vodního chlazení. Ze zpracování této práce není zcela jasné, proč přes veškeré zjištěné výhody výrobci po realizaci funkčních řešení od tohoto konceptu upustili.

## 8 Seznam použitých zdrojů

1. Křivohlávek, Jindřich. *Chlazení počítače*. Brno : Computer Press, a.s., 2007. ISBN 978-80-251-1509-1.
2. Králová, Magda. VNITŘNÍ ENERGIE. *Techmania*. [Online] [Citace: 25. únor 2019.] <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/struktura-latek/vnitri-energie>.
3. Reichl, Michal. Přenos vnitřní energie. *Encyklopedie fyziky*. [Online] 2019. [Citace: únor. 25 2019.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/582-prenos--vnitri-energie>.
4. Reichl, Jaroslav. Měrná tepelná kapacita. *Encyklopedie fyziky*. [Online] 2019. [Citace: 26. únor 2019.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/578-merna-tepelna-kapacita>.
5. Engineering ToolBox. Specific Heat of common Substances. *The Engineering ToolBox*. [Online] 2003. [Citace: 27. únor 2019.] [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d\\_391.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html).
6. Rouse, Margaret. microprocessor (logic chip). *TechTarget*. [Online] duben 2006. [Citace: únor. 25 2019.] <https://whatis.techtarget.com/definition/microprocessor-logic-chip>.
7. —. processor (CPU). *TechTarget*. [Online] září 2016. [Citace: 19. únor 2019.] <https://whatis.techtarget.com/definition/processor>.
8. Corporation, Intel. Intel® Core™ i7-2920XM Processor Extreme Edition. *intel*. [Online] 2011. [Citace: 26. leden 2019.] <https://ark.intel.com/products/52237/Intel-Core-i7-2920XM-Processor-Extreme-Edition-8M-Cache-up-to-3-50-GHz->.
9. Intel Corporation. Intel Core i9-8950hk Processor. *intel*. [Online] 2018. [Citace: 19. leden 2019.] <https://ark.intel.com/products/134903/Intel-Core-i9-8950HK-Processor-12M-Cache-up-to-4-80-GHz->.
10. Cutress, Ian. The AMD Zen and Ryzen 7 Review: A Deep Dive on 1800X, 1700X and 1700. *AnandTech*. [Online] 2. březen 2017. [Citace: 2. březen 2019.]

<https://www.anandtech.com/show/11170/the-amd-zen-and-ryzen-7-review-a-deep-dive-on-1800x-1700x-and-1700/10>.

11. Bach, Matt. Specs Explained: CPU. *Puget systems*. [Online] 15. únor 2012. [Citace: 2. březem 2019.] <https://www.pugetsystems.com/labs/articles/Specs-Explained-CPU-137/>.

12. Pin Grid Array (PGA). *techopedia*. [Online] [Citace: 2. březem 2019.] <https://www.techopedia.com/definition/1283/pin-grid-array-pga>.

13. BGA - Ball Grid Array. *multi-cb*. [Online] 2019. [Citace: 2. březem 2019.] <https://www.multi-circuit-boards.eu/en/pcb-design-aid/bga-pcb-design-for-ball-grid-array.html>.

14. Techopedia Inc. *techopedia*. *Ball Grid Array (BGA)*. [Online] 2019. [Citace: 2. březem 2019.] <https://www.techopedia.com/definition/2151/ball-grid-array-bga>.

15. —. Land Grid Array (LGA). *techopedia*. [Online] 2019. [Citace: 2. březem 2019.] <https://www.techopedia.com/definition/27799/land-grid-array-lga>.

16. Rouse, Margaret. GPU (graphics processing unit). *TechTarget*. [Online] květen 2018. [Citace: 20. únor 2019.] <https://searchvirtualdesktop.techtarget.com/definition/GPU-graphics-processing-unit>.

17. Advanced Micro Devices, Inc. Radeon RX 480 Graphics. *www.amd.com*. [Online] 2019. [Citace: 15. únor 2019.] <https://www.amd.com/en/products/graphics/radeon-rx-480>.

18. Bach, Matt. Specs Explained: Video Card. *Puget systems*. [Online] 22. duben 2013. [Citace: 3. březem 2019.] <https://www.pugetsystems.com/labs/articles/Specs-Explained-Video-Card-463/>.

19. Bešťák, Ondřej. Grafické karty v noteboocích: fakta, mýty a tipy. *cnew.cz*. [Online] 30. říjen 2013. [Citace: 2. březem 2019.] <https://www.cnews.cz/graficke-karty-v-noteboocich-fakta-myty-a-tipy/>.

20. Verma, Akshat. MXM Graphics Card Types, Models & MXM GPU List. *Graphics Card Hub*. [Online] 25. únor 2019. [Citace: 2. březen 2019.] <https://graphicscardhub.com/mxm-graphics-card-gpu-list/>.
21. Cutress, Ian. The AMD Threadripper 2990WX 32-Core and 2950X 16-Core Review. *ANANDTECH*. [Online] 13. srpen 2018. [Citace: 3. únor 2019.] <https://www.anandtech.com/show/13124/the-amd-threadripper-2990wx-and-2950x-review/12>.
22. —. Why Intel Processor Draw More Power Than Expected. *AnandTech*. [Online] 9. listopad 2018. [Citace: 18. leden 2019.] <https://www.anandtech.com/show/13544/why-intel-processors-draw-more-power-than-expected-tdp-turbo>.
23. Intel Corporation. 7th Generation Intel Processor Families for S Platforms and Intel Core X-Series Processor Family. *Intel*. [Online] prosice 2018. [Citace: 8. únor 2019.] <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/datasheets/7th-gen-core-family-desktop-s-processor-lines-datasheet-vol-1.pdf>.
24. Cutress, Ian. The AMD 2nd Gen Ryzen Deep Dive: The 2700X, 2700, 2600X, and 2600 Tested. *ANANDTECH*. [Online] 19. duben 2018. [Citace: 6. únor 2019.] <https://www.anandtech.com/show/12625/amd-second-generation-ryzen-7-2700x-2700-ryzen-5-2600x-2600/8>.
25. AMD\_Robert. TDP vs. "TDP". *reddit*. [Online] 2018. [Citace: 7. únor 2019.] [https://www.reddit.com/r/Amd/comments/6svy1a/tdp\\_vs\\_tdp/](https://www.reddit.com/r/Amd/comments/6svy1a/tdp_vs_tdp/).
26. Chen, Jay. PNY Pro Tips: #1 Powering your GPU investment. *pnny pro blog*. [Online] 18. květen 2018. [Citace: 16. únor 2019.] <http://blog.pny.com/blogpnycom/pny-pro-tips-1-powering-your-gpu-investment>.
27. NVIDIA Corporation. Řady 10 herní notebooky. *nvidia*. [Online] 2018. [Citace: 15. únor 2019.] <https://www.nvidia.com/cs-cz/geforce/products/10series/laptops/>.
28. Prema. Power Draw via MXM Interface. *NotebookReview*. [Online] 18. listopad 2016. [Citace: 17. únor 2019.] <http://forum.notebookreview.com/threads/power-draw-via-mxm-interface.798389/#post-10391387>.

29. ZOTAC. ZOTAC GeForce® GTX 1060 3GB AMP! Edition. *ZOTAC*. [Online] 2019. [Citace: 17. únor 2019.] [https://www.zotac.com/cz/product/graphics\\_card/zotac-geforce-gtx-1060-3gb-amp-edition#spec](https://www.zotac.com/cz/product/graphics_card/zotac-geforce-gtx-1060-3gb-amp-edition#spec).
30. Kwolek, Jirka. WD: Za disky výkonnější a tišší. *PCtuning*. [Online] 29. leden 2004. [Citace: 8. březen 2019.] [https://pctuning.tyden.cz/hardware/disky-cd-dvd-br/3964-wd-za-disky-vykonnejsi\\_a-tissi](https://pctuning.tyden.cz/hardware/disky-cd-dvd-br/3964-wd-za-disky-vykonnejsi_a-tissi).
31. Sunon. MagLev Motor Fan. *Sunon*. [Online] 2004. [Citace: 5. březen 2019.] <https://strawberry-linux.com/pub/VapoBearingMaglevTechnology.pdf>.
32. MX-4. *Arctic*. [Online] [Citace: 28. únor 2019.] [https://www.arctic.ac/eu\\_en/mx-4.html](https://www.arctic.ac/eu_en/mx-4.html).
33. Wallossek, Igor. Thermal Paste Round-up: 85 Products Tested. *tomshardware*. [Online] 4. srpen 2017. [Citace: 28. únor 2019.] <https://www.tomshardware.com/reviews/thermal-paste-comparison,5108-9.html>.
34. Coollaboratory Liquid Ultra. *Coollaboratory*. [Online] [Citace: 28. únor 2019.] <https://www.coollaboratory.com/product/coollaboratory-liquid-ultra/>.
35. Vítek, Jan. Arctic Thermal Pad: teplovodivé podložky dodělej si sám. *Svět Hardware*. [Online] 20. květen 2018. [Citace: 1. březen 2019.] <https://www.svethardware.cz/arctic-thermal-pad-teplovodive-podlozky-dodelej-si-sam/40499>.
36. —. Radeon VII dostal tekutý kov pro chlazení, polepšil si? *Svět Hardware*. [Online] 11. únor 2019. [Citace: 1. březen 2019.] <https://www.svethardware.cz/radeon-vii-dostal-tekuty-kov-pro-chlazen-polepsil-si/48654>.
37. Skácel, Jan. Galvanická koroze - skutečná zkáza vodníků. *pctuning*. [Online] 6. říjen 2008. [Citace: 16. leden 2019.] [https://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/11719-galvanicka\\_koroze\\_skutecna\\_zkaza\\_vodniku](https://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/11719-galvanicka_koroze_skutecna_zkaza_vodniku).
38. Gobor, Atila. Aluminium vs. Copper. *ekwb*. [Online] 23. červen 2017. [Citace: 16. leden 2019.] <https://www.ekwb.com/blog/aluminium-vs-copper/>.



39. JayzTwoCents. Cutting open an AIO with mixed metals. *Youtube*. [Online] 1. prosinec 2018. [Citace: 4. březen 2019.] <https://www.youtube.com/watch?v=c1ZBIImQeJg>.
40. Druhy čerpadel. Čerpadla odstředivá. *Druhy čerpadel*. [Online] 2010. [Citace: 3. březen 2019.] <https://druhy-čerpadel.cz/hydrodynamicka/odstrediva/>.
41. VFD Variable Frequency Drive and Centrifugal Pump. *OEMPanels*. [Online] 2019. [Citace: 3. březen 2019.] <http://www.oempanels.com/vfd-variable-frequency-drive-and-centrifugal-pump>.
42. Tao, Li, Chin Foo, Goh a Jan, Ma. Development of Piezoelectric Diaphragm Pump. *Research Gate*. [Online] 2. únor 2012. [Citace: 3. březen 2019.] [https://www.researchgate.net/publication/243964166\\_Development\\_of\\_Piezoelectric\\_Diaphragm\\_Pump](https://www.researchgate.net/publication/243964166_Development_of_Piezoelectric_Diaphragm_Pump).
43. Vojáček, Antonín. Principy průmyslových čerpadel – 6.díl - pístová čerpadla. *automatizace.hw*. [Online] 2014. [Citace: 6. březen 2019.] <https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovyh-čerpadel-6dil-pistova-čerpadla>.
44. Šulc, Tomáš. Teoretický i praktický průvodce vodním chlazením. *pctuning*. [Online] 12. srpen 2013. [Citace: 18. leden 2019.] <https://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/27530-teoreticky-i-prakticky-pruvodce-vodnim-chlazenim>.
45. Skácel, Jan a Nekvapil, Vojtěch. Vodní chlazení - detailní konstrukce bloků. *pctuning*. [Online] 30. červen 2008. [Citace: 17. leden 2019.] [https://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/11150-vodni\\_chlazení-detailni\\_konstrukce\\_bloku](https://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/11150-vodni_chlazení-detailni_konstrukce_bloku).
46. Yamada, K. Fujitsu releases the interior of water cooled notebook "FMV-BILBO NW". *PC Watch*. [Online] 16. prosinec 2008. [Citace: 23. leden 2019.] <https://pc.watch.impress.co.jp/docs/2008/1216/fujitsu.htm>.
47. Honda, Masazaku. Advancing the standardization of water cooling components for notebook PCs Hitachi. *PC Watch*. [Online] 19. září 2008. [Citace: 23. leden 2019.] <https://pc.watch.impress.co.jp/docs/2008/1216/fujitsu.htm>.

48. Asetek Inc. Inside Asetek Labs - Liquid cooling an Overclocked Alienware Laptop. *Youtube*. [Online] 20. březen 2012. [Citace: 24. leden 2019.] <https://www.youtube.com/watch?v=pz4a1RukOzA>.
49. Asetek, Inc. Asetek Demonstrates Liquid Cooling For Laptop And All-In-One PCs. *ASETEK*. [Online] 20. březen 2012. [Citace: 26. leden 2019.] <https://www.asetek.com/press-room/news/2012/asetek-demonstrates-liquid-cooling-for-laptop-and-all-in-one-pcs/>.
50. Kurzy.cz. Kurzy ČNB v roce 2009, historie kurzů měn. *kurzycz*. [Online] 2009. [Citace: 24. leden 2019.] <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/historie/rok-2009/>.
51. Hinum, Klaus. AMD Radeon HD 6970M. *notebookcheck*. [Online] 9. květen 2017. [Citace: 26. leden 2019.] <https://www.notebookcheck.net/AMD-Radeon-HD-6970M.43077.0.html>.
52. ©ASUSTeK Computer Inc. Asus GX700VO. *Asus*. [Online] 2016. [Citace: 27. leden 2019.] <https://www.asus.com/us/Laptops/ROG-GX700VO/>.
53. ANSYS, Inc. ANSYS Free Student Software Downloads. *ANSYS*. [Online] 2019. [Citace: 15. březen 2019.] <https://www.ansys.com/academic/free-student-products>.
54. Autodesk Inc. AUTOCAD. *AUTODESK*. [Online] 2017. [Citace: 25. květen 2017.] <https://www.autodesk.com/education/free-software/autocad>.
55. Notebookcheck.net. AMD Radeon HD 6970M vs NVIDIA Quadro 4000M vs AMD FirePro M6100. *notebookcheck*. [Online] 2019. [Citace: 15. březen 2019.] [https://www.notebookcheck.net/Radeon-HD-6970M-vs-Quadro-4000M-vs-FirePro-M6100\\_2058\\_2431\\_5057.247598.0.html](https://www.notebookcheck.net/Radeon-HD-6970M-vs-Quadro-4000M-vs-FirePro-M6100_2058_2431_5057.247598.0.html).
56. Notebookcheck.net . Intel Core i7-2760QM vs Intel Core i7-2860QM vs Intel Core i7-2920XM. *notebookcheck*. [Online] 2011. [Citace: 15. březen 2019.] [https://www.notebookcheck.net/2760QM-vs-2860QM-vs-2920XM\\_2841\\_2844\\_1503.247596.0.html](https://www.notebookcheck.net/2760QM-vs-2860QM-vs-2920XM_2841_2844_1503.247596.0.html).
57. @JeGX. Geeks3D FurMark. *FurMark*. [Online] 16. leden 2019. [Citace: 20. březen 2019.] <https://geeks3d.com/furmark/>.

58. Micro-Star INT'L CO. MSI AFTERBURNER. *msi*. [Online] 2019. [Citace: 20. březen 2019.] <https://www.msi.com/page/afterburner>.
59. UNIGINE. Heaven. *benchmark unigine*. [Online] 2019. [Citace: 20. březen 2019.] <https://benchmark.unigine.com/heaven>.
60. OCCT 4.5.1 Available ! *OCCT*. [Online] 14. srpen 2017. [Citace: 20. březen 2019.] <http://www.ocbase.com>.
61. Comparetti, Alfredo Milani. SpeedFan 4.52. *Speedfan*. [Online] 2016. [Citace: 20. březen 2019.] <http://www.almico.com/speedfan.php>.

## 9 Seznam obrázků

Obrázek 1. Socket typu PGA (vlevo), LGA (uprostřed) a technologie BGA (vpravo) [13]	8
Obrázek 2. Grafická karta osazená pomocí technologie BGA (vlevo) a typ MXM-III B (vpravo).....	10
Obrázek 3 Heatpipe (vlevo) a vnitřní drážkovitá struktura (vpravo).....	14
Obrázek 4. Princip ventilátoru s ložiskem typu MagLev [1; 31].....	16
Obrázek 5 Galvanická koroze vodního bloku [37].....	18
Obrázek 6 Princip odstředivé pumpy (vlevo) a piezoelektrické membránové pumpy (vpravo) [41; 42].....	19
Obrázek 7 Typy vodních bloků: typ had (vlevo), mikro kanálky (uprostřed), válce (vpravo) [45].....	21
Obrázek 8 Paralelní výměník tepla použitý v noteboocích [46; 47].....	22
Obrázek 9 Rozdíl mezi rozložením tepelného výkonu u heatpipe (vlevo) a vodního chlazení (vpravo) [49].....	24
Obrázek 10 Vodní okruh (vlevo), Vodní blok s mikrokanálky (uprostřed), piezoelektrické membránové pumpa (vpravo) [47].....	24
Obrázek 11 Vodní chlazení notebooku Dell Alienware 18x od firmy Asetek [49] .....	25
Obrázek 12 Návrh vodního okruhu do notebooku v programu AutoCAD 2017.....	27
Obrázek 13 Simulace proudění chladící kapaliny uvnitř vodního bloku CPU. Bez vnitřního uspořádání (vlevo), čtvercová matrice (uprostřed) a drážky (vpravo).....	28
Obrázek 14 Simulace proudění chladící uvnitř vodního bloku GPU. čtvercová matrice (vlevo), drážky (uprostřed) a změněný úhel drážek (vpravo).....	29

Obrázek 15 Simulace proudění chladicí kapaliny ve výměníku tepla. CPU (vlevo) a GPU (vpravo).....	30
Obrázek 16 Simulace proudění chladicí kapaliny v expanzní nádobě .....	31
Obrázek 17 Odstředivé vodní čerpadlo .....	33
Obrázek 18 Vnitřní uspořádání vodního bloku GPU (vlevo) a vodního bloku CPU (vpravo) .....	35
Obrázek 19 Vnitřní uspořádání výměníku tepla GPU (vlevo), CPU (uprostřed) a výsledný stav (vpravo) .....	38
Obrázek 20 Vnitřní struktura expanzní nádoby (vlevo) a výsledná expanzní nádoba (vpravo) .....	39
Obrázek 21 Vodní okruh před závěrečným pájením .....	39
Obrázek 22 Vnitřní struktura vodního bloku CPU (vlevo), vodní blok CPU před pájením měděných trubiček (uprostřed), vnitřní struktura vodního bloku GPU (vpravo) .....	40
Obrázek 23 Vodní okruh uvnitř notebooku .....	42

## 10 Seznam tabulek

Tabulka 1. Hodnoty tepelné vodivosti materiálů [2] .....	6
Tabulka 2. Měrná tepelná kapacita látek při 20 °C [5].....	6
Tabulka 3 Použité procesory od firmy Intel [56].....	43
Tabulka 4 Vliv napájecího napětí vodní pumpy na teploty GPU .....	51

# 11 Seznam grafů

Graf 1 Porovnání teplot a frekvence CPU .....	47
Graf 2 Porovnání teplot GPU měřených při jejich výpočetním zatížení .....	48
Graf 3 Porovnání otáček ventilátorů při výpočetním zatížení CPU .....	49
Graf 4 Porovnání průtoku odstředivých čerpadel naprázdno a po připojení k vodnímu okruhu .....	50