



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# NÁVRH JEDNOTKY PRO VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA Z VÝPOČETNÍHO SYSTÉMU

DESIGN OF A UNIT FOR UTILIZATION OF WASTE HEAT FROM A COMPUTING SYSTEM

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Valachovič

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radomír Chýlek

BRNO 2020



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Filip Valachovič**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Radomír Chýlek**  
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh jednotky pro využití odpadního tepla z výpočetního systému

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude věnována návrhu jednotky pro využití odpadního tepla z počítačových výpočetních systémů. Ty se v současnosti stávají významným celosvětovým spotřebitelem elektrické energie, a to také v důsledku vzniku digitálních měn – kryptoměn. Tato zařízení je nutné chladit na obvyklé provozní teploty a přebytečné teplo se běžně bez dalšího využití odvádí. Student posoudí využitelnost odpadního tepla pro vybraný výpočetní systém, navrhne jednotku pro využití odpadního tepla a zhodnotí její ekologický a ekonomický přínos.

### Cíle bakalářské práce:

1. Stručně představit problematiku provozu a chlazení výpočetních systémů pro těžbu kryptoměn a zhodnotit jejich energetickou náročnost.
2. Návrh jednotky na využití odpadního tepla z daného výpočetního systému a numerický výpočet.
3. Posouzení využitelnosti a ekonomičnosti jednotky.

### Seznam doporučené literatury:

PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-214-4300-6.

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Globálne otepľovanie a s tým spojené vysoké náklady na energiu patria medzi hlavné problémy súčasnosti. Dôsledkom toho je záujem o opätovné využitie odpadovej energie. Táto bakalárska práca je venovaná návrhu a posúdeniu potenciálneho využitia odpadného tepla generovaného systémom pre ťažbu kryptomien. Pričom prvá časť práce sa zaoberá procesom ťažby kryptomien ako celku a ich energetickej náročnosti. Práca, mimo iné, pojednáva o možnostiach chladenia a následnej rekuperácie odpadného tepla z týchto systémov. Súčasťou práce je teoretický návrh jednotky pre využitie odpadného tepla z mining rigov, pričom je brané v úvahu ponorné chladenie s výslednou ekonomickou bilanciou.

### **Klíčová slova**

Kryptomena, ťažba, mining rig, chladenie, ponorné chladenie, dielektrická kvapalina, využitie odpadného tepla, profitabilita ťažby

## **ABSTRACT**

Global warming and the associated high energy costs are considered as the main problems at presents. As a result, there is an interest in reusing waste energy. This bachelor thesis is devoted to the design and assessment of the potential use of waste heat generated by the systems for the mining cryptocurrencies. The first part of the work deals with the process of mining cryptocurrencies as a whole and their energy consumption. The work, among other things, deals with the possibilities of cooling and subsequent recovery of waste heat from these systems. Part of the work is a theoretical design of a unit for waste heat recovery from mining rigs, considering immersion cooling with the resulting economic balance.

### **Key words**

Cryptocurrencies, mining, mining rig, cooling, immersion cooling, dielectric fluid, waste heat recovery, profitability cryptocurrencies mining

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VALACHOVIČ, Filip. *Návrh jednotky pro využití odpadního tepla z výpočetního systému* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121751>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Radomír Chýlek.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na téma Návrh jednotky pro využití odpadního tepla z výpočetního systému vypracoval samostatne pod vedením svojho vedúceho práce Ing. Radomíra Chýlka. Vychádzal som iba zo svojich vedomostí, znalostí a s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených na konci tejto práce.

V Brne dňa 25.6.2020

.....  
Filip Valachovič

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto mieste by som sa rád poďakoval svojmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Radomír Chýlkovi za obetavú spolupráci, cenné rady, trpezlivosť, pripomienky a odborné vedenie počas celej doby riešenia problematiky bakalárskej práce.

## OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Chod výpočtového systému pre ťažbu kryptomien.....	12
1.1 Decentralizácia, Kryptomena a Blockchain.....	12
1.2 Ťažba – Mining.....	12
1.3 Mining rig.....	13
2 Energetická náročnosť.....	15
2.1 Účinnosť ťažby.....	16
3 Chladienie výpočtových systémov (Mining rigov).....	18
3.1 Chladienie vzduchom.....	18
3.1.1 CRAC technológia.....	18
3.1.2 CRAH technológia.....	19
3.1.3 Free cooling.....	20
3.2 Chladienie kvapalinou.....	21
3.2.1 In-Row cooling a Rear door cooling.....	21
Rear door cooling.....	21
In-Row cooling.....	22
3.2.2 Priame chladienie kvapalinou.....	23
3.2.3 Ponorné chladienie.....	23
Dvojfázové ponorné chladienie.....	23
Jednofázové ponorné chladienie.....	24
4 Odpadné teplo.....	25
Technológie zhodnocovania odpadného tepla.....	26
4.1 Chladienie odpadným teplom.....	26
4.1.1 Absorpčné chladienie.....	26
4.1.2 Adsorpčné chladienie.....	27
4.2 Odpadné teplo ako potenciálny zdroj Elektrickej energie.....	28
4.2.1 Organický Rankinov cyklus (ORC).....	28
4.2.2 Termoelektrický generátor (TEG).....	30
4.2.3 Piezoelektrický efekt.....	31
4.3 Priame využitie odpadného tepla.....	31
5 Návrh.....	33
5.1 Voľba mining rigu.....	33
5.2 Systém chladienia.....	34
5.2.1 Základné vlastnosti systému ponorného chladienia.....	35
Nádrž.....	36
Príprava hardwaru.....	36
Tlak.....	36
Ďalšie vybavenie.....	36
Umiestnenie IT techniky.....	37
Dielektrická kvapalina.....	37

5.2.2	Systém ponorného chladenia od DCX liquid cooling .....	37
5.3	Proces získavania odpadného tepla .....	38
5.3.1	Jednofázové prevedenie .....	38
5.3.2	Dvojfázové prevedenie .....	39
	Výpočet celkového koeficientu prestupu tepla a výstupnej vody z kondenzátora	40
5.4	Potenciálne využitie odpadného tepla .....	43
6	Ekonomická bilancia návrhu .....	44
6.1	Náklady .....	44
6.2	Profitabilita ťažby a ROI .....	44
	Návratnosť počiatočnej investície .....	46
6.3	Alternatívne využitie mining rigu .....	47
	Cloud rendering .....	47
	Cloud gaming .....	48
	Distributed computing .....	48
	ZÁVER .....	49
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....	50
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK .....	53

## ÚVOD

Žijeme v dobe, kedy pokrok a vývoj v oblasti moderných technológií priam exponenciálne stúpa. Tieto technológie sú častokrát sprevádzané vysokými energetickými nárokmi a s tým súvisiaca cena. Nikdy v histórii sa nedával taký dôraz na životné prostredie ako v súčasnosti. Práve ekologický pohľad na svet môže mať nepriamy vplyv na zvýšenie efektivity energeticky náročných procesov za účelom znovu využitia energie a zníženie nákladov.

V roku 2009 Satoshi Nakamoto vytvoril fenomén zvaný kryptomena, ktorá je charakteristická decentralizovaným systémom a zabezpečením v podobe kryptografie. Za týmto pojmom sa skrýva energeticky náročný proces zvaný ťažba. Ťažba kryptomien tak vyžaduje vysoký výpočtový výkon, ktorý s postupom času dosiahol závažných čísiel spotreby elektrickej energie. V prípade dátových centier, superpočítačov a všeobecne vysoko výkonných informačných technológií sa táto forma energie prakticky celá premení na teplo, ktoré je nutno odvádzať v podobe, aby sa tak zabezpečilo spoľahlivého chodu. Výzvou zostáva zachytávanie a následné využitie odpadného tepla pre ďalšie aplikácie.

Cieľom práce je priblíženie problematiky v oblasti využitia odpadného tepla z výpočtových systémov pre ťažbu kryptomien. Z počiatku sme definovali základné pojmy ako je kryptomena, blockchain, decentralizácia alebo ťažba. Pričom ďalším krokom je zohľadnenie energetickej náročnosti procesu vytvárania digitálnej meny. Dôsledkom vysokých výkonov týchto systémov je zaobstaranie rovnako účinného chladenia, pričom práca zohľadňuje moderné technológie v tejto oblasti. Ďalej sa v práci zaoberáme metodikou výroby elektriny, chladu či priameho využitia odpadného tepla.

Následne na základe nadobudnutých informácií je zámerom navrhnúť optimálne riešenie celého systému zohľadňujúceho mining rig, chladenie a rekuperáciu odpadného tepla. V závere tejto práce sa chceme zamerať ako na ekonomickú bilanciu samotných kryptomien tak aj návrhu.

## 1 Chod výpočtového systému pre ťažbu kryptomien

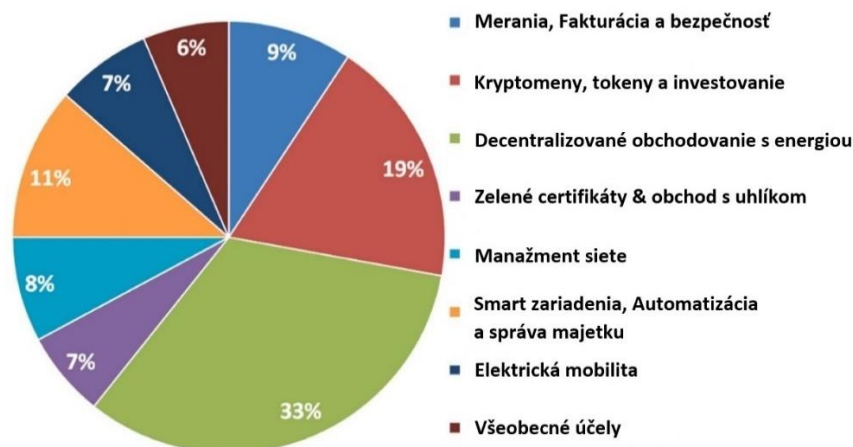
### 1.1 Decentralizácia, Kryptomena a Blockchain

Pravdepodobne najdôležitejším charakteristickým znakom sveta kryptomien je decentralizácia. Decentralizované systémy, na rozdiel od tých centrálnych (banky, poisťovne, vlády apod.), predstavujú absolútne dôverný systém, pretože treba dôverovať len samotnému systému a nie centrálnej strane. V tomto prípade centrálnu inštitúciu nahrádza kryptografia.

Práve názov kryptomena vznikol kombináciou slov kryptografia a mena. V podstate ide o menu, ktorá je zabezpečená kryptografiou a vďaka tomu je vzácna. Pojem kryptomena tak predstavuje digitálny majetok (mena, aktívum), ktorý je skonštruovaný tak, aby fungoval ako prostriedok výmeny. Kryptomenu tiež možno chápať ako aplikáciu využívajúcu technológiu blockchain, prostredníctvom ktorého sa uchováva transakčná história.[1], [2]

Blockchain, v prípade kryptomien, si možno predstaviť ako globálnu účtovnú knihu decentralizovaného systému. Znárodňuje tak kompletnú nemennú históriu všetkých transakcií decentralizovanej komunity, s ktorou súhlasí každý, kto je súčasťou tejto komunity. [1] Kryptomeny však vyjadrujú len zlomok potenciálu využitia technológie blockchain, ako znázorňuje obrázok 1, možností je hneď niekoľko.

Proces vytvárania Bitcoinu alebo kryptomeny všeobecne sa nazýva ťažba.



Obrázok 1 Využitie technológie blockchain [3]

Obrázok 1 znázorňuje klasifikáciu možností použitia blockchainu podľa oblasti ich činnosti. Výsledky sú odvodené zo štúdie o 140 iniciatívach v oblasti energetiky vykonávaných veľkým počtom spoločností, začínajúcich firiem a výskumných inštitúcií. [3]

### 1.2 Ťažba – Mining

Decentralizáciu kryptomien pomáha zabezpečiť ťažobný proces (ťažba, Mining), ktorý súčasne zavádza do systému nové mince. Počas ťažby sa platné transakcie formujú do blokov a následne sa pridávajú do globálnej účtovnej knihy tak, že sa spoja s predtým už prijatými blokmi (od toho názov blockchain).

Keďže blockchain predstavuje trvalú sekvenciu blokov, ktoré ukladajú všetky informácie o ukončených transakciách v systéme kryptomien, potom pri výbere účastníka, ktorý má právo pridať nový blok, a teda získať tak odmenu v podobe kryptomeny, rozhodujú špeciálne metódy. Medzi tie najpoužívanejšie radíme metódy: Proof-of-Work (POW), Proof-of-Stake a Proof-of-Importance. Tieto metódy predstavujú akési krypto hádanky, ktoré mineri zúčastňujúci sa ťažobného procesu musia vyriešiť. Najstaršia, no zároveň aj najpoužívanejšia

metóda je POW. V prípade tejto metódy musia účastníci, v tomto prípade mineri, odvieť časovo náročnú prácu a to z dôvodu overenia správnosti pridania nového bloku do blockchainu. Nevýhodou tejto metódy je, že výhodu majú najmä tí mineri, ktorí disponujú vyššími výpočtovými zdrojmi. Inak povedané, miner ktorý ako prvý vyrieši hádanku, pridá do blockchainu nový blok a nadobudne tak odmeny. Tieto odmeny sú pevne stanovené, v súčasnosti predstavuje odmena za vytážený blok 6,25 BTC. Odmeny sa však s časom menia, t.j. po určitom čase, konkrétne každých 210 000 blokov (približne každé 4 roky) nastáva tzv. halving. Halving predstavuje znižovanie odmien na polovicu. Zisk pri ťažbe tak tvorí odmena za ťažbu (odmena za blok) plus transakčné poplatky. Proces, pri ktorom dochádza k tak časovo náročnej práci, nazývame ťažba. [4], [5]

Vytážené kryptomeny sú udeľované ako odmeny za overovanie transakcií minerom, ktorí prispievajú svojou výpočtovou silou do siete blockchainu. Udelené kryptomeny sú rozdeľované medzi minerov vzhľadom na výpočtovú silu, ktorou sami prispeli. Avšak možnosť ako prispieť alebo sa zúčastniť ťažby je hneď niekoľko, ako popisuje tabuľka 1. Ťažba kryptomien sa tak nemusí týkať výslovne jednotlivca – je tu možnosť zapojiť sa do kolektívu minerov (mining pool) a zvýšiť tak svoje šance na odmenu. Výrobné náklady jedinej mince tak môžu byť kvantifikované ako náklady na jeho ťažbu. Náklady na ťažbu predstavujú dve kategórie – náklady na nákup mining rigu a prevádzkové náklady. [6]

*Tabuľka 1 Popis činnosti a aktérov zúčastňujúcich sa ťažby [7]*

Typ činnosti/aktérov	Popis
Mining	Jednotlivci alebo organizácie používajú svoje vlastné mining rigy na spracovanie transakcií a získavanie odmeny za ťažbu
Mining pool	Pre zvýšenie pravdepodobnosti a frekvencie nájdenia nového bloku mining pool kombinuje výpočtové zdroje od viacerých minerov a následne rozdeľuje ťažobné odmeny medzi zúčastnených na základe podielu poskytnutých výpočtových zdrojov.
Výroba hardwaru pre mining	Organizácie navrhujúce a budujúce špecializované ťažobné stroje
Cloud mining	Organizácie prenajímajúce svoje zariadenia, teda výpočtovú silu zákazníkom (potencionálnym minerom)
Služby vzdialeného hostenia	Organizácie hostujúce a udržiavajúce mining rigy vlastnené zákazníkmi

### 1.3 Mining rig

Pojem mining rig popisuje komplet hardwaru, ktorý sa primárne využíva pre ťažbu kryptomien. V samotných počiatkoch prebiehala ťažba na klasických domácich počítačoch prostredníctvom CPU. V súčasnosti ťažba cez CPU prakticky neexistuje. Onedlho na to sa však z dôvodu vyššieho výkonu prešlo na využitie grafických kariet (GPU). Používanie grafických kariet je oveľa efektívnejšie, pretože pri hashových výpočtoch sú tieto procesory oveľa účinnejšie než klasické CPU. Bežný GPU mining rig (obrázok 2) obsahuje tieto komponenty: základná doska (PCB), grafická karta (GPU), procesor (CPU), zdroj (PSU), operačná pamäť (RAM), externý disk (SSD), PCIe risers, rám alebo konštrukcia.

V súčasnosti sa väčšina kryptomien, teda aspoň tie, ktoré to umožňujú, ťaží prostredníctvom špecializovaného hardwaru. Tieto špecializované ťažobné stroje sa nazývajú

ASIC (Application-Specific Integrated Circuit chips) minere (obrázok 2 vpravo) a sú špecifické najmä svojím niekoľko násobne vyšším výkonom a využitím menej energie. ASIC minere boli vyvinuté špeciálne pre kryptomeny, konkrétne pre Bitcoin. V podstate ide o počítače, ktoré dokážu len jedinú vec – zdokonaľovať špecifický proces intenzívnejšie ako ktorýkoľvek iný hardware. V prípade kryptomien to znamená tzv. hashovať.



Obrázok 2 GPU mining rig (vľavo), ASIC antminer S9j (vpravo) [8], [9]

Porovnanie klasických (GPU) mining rigov a ASIC minerov je veľmi náročné. Každý hardware má svoje pro a proti. Nie je možné jednoznačne povedať, že ASIC minere sú lepšia voľba len preto, že sú oveľa výkonnejšie. Je tu mnoho ďalších faktorov, ktoré zohrávajú dôležitú úlohu pri výbere ťažobného stroja. Popis niektorých týchto vlastností, výhod či nevýhod každého hardwaru sú prezentované v tabuľke 2, kde odrážky +, -, ± predstavujú pozitívnu, negatívnu alebo neutrálnu vlastnosť.

Tabuľka 2 Vybrané vlastnosti GPU rigov a ASIC minerov

GPU mining rig	ASIC miner
+ Všeobecný výpočtový výkon	- Jednouúčelové zariadenie
- Nižší výpočtový výkon	+ Vysoký výpočtový výkon
- Vyššia spotreba energie vzhľadom k výkonu zariadenia	+ Nižšia spotreba energie vzhľadom k výkonu zariadenia
± Dlhá životnosť ROI	± Dobrá počiatočná ROI
+ Možnosť update grafických kariet	+ Netreba žiadneho ďalšieho vybavenia
- Klasický rig disponuje väčšími fyzickými rozmermi	+ Kompaktnejšie rozmery
+ Pri správnom nastavení dlhá životnosť	- Krátka životnosť
- Náročná optimalizácia	+ Jednoduché nastavenie
± Možnosť ťažby teoreticky ktorúkoľvek kryptomenu	± Zvyčajne venovaný len jednému algoritmu
- Efektivita ťažby	▪ Efektivita ťažby
+ Dobrá hodnota pri ďalšom predaji	- Veľmi zlá hodnota pri ďalšom predaji

## 2 Energetická náročnosť

Samotný mining je charakteristický vysokými hodnotami spotreby energie. V tomto prípade tak hovoríme o elektrickej energii, ktorá je potrebná pre chod mining rigu.

Ťažba Bitcoinu v súčasnosti presahuje možnosti bežných počítačov, substitúciou Bitcoinu je veľké množstvo stále sa vytvárajúcich, nových, tzv. altcoinov (altcoiny – všetky ostatné kryptomeny okrem Bitcoinu, napríklad Ethereum). Dôsledkom rastúceho trhu kryptomien tak dochádza k zvyšujúcej sa spotrebe elektrickej energie.

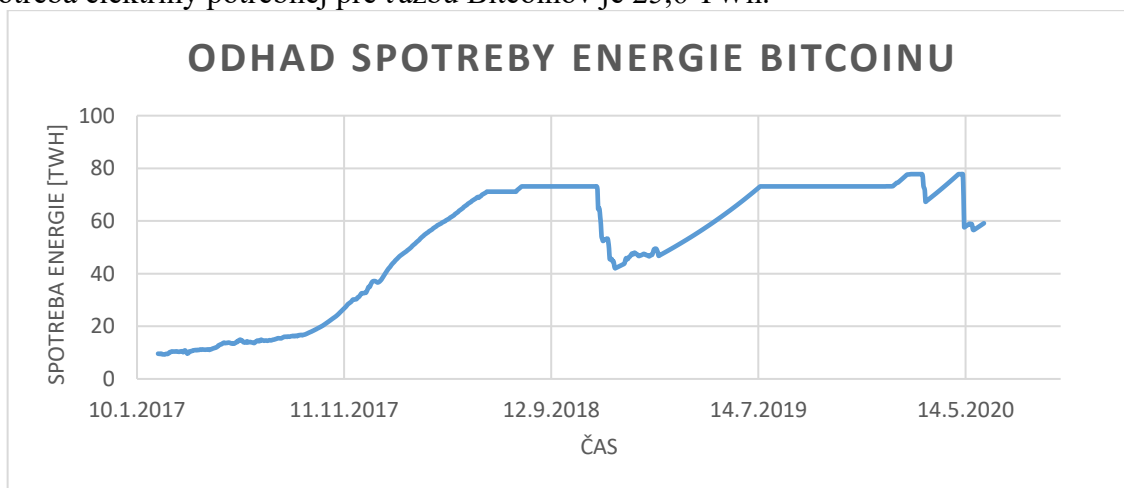
Spotrebu energie v sieti môžeme vyjadriť na základe počtu hashov za sekundu, t.j. hashrate siete. Každý mining rig, okrem vlastného hashratu, má danú spotrebu energie, ktorá dohromady vytvára ťažobnú efektivitu meranú v jouloch na hash. Ich kombináciou sa nám podarí získať množstvo joulov (kilowatthodín) vynaložené na vytvorenie jedného Bitcoinu. [6]

Bežne viditeľné údaje o spotrebe elektriny sú založené len na predpokladoch. Známe odhady spotreby elektrickej energie sú hlavne o Bitcoine. Po vytvorení prvého bloku v roku 2009 bola sieťová náročnosť ťažby (mining difficulty) Bitcoinov iba jedna, pričom náročnosť ťažby predstavuje akýsi ukazovateľ počtu aktívnych minerov. Proces ťažby v sieti Bitcoinu vyvoláva konkurenciu. Konkurencia naopak zvyšuje náročnosť ťažby, čo znovu vedie k vyššej spotrebe energie. Čoho dôsledkom bol vývoj ASIC minerov. Technológia ASIC minerov má však vedľajšie účinky. Kvôli vynikajúcej miere hashovania ASIC mineri znížili decentralizáciu Bitcoinov tým, že umožnili 51% útok. Pre stabilizáciu siete a udržanie decentralizovanej komunity musia ostatní účastníci tejto komunity zvýšiť mieru hashovania, čo nakoniec vyústi k vyššej spotrebe energie.

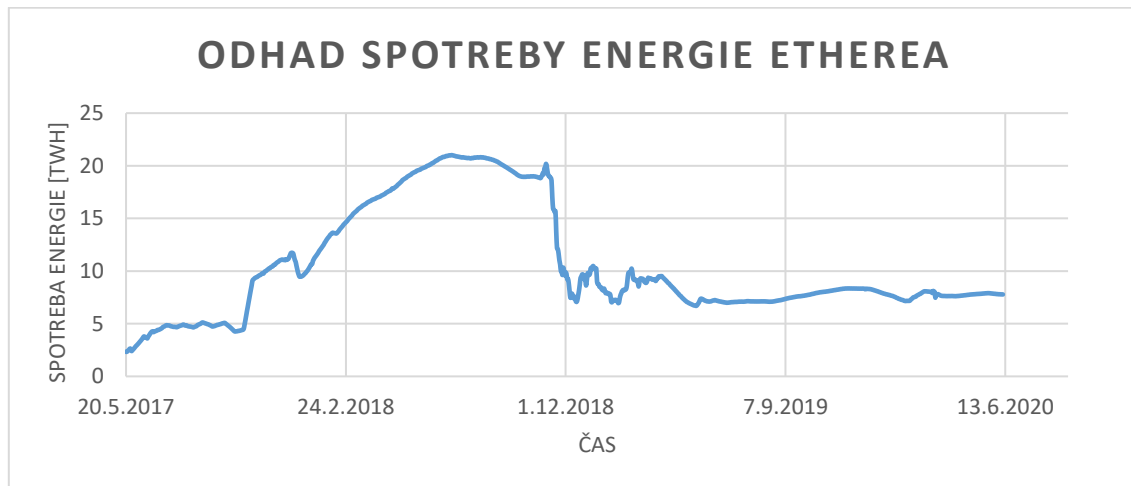
Napríklad v [10] použili časť výnosov z ťažby na odhad nákladov za elektrinu. Odhadovaná ročná spotreba elektrickej energie pri Bitcoine je 63,99 TWh v roku 2018. V prípade Etherea, ako druhej najväčšej kryptomeny, je predpoklad spotreby energie 18,09 TWh. [11] Na druhú stranu [12] bral v úvahu hodnotu spotreby s energetickou efektivitou minerov a v roku 2018 očakával ročnú spotrebu elektriny v rozmedzí od 14,19 TWh do 27,47 TWh. Predikcia [12] bola v porovnaní s [10] menej ako polovičná.

Keďže spotreba energie je založená len na predpokladoch, potom v závislosti od použitého zdroja sa výsledky môžu veľmi líšiť. Graf 3 a graf 4 tak ponúkajú predstavu ročnej spotreby elektrickej energie Bitcoinu a Etherea. Údaje použité pre vykreslenie grafov boli prevzaté z [10].

V súčasnosti neexistujú žiadne presné metódy na odhad spotreby energie ťažby kryptomien. Jediným špecifickým číslom je absolútna minimálna spotreba energie pomocou hashratu siete a energetickej účinnosti najúčinnnejšieho minera, pričom minimálna ročná spotreba elektriny potrebnej pre ťažbu Bitcoinov je 25,6 TWh.



Graf 1 Odhad ročnej spotreby energie Bitcoinu



Graf 2 Odhad roční spotřeby energie Etheria

## 2.1 Účinnost těžby

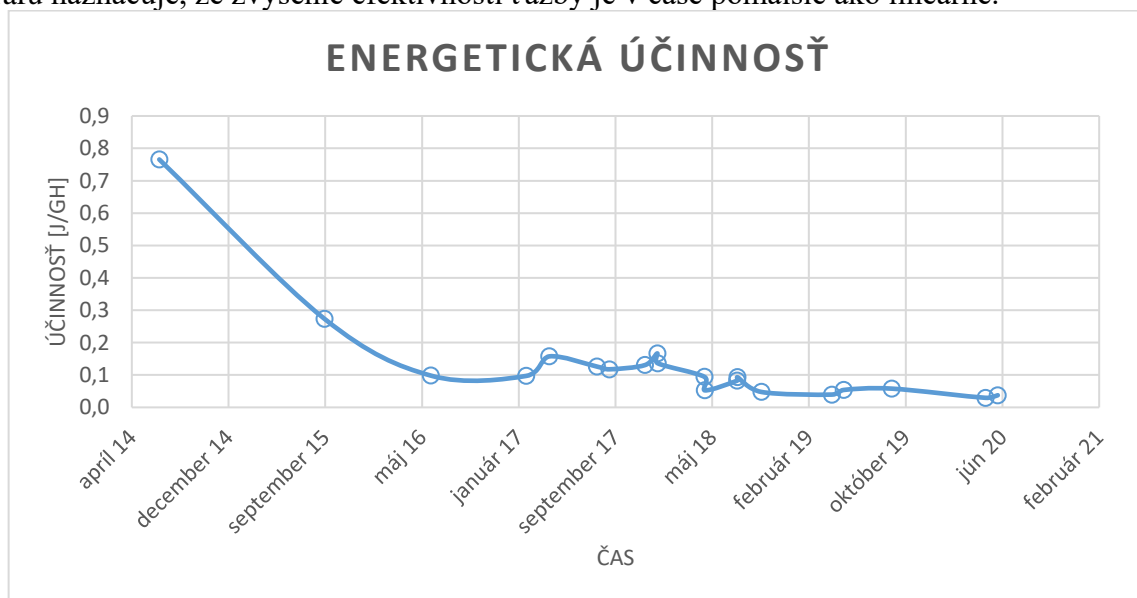
Informácie o účinnosti konkrétnych čipov používaných pre ťažbu kryptomien, predovšetkým ich dátum predstavenia a skutočné použitie, nie sú bežne dostupné. Nie sú dostupné pretože podaktoré firmy držia tieto informácie zámerne v tajnosti (aspoň na určitú dobu) pred ich uvedením na trh a pred dostupnosťou širokej verejnosti. Avšak spotreba energie vzhľadom na vykonané hashe je rozhodujúcim prvkom pre výpočet hraničných nákladov na ťažbu kryptomien. Nasledujúca tabuľka 3 prezentuje vybrané ASIC minere a ich špecifikácie. Použité dáta sú prevzaté z [13].

Tabuľka 3 Efektivita vybraných ASIC minerov

ASIC miner	Dátum uvedenia na trh	Výkon [W]	Hashrate [Th/s]	Efektivita [J/Gh]
Bitmain Antminer S3	júl 14	366	0,478	0,766
Bitmain Antminer S7	september 15	1293	4,73	0,273
Bitmain Antminer S9	jún 16	1127	11,5	0,098
Bitmain Antminer R4	február 17	845	8,7	0,097
Canaan AvalonMiner 741	apríl 17	1150	7,3	0,158
Bitmain Antminer T9	august 17	1576	12,5	0,126
Pantech SX6	september 17	1000	8,5	0,118
Bitfury B8	december 17	6400	49	0,131
MicroBT Whatsminer M3	január 18	2000	12	0,167
Bitmain Antminer T9+	január 18	1432	10,5	0,136
Bitmain Antminer S9i	máj 18	1320	14	0,094
ASICminer 8 Nano Pro	máj 18	4000	76	0,053
Innosilicon T2 Turbo	august 18	1980	24	0,083
Bitmain Antminer S9j	august 18	1350	14,5	0,093
ASICminer 8 Nano 44Th	október 18	2100	44	0,048
Bitmain Antminer S17 Pro	apríl 19	2094	53	0,040
Innosilicon T3+ 52T	máj 19	2800	52	0,054
Innosilicon T3+ 57T	september 19	3300	57	0,058
Bitmain Antminer S19 Pro	máj 20	3250	110	0,030
Bitmain Antminer T19	jún 20	3150	84	0,038

Účinnost v tabulce 3 je vyobrazovaná v jouloch na gigahash. Všeobecne platí, že čím nižšia hodnota je, tým je ťažobný stroj efektívnejší. [14]

Graf 3 zobrazuje pokrok vo vývoji novších ASIC minerov v zmysle efektívnejšieho využitia elektrickej energie. Kruhy predstavujú konkrétne ASIC minere z tabuľky 3. Priebeh grafu naznačuje, že zvýšenie efektívnosti ťažby je v čase pomalšie ako lineárne.



Graf 3 Energetická účinnosť vybraných ASIC minerov

Veľká spotreba energie je spôsobená najmä vysokou energetickou náročnosťou IT vybavenia a potrebou chladenia týchto zariadení, pričom zvyšný podiel predstavuje osvetlenie, pohyb vzduchu, distribúcia energie a ďalšie požiadavky. Chladiaci systém je nevyhnutný na udržanie bezpečného a spoľahlivého vybavenia IT a môže predstavovať až 40 % celkovej spotreby energie. Práve chladiace systémy, respektíve ich efektívnosť predstavuje veľkú príležitosť pre zníženie nákladov na energie. [14], [15]

### 3 Chladienie výpočtových systémov (Mining rigov)

Prakticky všetka elektrická energia potrebná pre chod mining rigu alebo všeobecne nejakého výpočtového systému je konvertovaná na teplo. Toto teplo je nutné odstrániť prostredníctvom vhodného chladiaceho systému. [16]

Vysoká hustota tepla môže spôsobiť vysoké teploty používaných komponentov mining rigu. V súčasnosti je zväčša hlavnou príčinou zlyhania komponentov vysoká teplota. Chladiaci systém musí byť schopný dosiahnuť úplnú kontrolu okolitého prostredia vrátane teploty vzduchu, vlhkosti a koncentrácie znečistenia.

Zabezpečenie optimálnej teploty pre chod mining rigu je jeden zo základných požiadaviek pri jeho návrhu. Chladienie je však energeticky vysoko náročné, napríklad v prípade dátových centier spotrebováva až 40 % z celkovej spotrebovanej energie. [14] Vzhľadom k energetickej náročnosti bolo vyvinutých mnoho štúdií, ktorých cieľom bolo zníženie spotreby energie na chladienie. Väčšina výpočtových systémov používa na proces odvodu tepla vzduchom chladené systémy. Priemysel dátových centier sa však chystá priblížiť a prekročiť kapacitu odvádzania tepla vzduchom. Preto by sa mali brať do úvahy nové chladiace riešenia a technológie, ako napríklad ponorené kvapalné chladienie, alebo technológia nazývaná free cooling (viď [kapitola 3.1.3](#)) prípadne kombinácie viacerých technológií.

K chladieniu výpočtových systémov sú najčastejšie využité tieto technológie:

#### 3.1 Chladienie vzduchom

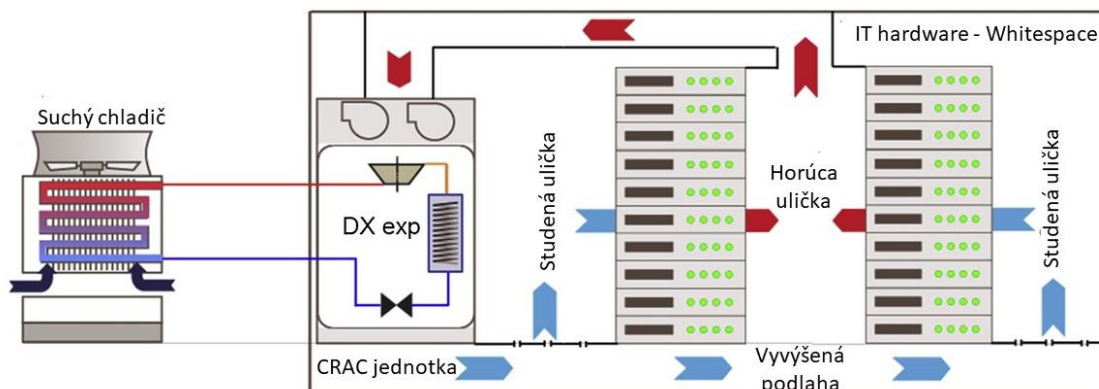
Chladiace systémy využívajúce vzduch spadajú do kategórie chladienia, ktoré je dnes najrozsiahlejšie, technicky možno jednoduchšie a v prípade vstupných nákladov najperspektívnejšie. Napríklad v prípade dátových centier, nedávny prieskum zistil, že takmer 90 % zariadení dátových centier využívalo vzduchom chladené systémy. [14], [16]–[18]

Pre zvýšenie efektivity vzduchom chladených systémov je v súčasnosti využívaná metóda známa ako technika izolácie horúcej/studenej uličky. Dôležitým prvkom vo vzduchom chladených systémoch je umiestnenie výpočtovej techniky. Stojany s výpočtovou technikou sú vo väčšine prípadoch usporiadané v radoch tak aby tvorili uličky. Technika v stojanoch musí byť taktiež orientovaná konkrétnym smerom. A to tak, aby teplo sálajúce z komponent výpočtovej techniky smerovalo do jednej uličky. Ako je znázornené na obrázku 6 a 7, vhodným umiestnením použitej techniky dochádza k vytváraniu tzv. studených a horúcich uličiek. Tento typ usporiadania umožňuje, aby sa horúci vzduch vychádzajúci zo zadnej strany stojanov vrátil do jednotky CRAC/CRAH, čím sa minimalizuje recirkulácia horúceho vzduchu zo zadnej časti stojana smerom k predným častiam stojanov. [14], [16]

V prípade tejto technológie sú využívané už spomenuté jednotky CRAC/CRAH (computer room air conditioner/computer room air handler unit).

##### 3.1.1 CRAC technológia

Systém chladienia využívajúci jednotku CRAC je vhodný najmä pre menšie výpočtové systémy (<100kW). V tomto prípade je teplý vzduch chladený prostredníctvom jednotky s priamou expanziou. Chladený vzduch produkovaný jednotkou CRAC je vháňaný do studených uličiek najčastejšie cez podlahovú komoru a perforované dlaždice alebo cez difuzéry v strope. Následne v okolí výpočtovej techniky sa vzduch zahreje a kvôli tlakovému rozdielu prúdi späť do jednotky CRAC (obrázok 6). [16]



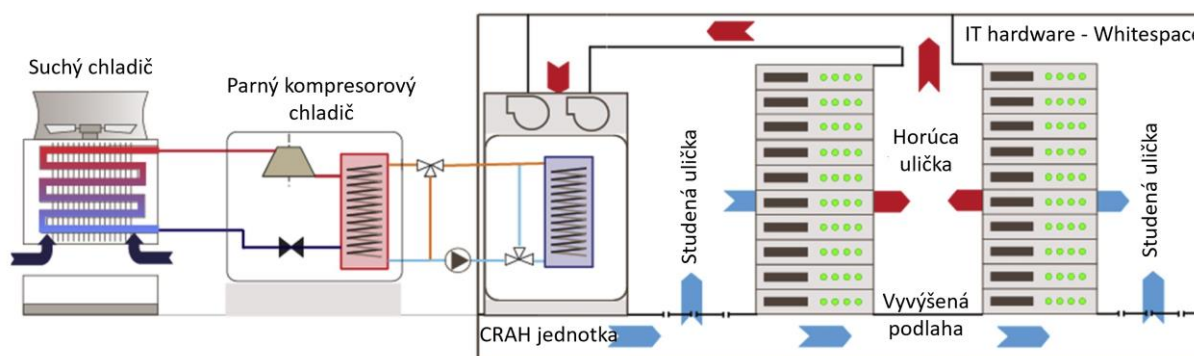
Obrázok 3 Schéma integrácie jednotky CRAC vo vzduchom chladenom systéme [16]

Teplota vháňaného studeného vzduchu sa pohybuje okolo 25 °C a vystupujúci teplý vzduch približne 40 °C. V súčasnej dobe technológia chladenia CRAC predstavuje riešenie s najnižšími investičnými a údržbovými nákladmi, no na druhú stranu s najvyššími prevádzkovými nákladmi.

### 3.1.2 CRAH technológia

Tento spôsob chladenia kombinuje chladenie vzduchom s vodným chladením. CRAH technológia je vhodná skôr pre stredné a veľké výpočtové systémy (> 100 kW).

Použitím tejto technológie je horúci vzduch prúdiac z IT vybavenia chladený vodou. Ako je znázornené na obrázku 7 ohriata voda smeruje z jednotky CRAH do parného kompresorového chladiča, kde sa opäť ochladí. Následne je chladený vzduch vháňaný do studených uličiek rovnako ako tomu bolo v prípade CRAC chladenia. V porovnaní s CRAC technológiou je CRAH výhodnejší vzhľadom na nižšie prevádzkové náklady. [19]



Obrázok 4 Schéma integrácie jednotky CRAH vo vzduchom/vodou chladenom systéme [16]

Účinnosť chladenia pomocou CRAC/CRAH technológie je relatívne ľahko ovplyvniteľná hneď niekoľkými faktormi, ako napríklad:

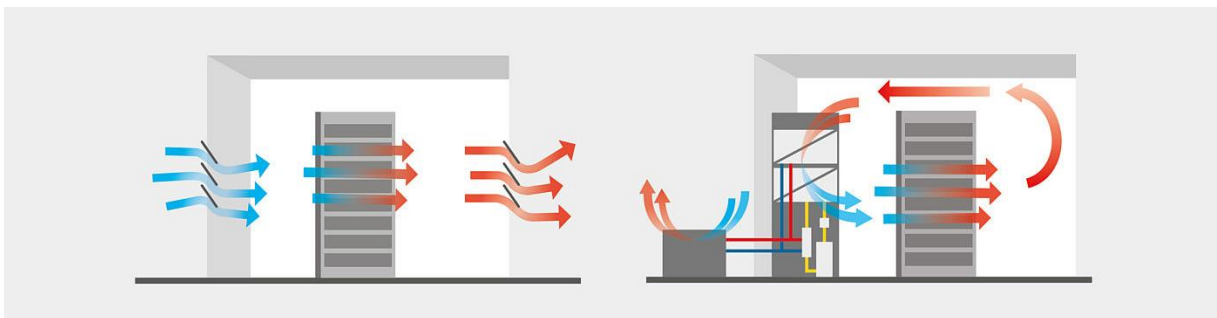
- výška stropu – priestor medzi horným povrchom stojana a stropom, kde sa môžu vyskytnúť tepelné pasce a môže dochádzať ku stratám horúceho vzduchu
- zvýšená výška podlahy/stropu – dôležité najmä pre správne rozdelenie, prúdenie vzduchu medzi stojanmi a servermi
- smer prúdenia vzduchu v miestnosti

Rozdiel medzi CRAC a CRAH jednotkou spočíva najmä v tom, že CRAC jednotka používa chladiivo v chladiacej cievke a potrebuje kompresor, zatiaľ čo CRAH jednotka používa

chlazenú vodu a obsahuje regulačný ventil. Pokiaľ ide o stranu chladiča (v prípade CRAC riešenia), je možné rozlišovať medzi vzduchom chladenou, glykolom chladenou a kvapalinou chladenou CRAC jednotkou, ktoré sa líšia kondenzačným zariadením a teplo odvádzajúcou tekutinou. Rovnako tak aj v prípade CRAH jednotky môžeme rozlišovať rôzne druhy chladičov, ktoré rovnako tak používajú vodu, vzduch alebo zmes glykolu na odvádzanie tepla.

### 3.1.3 Free cooling

Technológia free coolingu je známa predovšetkým v oblasti priemyselného chladenia. Princíp free coolingu spočíva vo využití chladného okolitého prostredia (vzduchu) namiesto kompresorového chladenia. Výhodou tak je eliminácia chladiacich systémov (CRAC/CRAH) a chladičov. Značným negatívom tejto technológie je lokácia. Vzhľadom k vysokým exteriérovým teplotám v letnom období alebo rýchlym zmenám počasia je tento systém využiteľný len vo vhodných lokalitách, priestoroch s vhodnými teplotnými a vlhkosťnými podmienkami. Free cooling nie je z hľadiska prevádzkových nákladov úplne bezplatné – systém vyžaduje prítomnosť ventilátorov potrebných pre usmernenie vzduchu, takisto môžu byť potrebné i systémy na reguláciu vlhkosti a výmenníky tepla. Nevýhodou sú aj priestorové nároky pre vedenie vzduchovodov, vyššie nároky na filtráciu vzduchu, vlhčenie a pohon ventilátorov. V prípade free coolingu rozlišujeme viacmennej dve varianty – priamu a nepriamu (obrázok 8).



Obrázok 8 Priama (vľavo), Nepriama varianta (vpravo) free coolingu[18]

Priamu variantu free coolingu si možno predstaviť ako uzavretú „miestnosť“ s prieduchmi po stranách. Následne studený vzduch prúdiaci zvonka ochladzuje výpočtovú techniku a ďalším otvorom je teplý vzduch odvádzaný prirodzene mimo miestnosť. V skutočnosti tieto otvory obsahujú určité filtre, ktoré chránia techniku pred nečistotami. Rovnako tak sú využité aj spomínané ventilátory.

V prípade nepriamej varianty je nutnosť použiť minimálne jedného výmenníka tepla (vzduch-vzduch). Vzduch v miestnosti cirkuluje a vedie cez tento výmenník. Rovnako tak cez druhú stranu tohto výmenníka prúdi vzduch zvonka. V tomto prípade je navyše použitý aj mechanický chladiaci systém pre prípad, že je vonkajší vzduch príliš teplý.

V praxi je technológia free coolingu častokrát kombinovaná s inými technológiami chladenia (CRAC, CRAH a podobne).

### 3.2 Chladienie kvapalinou

Práve kvôli vysokému dopytu po energeticky náročnejších výpočtových systémoch a dosiahnutí efektívnejšieho spôsobu chladienia je nutné aplikovať iné, výkonnejšie chladiace systémy. Jednou z možností je využitie vodného chladienia.

Komplexná porovnávacia štúdia medzi energetickou účinnosťou vzduchom a vodou chladených systémov, poukazuje na výhody chladienia vodou. Výskum ukazuje, že pri použití vodného chladienia sa môže výkon procesora zvýšiť až o 33 %. [16]

Zásadnou prednosťou vodou chladených systémov je ich účinnosť prenosu tepla. V dôsledku účinnejšieho prenosu tepla sa vo vodou chladených systémoch vyskytujú nízke teplotné rozdiely – približne 10 °C. Tieto nízke teplotné rozdiely predstavujú značnú výhodu v neskoršom využití odpadného tepla, ktoré je v porovnaní so vzduchom chladenými systémami vyššej kvality a okrem iného aj zachytávanie tepelnej energie je jednoduchšie. Ďalšou veľkou výhodou je, že chladivo s vyššou teplotou môže eliminovať potrebu chladičov, čo znovu znižuje spotrebu energie systému. Používanie systémov chladienia kvapalinou tak môže viesť k podstatným úsporám v celkovej potrebe energie na chladienie.

V súčasnosti jestvuje mnoho technológií, ktoré využívajú k chladieniu výpočtových systémov kvapalinu. Napríklad už spomenutá CRAH technológia. Ďalšie možnosti chladienia kvapalinou prezentujúce tri najpoužívanejšie technológie budú stručne rozobraté v nasledujúcich podkapitolách.

#### 3.2.1 In-Row cooling a Rear door cooling

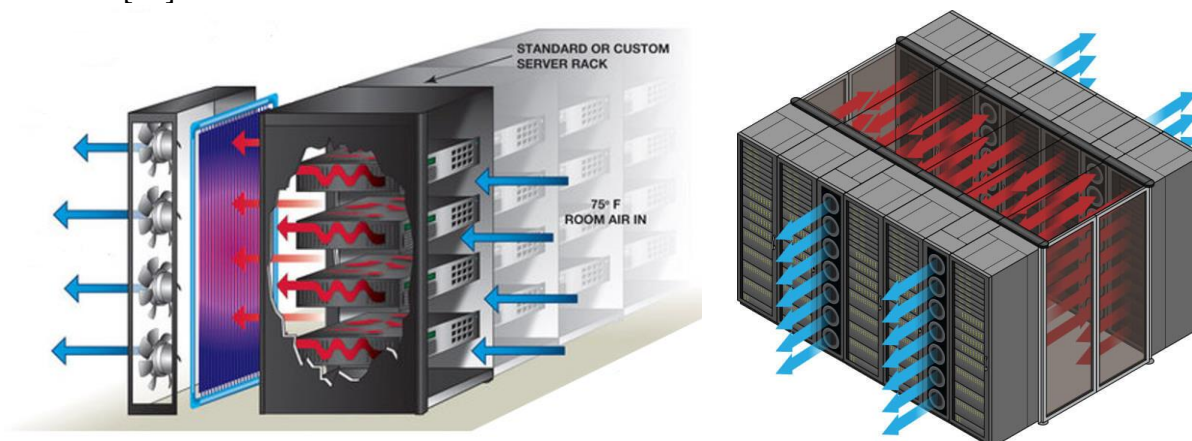
Ďalším príkladom kombinácie chladienia vzduchom a kvapaliny sú technológie zvané In-Row cooling (IRC) a Rear door cooling (RDC). Hovoríme tak o tzv. nepriamych metódach chladienia kvapalinou. Technické riešenie je v tomto prípade veľmi podobné chladieniu pomocou CRAC/CRAH jednotky. Rozdiel spočíva v umiestnení výmenníka tepla. Pri CRAH/CRAC je výmenník umiestňovaný mimo miestnosť s výpočtovou technikou, kdežto u IRC/RDC je výmenník umiestnený priamo k výpočtovej technike. Zhrnutie, stručný popis a potenciálne využitie odpadového tepla pre výpočtové systémy chladené vzduchom či vodou týchto štyroch možností je uvedené v tabuľke 4.

#### Rear door cooling

Princíp tejto technológie je založený na využití vodného výmenníka tepla (kvapalina-vzduch) s chladenou vodou, ktorý býva zväčša súčasťou zadnej časti špeciálneho stojana (Obrázok 5). Počas prevádzky ventilátory umiestnené u výmenníka nasávajú vzduch z miestnosti a ten sa pri prúde výpočtovou technikou ohrieva. Následne je vzduch nútený cirkulovať cez výmenník tepla, kde odovzdáva naakumulované teplo do kvapaliny. Ohriata voda sa potom ochladí pomocou štandardných chladičov. Výhodou tohto systému je možná inštalácia do už existujúcich stojanov s výpočtovou technikou, ktoré boli chladené vzduchom čím zvyšujeme efektivitu chladienia a teda aj samotnú výkonnosť techniky. Nevýhodou je nutnosť nízkej teploty tekutiny – bežne 15 až 20 °C. [16]

**In-Row cooling**

Táto technológia je, podobne ako rear door cooling, založená na implementácii výmenníka tepla (kvapalina-vzduch) bližšie ku stojanom (Obrázok 5). Najmä chladiace jednotky sú umiestnené medzi stojanmi s technikou na efektívnejšie zabezpečenie chladenia. Bežne sa používa pre modulárne a stredne veľké zariadenia. Radová chladiaca jednotka odvádza teplý odpadový vzduch priamo z horúcej uličky, ochladzuje ju cez výmenník tepla chladenej vody a distribuuje ju do studenej uličky. Týmto spôsobom sa zabraňuje miešaniu teplého a studeného vzduchu, čím sa zvyšuje účinnosť. Ohriata voda sa potom rovnako ochladí pomocou štandardných chladičov.[16]



Obrázok 5 Rear door cooling (vľavo) [20], In-Row cooling (vpravo) [21]

Tabuľka 4 Typológie chladiacich zariadení [14]

Technológia chladenia	Popis	Potenciálna teplota odpadového tepla
<b>Chladienie vzduchom – CRAC</b>	Vzduch je chladený priamo chladičom, ktoré je potom chladené vo vonkajšom kondenzátore	Ohriata voda o teplote 15-20°C Ohriaty vzduch o teplote 25-47°C
<b>Chladienie vzduchom – CRAH</b>	Vzduch sa chladí vodou, ktorá sa chladí mimo výpočtového systému pomocou chladiča	
<b>In-Row cooling</b>	Pomedzi výpočtovú techniku je implementovaný výmenník tepla	Ohriata voda o teplote 20-30°C
<b>Rear door cooling</b>	Súčasťou zadnej strany stojana je tepelný výmenník	

### 3.2.2 Priame chladenie kvapalinou

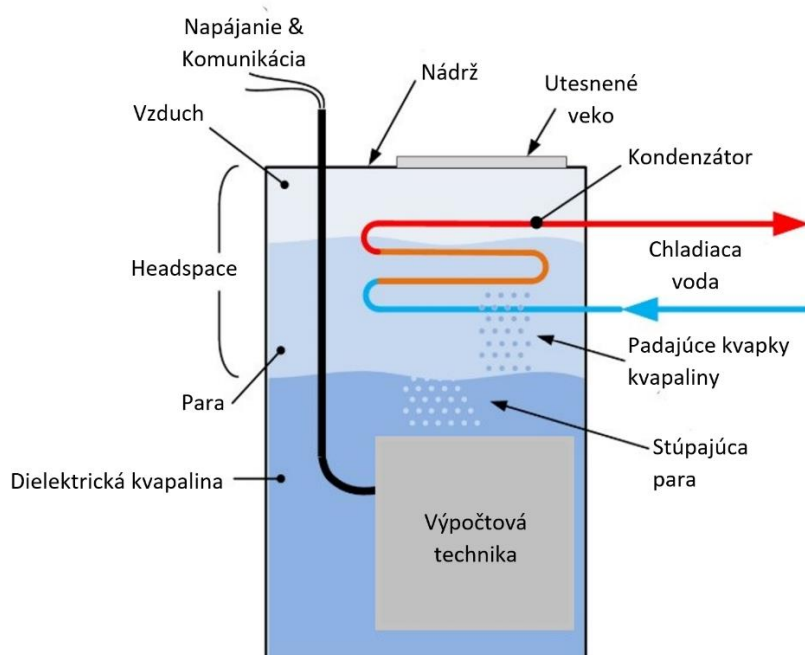
Na rozdiel od chladenia vzduchom, priame chladenie kvapalinou pracuje cielene. Teda chladiaca voda je privedená priamo na chladenú komponentu (CPU,GPU). Ostatné komponenty, ktoré negenerujú toľké množstvo tepla, sú chladené prúdom vzduchu. Tepelná výmena je väčšinou sprostredkúvaná prostredníctvom vodivej doštičky. Podstatnú výhodu predstavuje vysoká účinnosť a tepelná stabilita chladených komponent. Účinnosť odvodu tepla v prípade týchto systémov je 90 až 95 %. Keďže voda má približne 4 krát vyššiu tepelnú kapacitu než vzduch potom tieto systémy nevyžadujú vysoké výkony na prevádzku čerpadiel. Pozitívom je taktiež rozmerová kompaktnosť ba ešte aj nízka hlučnosť prevádzky.

### 3.2.3 Ponorné chladenie

Ako už názov naznačuje, táto technológia je založená na úplnom ponorení výpočtovej techniky do vane, nádoby s dielektrickou kvapalinou. Elektronické komponenty sú ochladzované prúdením tejto kvapaliny (jednofázové ponorné chladenie) alebo v prípade, kedy dochádza k varu kvapaliny, premena kvapalnej fáze na plyn, a následnou kondenzáciou pary na stenách kondenzátora implementovaného do nádrže (dvojfázové ponorné chladenie).

#### Dvojfázové ponorné chladenie

Keďže dielektrické kvapaliny sú omnoho lepšie vodiče tepla ako vzduch, voda alebo minerálny olej a vďaka svojim rôzne nízkym bodom varu (napríklad 49 °C), kvapalina vrie na povrchu komponentov produkujúc teplo. O prenos tepla sa následne starajú pasívne stúpajúce pary. Technológia dvojfázového ponorného chladenia je znázornená na obrázku 6.



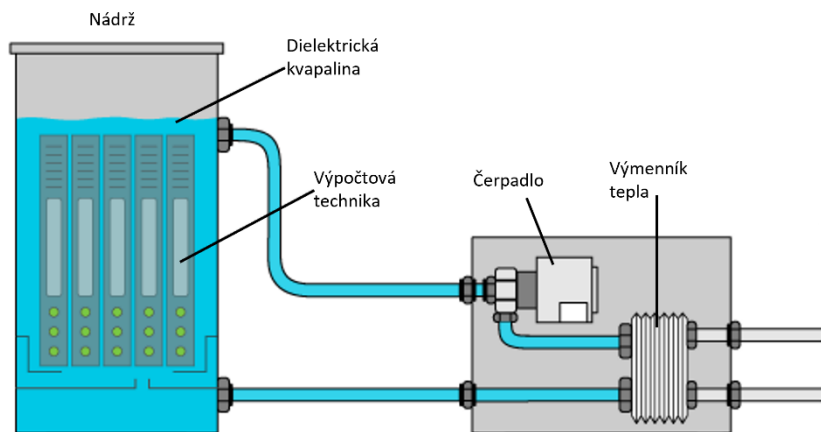
Obrázok 6 Dvojfázové ponorné chladenie

Plyn, ktorý je menej hustý ako kvapalina, ale hustejší ako vzduch, stúpa do priestoru nad kvapalinou, kde prichádza do styku s kondenzátorom integrovaným do vane, pomocou ktorého para kondenzuje späť na kvapalinu. Kondenzátor je chladený vodnou slučkou pripojenou k zdroju chladiacej vody. Chladiaca voda preteká kondenzačnou cievkou, ktorá odvádza teplo z pary. Kondenzát padá ako kvapôčky späť do kvapaliny. Keďže sa tepelný výkon mení s pracovným zaťažením je nutnosťou regulácia teploty. Inak by dochádzalo k

zmene úrovne pár. Regulácia teploty tak udržuje hladinu pár v požadovaných medziach moduláciou prietoku chladiacej vody. Systém je špecifický a vyniká predovšetkým možnosťou pracovať s chladiacou vodou o teplote až  $40^{\circ}\text{C}$ - $45^{\circ}\text{C}$  v porovnaní so  $7^{\circ}\text{C}$ - $20^{\circ}\text{C}$  v prípade iných chladiacich technológií. Tieto vyššie pracovné teploty je možné vo všeobecnosti vyrábať bez mechanického chladenia, čo ďalej znižuje prevádzkové náklady. [22]

### Jednofázové ponorné chladenie

Pri jednofázovom ponornom chladení sa dielektrická kvapalina nedostáva do varu a zostáva tak v kvapalnom skupenstve. Elektronické komponenty sú rovnako tak ponorené do kvapaliny v utesnenej, ale ľahko prístupnej nádrži, kde sa teplo z elektronických komponentov prenáša do kvapaliny. Chladiaci efekt dosiahneme cirkuláciou kvapaliny. Pre prúdenie zohriatej dielektrickej kvapaliny sú zväčša použité čerpadlá, ktoré kvapalinu ženu do výmenníka tepla, kde sa kvapalina ochladí a putuje späť do nádrže. (obrázok 7). Na druhú stranu ohriate chladivo môže slúžiť pre ďalšie využitie tepla alebo prechádza cez suchý chladič, chladiace veže a podobne.



Obrázok 7 Jednofázové ponorné chladenie [23]

## 4 Odpadné teplo

Zdroje odpadného tepla sú všeobecne považované za sekundárne zdroje, pretože získanú energiu dostávame ako vedľajší produkt z činnosti primárneho zdroja. Využitím tohto sekundárneho zdroja dochádza k efektívnejšiemu využitiu energie. Rozdelenie, príklady a možné využitie odpadného tepla znázorňuje tabuľka 5.

Tabuľka 5 Rozdelenie zdrojov tepla

Potenciál	Príklady zdrojov	Teplota [°C]	Typické využitie pre daný potenciál
<b>Vysoký (&gt;650°C)</b>	Šachtové pece na nikel	1370-1650	Predohrev spaľovacieho vzduchu
	Elektrická oblúčková pec	1370-1650	
	Kyslíkový LD konvertor	1200	Generácia elektriny
	Šachtové pece na meď	760-820	Transfer do stredných teplôt a následné využitie
	Kaliace pece	930-1040	
	Pec na meď	900-1090	
	Proces výroby vodíku	650-980	Predohrev vsádzok do pec
	Výpary zo spaľovne	650-1430	
	Sklárska pec	1300-1540	
	Koksová pec	650-1000	
<b>Stredný (260-650°C)</b>	Výfuk parného kotla	260-380	Predohrev spaľovacieho vzduchu
	Výfukové plyny turbín	370-540	Výroba elektriny
	Pec pre tepelnú úpravu	430-650	Predohrev ďalších pecí
	Vytvrdzovacie pece	260-590	Predohrev vody
	Cementárske pece	450-620	Nízko teplotné procesy
	Výfukové plyny motoru	320-590	ORC pre výrobu elektriny
<b>Nízky (&lt;260°C)</b>	Spaliny plynových bojlerov	70-260	Ohrev priestorov, vody
	Proces parného kondenzátu	50-90	
	CHV - žihacia pec	70-260	Zvýšenie teploty tepelnými čerpadlami a následné využitie
	CHV - vzduchové kompresory	30-50	
	CHV - motorov s vnútorným spaľovaním	70-120	
	CHV - chladiacich systémov	30-40	Organický Rankinov Cyklus (ORC)
	CHV - klimatizačných systémov		
	Sušiacie, Pečiace pece	90-240	
	Horúce procesné kvapaliny	30-230	
	Odpadná voda z ČOV	20-35	

Výhod zhodnocovania odpadového tepla je hneď niekoľko. Napríklad pri vykurovaní priestorov a ohrievaní vody zahŕňajú zníženie prevádzkových nákladov. Zhodnocovanie odpadového tepla môže taktiež predstavovať potenciálny príjem z predaja sekundárnej energie (tepla, elektriny) jednotlivému užívateľovi alebo okresnej sieti. Nasledujúca podkapitola stručne popisuje vybrané technológie zhodnocovania odpadného tepla.

## Technológie zhodnocovania odpadného tepla

Za účelom zachytenia a opätovného použitia nízkoteplotnej energie, ktorá vzniká ako sekundárny produkt pri ťažbe kryptomien, sa analyzuje niekoľko bežných techník rekuperácie odpadového tepla.

Odpadové teplo môže byť využité pre rôzne prípady. Základným rozdelením je využitie odpadového tepla pre výrobu elektriny, chladenia a najbežnejšie, najjednoduchšie vykurovania. To, či sú vhodné pre jednotlivé výpočtové systémy (mining rigy, dátové centrá apod.) závisí predovšetkým od týchto faktorov:

- Množstvo odpadného tepla
- Teplota na výstupe
- Chemické zloženie použitého média
- Obstarávacia cena danej technológie, prípadne návratnosť investície (ROI)
- Účinnosť, rozmery, hlučnosť, životnosť

### 4.1 Chladenie odpadným teplom

V súčasnosti sa stále zvyšuje dopyt po možných riešeniach chladení či už domácností alebo firiem. Spotrebiteľia často krát zvolia tú najjednoduchšiu variantu, ktorú predstavuje klimatizačná jednotka. Nie vždy však toto riešenie je z hľadiska ekonomickosti práve najlepšou voľbou. Táto podkapitola sa bude zaoberať myšlienkou využitia práve odpadné tepla ako potenciálny zdroj chladenia. Pre chladenie pomocou odpadného tepla sú v súčasnosti známe predovšetkým dve možné technológie, a síce Adsorpčné a Absorpčné chladenie.

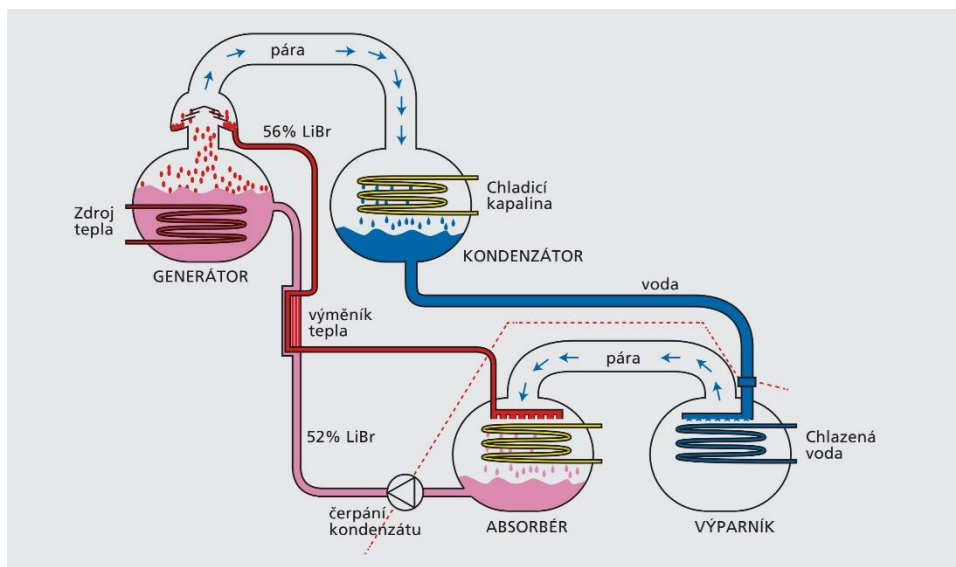
#### 4.1.1 Absorpčné chladenie

Ako už názov napovedá, táto technológia je založená na fyzikálnom deji zvanom absorpcia, pri ktorom sa plynná fáza rozpúšťa v kvapaline. Absorpčné systémy využívajú tepelnej energie k výrobe chladiaceho efektu, to znamená, že z nevyužiteľného (odpadového) tepla vyrobí chlad. Chladivo v takýchto systémoch prechádza hneď niekoľkými procesmi, hovoríme tak predovšetkým o odparovaní, absorpcii, čerpadlo, kondenzácii, škrtení a expanzii. Behom tohoto cyklu chladivo absorbuje teplo z nízkoteplotného zdroja tepla a uvoľní ju v kondenzátory pri vyššej teplote. Schéma a princíp takého systému znázorňuje obrázok 8.

Generátor, v ktorom je obsiahnutý roztok obsahujúci chladivo (napríklad vodu), je ohrievaný zdrojom tepla. Zdroj tepla môže predstavovať napríklad odpadové teplo z mining rigu a v prípade roztoku sa často krát používa bromid líthny (LiBr). Odpadové teplo v generátore predá svoju energiu a chladivo sa potom prirodzene z roztoku odparí. Zbytok roztoku prúdi do absorbéru. Pary chladiva putujú do kondenzátora, kde sú chladené chladiacou vodou. Pre regeneráciu ohriatej chladiacej vody sa vo väčšine prípadov používa chladný vzduch alebo voda. Skvapalnené chladivo je ďalej rozstrekované vo výparníku, kde odoberá chladené teplo vode a vyparí sa pri nižšom tlaku. Ochladená voda je nasledovne využívaná pre účely chladenia. Vzniknutá para chladiva prúdi do absorbéru, odovzdá teplo roztoku LiBr a skvapalní. Uvoľnené teplo je odvádzané. Kvapalné chladivo zriedi dodávaný roztok. Zriedený roztok nasýtený vodnou parou sa zahrieva na vyšší tlak a je následne prečerpaný späť do generátoru a celý cyklus sa opakuje. [18], [24]

Absorpčná chladiaca jednotka tak je vybavené hneď tromi okruhmi, medzi ktorými prebieha výmena tepla:

- Okruh horúcej vody (pary) – je napojený na zdroj tepla
- Okruh chladenej vody – napojený priamo na klimatizačnú jednotku
- Okruh chladiacej vody – odvádzajú teplo z absorpčnej jednotky do chladiacich veží



Obrázok 8 Schéma absorpčnej jednotky [24]

K prevádzke chladiacej jednotky je potrebný už spomínaný zdroj tepla, zaisťujúci teplotu teplotnosnej látky (ideálne vody) v intervale 70 °C až 120 °C v závislosti na konkrétnom výrobcovi. Minimálny zdroj tepla a teplota pre tieto systémy by mali dosahovať hodnôt 14,1 kW a 70 °C. Za týchto minimálnych podmienok dosahuje chladiaci výkon 8,8 kW [18].

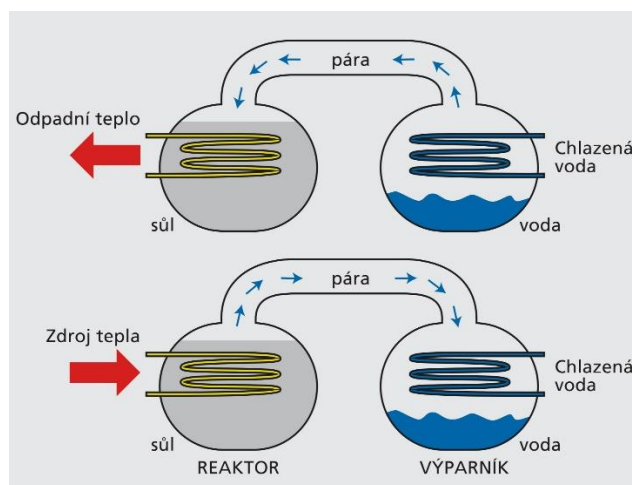
Zdroj tepla môže teoreticky zastupovať horúca voda odvádzaná z mining rigu. Pre spoľahlivú prevádzku týchto zariadení sa využíva akumuláčnych nádob. Akumulačné nádoby slúžia najmä v prípade, že voda prúdiaca z rigu nedosahuje požadovaných teplôt a je nutné tak zvýšiť jej teplotu.

Jednotka absorpčného chladenia disponuje predovšetkým týmito výhodami: prevádzka je prakticky bezhlučná, relatívne dlhá životnosť kvôli minimu pohyblivých súčiastok, nízke náklady na obsluhu a údržbu, jednoduchá regulácia a šetrnosť k životnému prostrediu. Na druhú stranu však negatívnym faktorom môže byť vyššia hmotnosť, väčšie rozmery a vyššie obstarávacie náklady.

#### 4.1.2 Adsorpčné chladenie

Ďalšou možnosťou ako využiť odpadné teplo k chladeniu je využitie procesu adsorpcie. Adsorpčná jednotka pracuje na podobnom princípe ako absorpčná jednotka, teplo sa spätne využije na tepelnú kompresiu chladiwa. Celý princíp tohto spôsobu chladenia je založený na schopnosti molekúl vody lepšie vytvárať väzby s určitou hygroskopickou soľou než s ostatnými molekulami vody. Proces výroby chladu zjednodušene opisuje obrázok 9. Zariadenie pozostáva z dvoch oddelených nádob – z reaktora obsahujúci hygroskopickú soľ a výparníka obsahujúci vodu. Voda sa začne vyparovať a pokiaľ je v sústave nízky tlak ba dokonca vákuum, voda začne vriieť, čím sa proces vyparovania vody urýchli. Vďaka nízkemu tlaku chladiwo vo výparníku prechádza do plynného skupenstva, a to od nástupu až do odparenia tepla z chladiaceho vodného cyklu, čím sa produkuje užitočný chladiaci efekt. Vodná para má snahu vyplniť priestor nad hladinou vody, aby sa tlak pár vyrovnal parciálnemu tlaku za daných podmienok. Molekuly pary sa následne viažu na soľ až do jej plného nasýtenia. Proces vyparovania spôsobí, že tepelná energia z vody je predávaná soli. Keďže je nutné túto tepelnú energiu odvádzat', výhodu tak môže predstavovať využitie tohto tepla napríklad pre vytápanie alebo ohrev. Adsorpčný proces pracuje cyklicky. Teda v prípade, že hygroskopická soľ je plne nasýtená, proces sa navonok zastaví a je nutné vodnú paru zo soli vypudit' čoho dosiahneme

prostřednictvím energie ve formě tepla. Do nádoby reaktora je tak priváděné odpadné teplo například aj z mining rigů a důsledkem opětovného ohřátí soli je vypudění vodných par ze soli. Vodná para se tak vrací zpět do výparníku a proces se cyklicky opakuje. [18], [24]



Obrázek 9 Schéma adsorpční jednotky [24]

Primárním negativem adsorpčního procesu je, že celý proces funguje cyklicky, tzn. že nie je zabezpečená plynulá prevádzka a tak aj efektívnosť využitia odpadového tepla. Nevýhodou adsorpčnej jednotky predstavuje taktiež dostupnosť, na trhu sú tieto systémy dostupné vo vyššom výkonovom rade 50 až 500kW a sú veľmi drahé. S vyšším výkonom súvisí veľký objem a hmotnosť v porovnaní s absorpčnou jednotkou. Na druhú stranu pozitívom je široká škála dostupných prevedení adsorpčnej jednotky. Rôzne prevedenia súvisia s rôznymi vstupnými teplotami. Všeobecne však platí, že zdroj tepla by mal poskytovať teplo dosahujúce 90 °C a viac, výnimkou tvoria systémy využívajúce zdroj tepla poskytujúci 75 °C.

## 4.2 Odpadné teplo ako potenciálny zdroj Elektrickej energie

U technológií, kde sa využíva odpadné teplo pre výrobu elektrickej energie, dochádza ku zníženiu potenciálnych nákladov na prevádzku, čím sa zvyšuje efektívnosť využitia energie. Práve aktuálna situácia vo svete spojená s globálnym otepľovaním zvyšuje dopyt po možnostiach využitia takýchto technológií.

Negatívom môže byť fakt, že väčšina spoločností, ktoré sa zaoberajú premenou odpadného tepla na elektrickú energiu, cieľia svoje záujmy na spracovanie odpadného tepla od príliš vysokých teplôt (od 100 °C) s tepelným výkonom od niekoľko stoviek kilowatthodín.

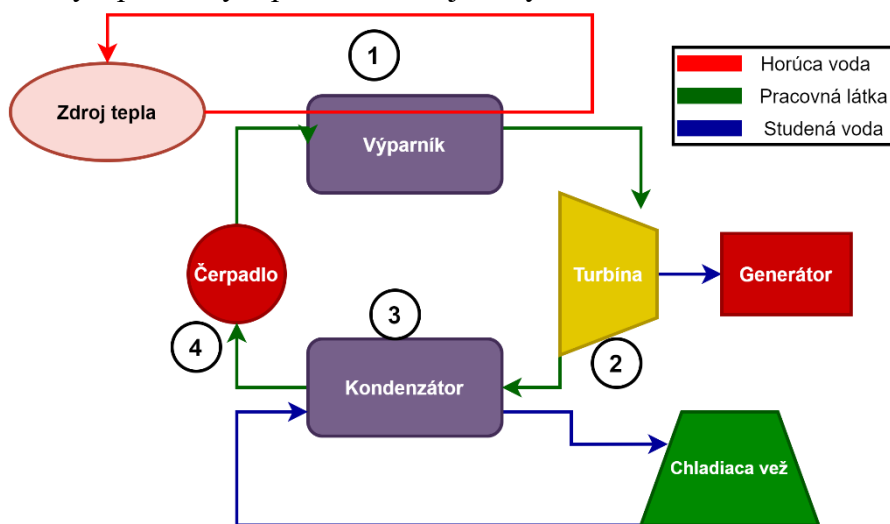
V nasledujúcej časti práce budú popísané jednotlivé technológie a možnosti ich využitia pre spätnú rekuperáciu odpadného tepla a následnou premenou na elektrickú energiu.

### 4.2.1 Organický Rankinov cyklus (ORC)

ORC predstavuje technológiu spracúvajúcu teplo na výrobu elektrickej energie v uzavretom parnom Rankinovom cykle. Princíp tohto cyklu je prakticky totožný s klasickým Rankin-Clausiovým parným cyklom využívaným v kondenzačných elektrárnach. Rozdiel spočíva v použití pracovnej látky, ktorou v tomto prípade nie je voda ale organická kvapalina s podstatne nižším bodom varu. Termodynamické vlastnosti pracovnej látky sú kľúčovým faktorom v prípade účinnosti ORC jednotky. Na pracovnej látke taktiež závisí teplota odpadného tepla. Bežné organické kvapaliny zahŕňajú R-134a, benzén, toluén a propán s prevádzkovými teplotnými rozsahmi 65 °C-350 °C. V prípade ORC je možné pracovať s teplotami nižšími než 60 °C, ale to by viedlo k značnému zníženiu účinnosti.

Elektrická účinnosť ORC sa bežne pohybuje v rozmedzí 15 % až 20 % na svorkách generátoru [25]. Táto, relatívne nízka, hodnota je hlavne kvôli skutočnosti, že nízko teplotné cykly sú vo svojej podstate menej efektívne než tie vysoko teplotné. Avšak, vzhľadom na teoretickú účinnosť Carnotovho cyklu v rovnakom teplotnom rozsahu je zrejmé, že skutočná účinnosť ORC predstavuje značné percento teoretickej účinnosti Carnotovho cyklu.[18]

Ako je znázornené na obrázku 10, systém ORC bežne pozostáva z výparníka, expandéra (turbíny), kondenzátora a čerpadla. V niektorých prípadoch sa však využíva aj prídavného ohrievača. Prídavný ohrievač môže, ale nemusí byť súčasťou konkrétneho ORC v závislosti od prevádzkovej teploty a pracovnej látky. V závislosti od sklonu krivky saturácie pár v diagrame teplotnej entropie (T-S) sa pracovné látky rozdeľujú do troch typov: mokré, suché a izoentropické. Mokré látky zvyčajne vyžadujú prítomnosť prídavného ohrievača, zatiaľ čo suché a izoentropické nie.[26] Bežným predstaviteľom expandéra je parná turbína, avšak nie je to pravidlom. Rôzne podoby expandéra by mohli byť vhodné pre rôzne ORC systémy. Na základe ich pracovných princípov existujú tri druhy expanzných zariadení: Turbíny (dynamický expandér), expandéry s pozitívnym posunutím a ejektory.[27], [28]



Obrázok 10 Blokové schéma ORC

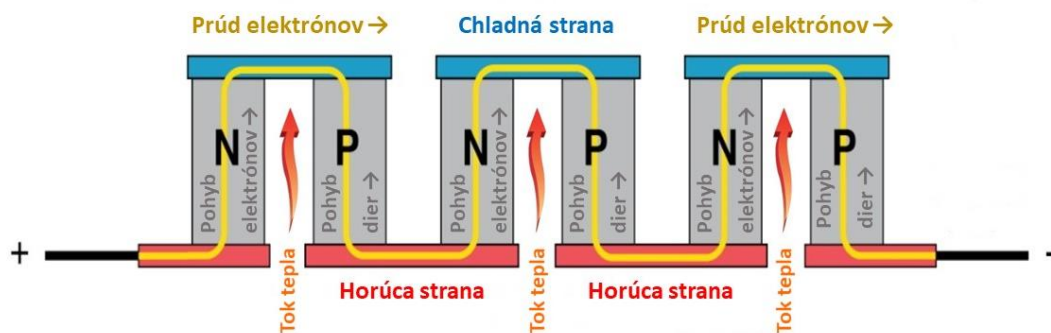
V prvej fáze ORC sa pracovná látka kvapalného skupenstva nachádza vo výparníku. Zdroj tepla následne poskytne tepelnú energiu, ktorá prúdi výparníkom čím dochádza k zohriatiu pracovného média a následne jeho vyparovaniu. Pary média potom prúdia do turbíny, kde dochádza ku zníženiu tlaku (pary expandujú). Znížením tlaku pár dochádza k roztočeniu turbíny a s ňou spojeným alternátorom, prostredníctvom ktorého sa generuje elektrina. Para dodatočne prúdi do kondenzátora, kde sa ochladí a skondenzuje. Prostredníctvom čerpadla je skvapalnená para späť čerpaná do výparníka a cyklus začína odznovu.

ORC jednotky vynikajú svojou schopnosťou pracovať viacmenej s akýmikoľvek vstupnými teplotami odpadného tepla v závislosti na použitej pracovnej látke a cielej účinnosti. Na druhú stranu tieto systémy vyžadujú tepelný výkon od 100 kW vyššie, čo môže viesť k značnému obmedzeniu využitia v rôznych oblastiach.

#### 4.2.2 Termoelektrický generátor (TEG)

Termoelektrické zariadenia pracujú na princípe tzv. Seebekova termoelektrického javu. Seebekov jav popisuje vznik napätia v obvode zloženom z dvoch rôznych materiálov, ktoré sa líšia svojou vodivosťou (napríklad polovodiče). Tieto materiály sú vystavené teplotnému rozdielu, čím sa vytvorí napätie. Naopak, keď sa použije napätie, dochádza k vytvoreniu teplotného rozdielu.

Základným konštrukčným prvkom termoelektrických zariadení sú tak termoelektrické dvojice tvorené polovodičovým p-n prechodom (obrázok 11). Použitím materiálov typu N a P v jednom zariadení na výrobu energie môžeme skutočne optimalizovať Seebekov jav. Pre dosiahnutie väčšieho napätia sú termoelektrické dvojice usporiadané tepelne paralelne ale elektricky v sériovom okruhu a tvoria tak tzv. termoelektrické moduly. Pretože elektrický prúd tečie v opačnom smere ako v smere toku dier, potenciál generovania prúdu v dvojiciach nie je proti sebe, ale napomáha sériovému spracovaniu. Funkciu termoelektrických dvojíc možno popísať nasledovne: Pokiaľ je na p-n prechod dodávané teplo, v polovodičoch dochádza k prerozdeleniu majoritných nosičov náboja. V polovodičoch typu N dochádza k pohybu elektrónov a v polovodičoch typu P k pohybu dier. Tieto náboje sa potom koncentrujú u chladnejších koncov polovodičov, kde vzniká rozdiel potenciálov. V prípade uzatvorenia práve vytvoreného obvodu nastáva pohyb elektrónov cez prechod a dochádza k prietoku elektrického prúdu. [18], [29]



Obrázok 11 Schéma troch termoelektrických dvojíc

Moduly nemôžu pracovať samostatne, prívod a odvod tepla tak zaisťujú výmenníky. Priechodom tepla naprieč termoelektrickým modulom je generované napätie a po pripojení na záťaž elektrický výkon. Štandardné termoelektrické moduly pracujú s teplotným rozdielom približne 70 °C s teplotou horúcej strany 80-180 °C.

Výkonnosť termoelektrických materiálov možno vyjadriť na základe rovnice 1.

$$z = \frac{\alpha_s^2}{k \cdot R} \quad (1)$$

Z - Účinnosť

$\alpha_s$  - Seebeckov koeficient

c - Tepelná vodivosť

R - Elektrický odpor

Charakteristická účinnosť pre TEG sa pohybuje v rozmedzí 2 % až 5 %. Kvôli relatívne nízkej účinnosti termoelektrickej premeny prechádza väčšia časť tepla naprieč modulom bez úžitku. Z toho dôvodu sa TEG často používa v tzv. parazitnej konfigurácii, t.j. ako tepelný výmenník/generátor elektriny. Časť absorbovaného tepla sa premení na elektrickú energiu a zbytok tepla je použitá na predohrev. Týmto môžeme produkovať teplo aj elektrinu súčasne, s nepodstatným vplyvom výslednú účinnosť systému. Výkony bežných TEG sa pohybujú v rozmedzí miliwattov až desiatok kilowattov.

### 4.2.3 Piezoelektrický efekt

Ďalším možným spôsobom ako premeniť odpadné teplo na elektrinu je prostredníctvom tzv. piezoelektrického efektu. Táto metóda je určená pre priamu premenu turbulentných kmitov vo vzduchu chladených systémoch na elektrinu. Práve materiál je rozhodujúcim prvkom v prípade tejto technológie, tento materiál musí vykazovať piezoelektrický jav. Hovoríme tak o kryštalických dielektrikách (napríklad kremeň). Princíp tejto technológie je relatívne jednoduchý, ak je piezoelektrický materiál vystavený pnutiu, mechanickému namáhaniu, potom spolu s deformáciou kryštálovej mriežky sa posúvajú aj elektrické náboje v jej štruktúre. Pokiaľ nemá kryštálová mriežka stred symetrie, vzniká nesymetrické usporiadanie, dôjde tak k zmene jeho vnútorného elektrického poľa a dochádza k vzniku elektrického náboja.

Vstupná mechanická energia pre typické piezoelektrické zariadenia je vo forme vibrácií okolia. V prípade aplikácií vo výpočtových systémoch by sa tieto malé zariadenia mohli nachádzať v oblastiach, kde prívod vzduchu CRAC vytvára turbulentné víry, ktoré umožňujú priamu premenu kinetickej energie na elektrickú. [18]

Avšak výroba elektrickej energie za využitia piezoelektrického javu skrýva skôr viac negatív ako výhod. K hlavným technickým výzvam spojeným s piezoelektrikami však patrí veľmi nízka účinnosť, v súčasnosti 1% v porovnaní s Carnotovou účinnosťou. Okrem iného treba počítať aj s ťažkosťami so získaním vysokej frekvencie kmitov. Ďalšie negatívum predstavuje získaná energia, ktorá sa pohybuje v rádoch miliwattov. Taktiež cena takejto technológie je prívysoká (až 10 000/W)[18]. Na druhú stranu výhodou sú určite menšie rozmery v porovnaní s predchádzajúcimi technológiami a nezávislosť na teplote odpadného tepla, čo skutočne rozširuje potenciálne oblasti využitia.

### 4.3 Priame využitie odpadného tepla

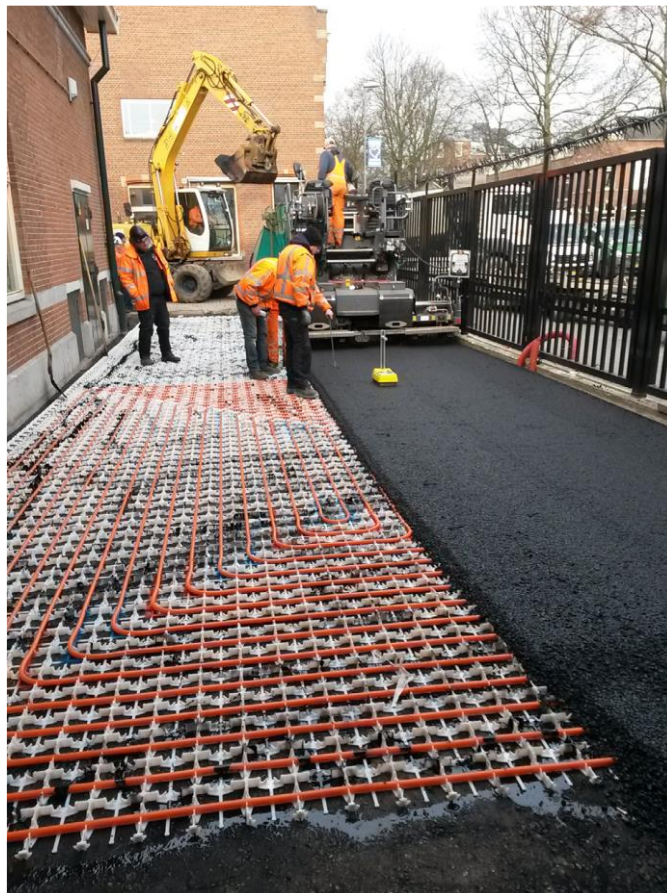
Priame využitie odpadného tepla je najpoužívanejší a ako technicky tak aj ekonomicky najjednoduchší spôsob riešenia. Do tejto kategórie spadá hneď niekoľko rôznych spôsobov rekuperácie odpadného tepla. Avšak priame využitie odpadného tepla možno principiálne rozdeliť na: ohrev vody, vykurovanie a prípadne i diaľkové vykurovanie.

Základné aplikácie priameho využitia odpadného tepla sú nasledovné:

- Ohrev teplej úžitkovej vody
- Vykurovanie miestností, bytov, domov, kancelárií a pod.
- Predaj do sústav pre diaľkové vykurovanie
- Podlahové kúrenie/Vytápanie chodníkov, ciest
- Zdroj tepla pre HVAC a podobné systémy
- Ohrev bazénov

Opätovné použitie odpadového tepla na vykurovanie miestností a vody vyžaduje minimálne vstupné teploty, ktoré sa líšia v závislosti od použitia a sú v rozsahu od 35 °C, keď sa priamo používa horúci vzduch na vykurovanie domácnosti, až po 60–70 °C využitých na ohrev vody. Systémy s teplotou 70 °C alebo vyššou sú využiteľné aj v prípade diaľkového vykurovania. Nízka kvalita odpadového tepla vylučuje možnosť úplnej náhrady kotla, ale odpadové teplo sa môže použiť na predhrievanie napájacej vody z kotla a prispieť k celkovému zníženiu spotreby fosílnych palív a emisií znečisťujúcich látok. Táto technika regenerácie odpadového tepla bude najvýhodnejšia v prípade využitia vodou chladených systémov. Výhodou je tak určite široká škála využitia a to aj napriek rôznym výstupným teplotám.

Konkrétny príklad priameho využitia odpadného tepla predstavuje obrázok 12, kde cieľom tohto je získať teplo z asfaltového betónu, ktorého teplota v lete môže dosiahnuť 60 - 65 °C. Výmena tepla a chladu v asfaltovom betóne je technicky možná.

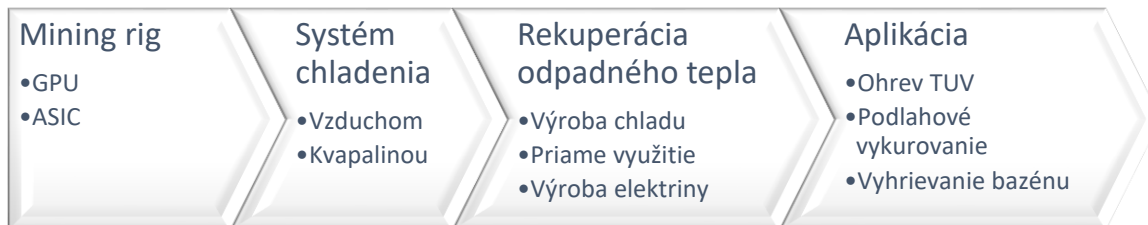


*Obrázok 12 Priame využitie odpadného tepla [30]*

Rúrky podobné podlahovému kúreniu sú integrované v asfaltovej vrstve. V lete sa cez trubice čerpá studená voda. V dôsledku vysokej teploty asfaltu (60 - 65 °C) sa studená voda zohrieva. Naopak v zimných mesiacoch je cez rúrky čerpaná teplá voda. Teplo vody sa vymieňa s asfaltom, takže teploty asfaltu zostávajú nad 0 °C a na chodníku nebude žiadny sneh ani ľad. Toto inteligentné riešenie je možné preniesť do tých častí mesta, kde v lete asfaltové vozovky dosahujú veľmi vysokých teplôt alebo kde asfalt nesmie zamrznúť, napríklad parkovacie miesta, chodníky pre chodcov, pešie zóny a podobne. [30]

## 5 Návrh

Obsahom tejto kapitoly a jej podkapitol bude konceptuálny návrh využitia odpadného tepla z výpočtového systému na ťažbu kryptomien. Pričom budeme brať v úvahu ťažbu v bežnej domácnosti. Vychádzať budeme najmä z predchádzajúcich častí tejto práce. Práve obrázok 13 vykresľuje postup, primárne štádia vytvárania návrhu.



Obrázok 13 Primárne štádia návrhu systému

Ako obrázok 13 naznačuje v prvom rade bude treba zvoliť vhodný hardware pre ťažbu kryptomien (ASIC/GPU). Ďalším krokom je voľba vhodného systému chladenia pri ktorom je nutno brať v úvahu neskorší spôsob rekuperácie a následne aj aplikácie tohto odpadného tepla.

### 5.1 Voľba mining rigu

Prvým krokom, ako je spomenuté už vyššie, je voľba výpočtového systému. V našom prípade sa tak treba rozhodnúť medzi ťažbou kryptomien prostredníctvom grafických kariet alebo za použitia ASIC minerov. Ktorý typ mining rigu zvoliť závisí od mnohých faktorov, predovšetkým hovoríme o týchto skutočnostiach:

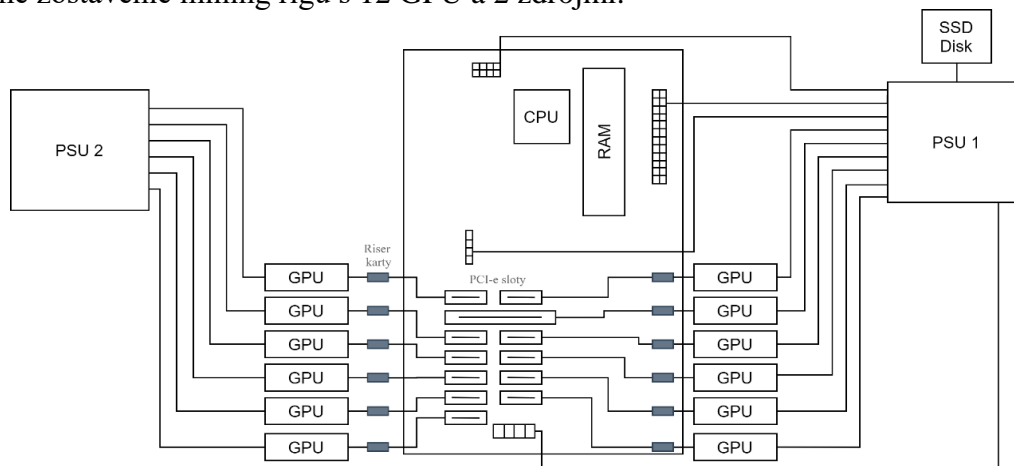
- Súkromná ťažba/ťažba vo veľkom (farma)
- Druh kryptomeny, ktorý chceme ťažiť (Bitcoin, Ethereum, Monero a pod.)
- Vstupný kapitál, výpočtová sila (hash za sekundu), cena elektriny
- Priestory
- Ďalšie faktory pri výbere hardwaru môže prezentovať [Tabuľka 2](#)

Pre ťažbu jednotlivca, teda ťažbu v domácnosti by som skôr uprednostnil ťažbu prostredníctvom grafických kariet a to hlavne z dôvodu všeobecného výpočtového výkonu ([vid' kap. 6.3](#)). Stavba klasického GPU rigu síce nie je až tak zložitá, no nastavenie a optimalizácia pre najlepší výkon je vec druhá. Tabuľka 6 predstavuje súpis potrebných komponentov pre zostavenie vlastného mining rigu.

Tabuľka 6 Súpis potrebných komponent pre zostavenie mining rigu

Druh komponenty	Popis	Počet kusov	Cena za kus
Grafická karta	AMD RX5700	12	385,48 €
Zdroj	EVGA SuperNOVA 1000 G3 - 1000W	2	204,99 €
Základná doska	TB250-BTC Pro	1	39,87 €
Procesor (CPU)	Celeron G3930 Processor	1	52,30 €
Operačná pamäť	Kingston 8GB DDR4 2666	1	39,90 €
SSD disk	Kingstone NOW A400-120GB	1	29,90 €
Kabeláž	Redukcia PCIe 1x to 16x	8	5,60 €
<b>Celková cena</b>			<b>5242,51 €</b>

Ceny jednotlivých komponentov sú prebrané od oficiálnych výrobcov ako je Intel, AMD a podobne. Dvanásť grafických kariet AMD RX5700 by spolu mohli dosahovať výpočtovú silu až 612 Mh/s a to pri spotrebe elektrickej energie 1680 W. Prakticky všetka elektrická energia potrebná pre chod výpočtového systému sa premení na teplo. Práve toto odpadné teplo je treba odvádzať. Výkon 1680 W odpovedá približne 1,68 kWh, čo je hodnota tepelnej energie vygenerovanej výpočtovým systémom pre ťažbu kryptomien za 1 hodinu. V prípade 24 hodinovej prevádzky sa následne dostávame na hodnotu 40,32 kWh. V našom prípade toto teplo budeme miesto odvádzania do vzduchu ďalej využívať napríklad pre ohrev TUV. Nasledujúci obrázok 15 popisuje blokové schéma zapojenia jednotlivých komponentov a teda principiálne zostavenie mining rigu s 12 GPU a 2 zdrojmi.



Obrázok 14 Blokové schéma zapojenia mining rigu

Ďalšou veľkou prednosťou klasických GPU mining rigov je možnosť ťažby ktorejkoľvek kryptomeny. V našom prípade, to je ťažba v domácnosti, by som sa skôr zamerlal na altcoiny. Preto by som cielil nastavenie a optimalizáciu na ťažbu kryptomien využívajúc ethash algoritmus, prostredníctvom ktorého možno ťažiť ETH, ETC a iné. Ťažobný software by som volil Claymore Dual, ktorý umožňuje, mimo iné i pokročilejšie nastavenia a taktiež je využívaný v kombinácii práve s grafickými kartami od AMD. Claymore Dual taktiež umožňuje rovnomerne rozdeliť hashrate každej grafickej karty a ťažiť tak dve rôzne kryptomeny súčasne.

## 5.2 Systém chladenia

Na základe kapitoly 4 ([Chladenie výpočtových systémov](#)) by som volil chladenie prostredníctvom kvapaliny. Chladenie kvapalinou je z hľadiska účinnosti ďaleko efektívnejšie v porovnaní s technológiami využívajúcimi chladenie vzduchom. Primárnym dôvodom prečo voliť chladenie kvapalinou je prenos tepla a odvod tepelnej energie, ktorý je v našom prípade kľúčový a v prípade chladenia vzduchom je odvod tepla oveľa náročnejší kvôli vznikajúcim stratám tepla. Navrhoval by som využiť ponorné jednofázové alebo dvojfázové chladenie, ktorých princíp je vysvetlený v predošlej časti tejto práce (viď [kapitola 4.2.3](#)). Nasledujúca tabuľka 7 dopĺňa zmienu kapitoly o ďalšie výhody, dôvody voľby práve ponorného chladenia. Na druhú stranu však brať v úvahu i negatíva týchto technológií, ako je napríklad:

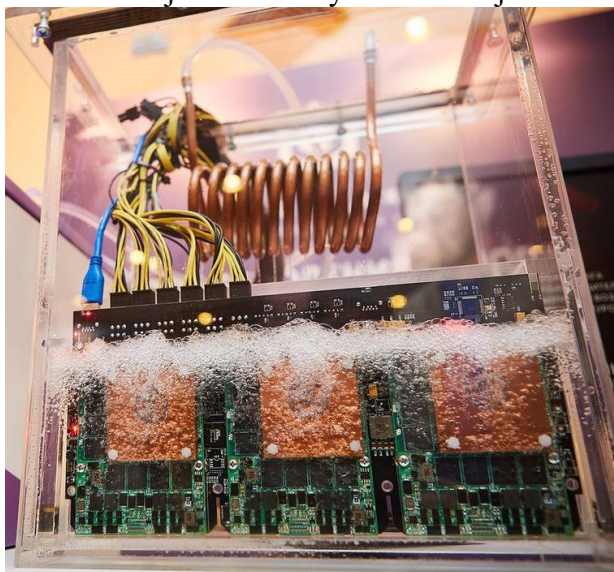
- Vysoké počiatkové náklady – vysoká cena dielektrických kvapalín
- Dostupnosť komerčných produktov – len málo firiem sa zaoberá touto problematikou
- Udržanie atmosférického tlaku v uzatvorenej nádrži v prípade 2-fázového chladenia
- Nežiaduce straty kvapaliny – únik pary mimo nádrž
- Návrh takéhoto systému vyžaduje vyššie odborné znalosti v oblasti termomechaniky, hydromechaniky a v oblasti elektrotechniky

Tabuľka 7 Vlastnosti a pozitíva ponorného chladenia

Charakteristika	Popis
Vysoko účinné chladenie	Dvojfázové ponorné chladenie ochladzuje veľmi husté tepelné zaťaženie a šetrí prevádzkové náklady (náklady na elektrinu), dosahuje až 72% úsporu na energiu. [22]
Zvýšenie výpočtovej sily (hashrate)	Stále chladenie umožňuje GPU pracovať pri najvyšších výkonoch. Naskytá sa tak možnosť GPU pretaktovať a dosiahnuť tak vyšší hashrate (+5% až +20% v závislosti od konkrétnej GPU)
Minimálna hlučnosť	Klasický ventilátor (1ks) používaný pre chladenie GPU dosahujú hlučnosť priemerne 30 dB. V prípade rigu s 12 GPU je požadované minimálne 24 ventilátorov. Z hľadiska ponorného chladenia je hlučnosť prezentovaná len vyvierajúcou kvapalinou.
Kompaktné rozmery	Popri bežnom chladení vzduchom sa doporučuje rozstup medzi GPU 5 až 7 cm. V nádobe pre ponorné chladenie stavíme GPU tak blízko ako sa len dá.
Nižšie náklady na údržbu a prípadné opravy	Keďže je výpočtová technika umiestnená v uzavretej, odizolovanej nádobe, nemusíme tak brať v úvahu vplyv okolitého prostredia (teplota, vlhkosť, prach, nečistoty a iné). Kvalitné chladenie taktiež predchádza prípadným poruchám ventilátorov, prehriatiu grafických kariet a pod.
Bezpečnosť a ekológia	Všetko je chránené pred ohňom. Emisie skleníkových plynov vykazujú zlepšenie o 19 % v porovnaní s bežne zaužívanými metódami chladenia v dátových centrách [22] .

### 5.2.1 Základné vlastnosti systému ponorného chladenia

Možností ako zostaviť nádobu, box pre ponorné chladenie je samozrejme hneď niekoľko. V tejto podkapitole budú zjednodušene vysvetlené základné požiadavky pre správny chod systému chladenia, pričom podklady pre túto časť práce boli prevzaté zo súkromnej emailovej komunikácie s DCX liquid cooling a zdroja [31], [32]. Príklad reálneho zhotovenia dvojfázového ponorného chladenia je znázornený na nasledujúcom obrázku 15.



Obrázok 15 Dvojfázové ponorné chladenie [33]

## Nádrž

Prvým, azda najdôležitejším prvkom je otázka použitých materiálov. Až na určité výnimky by nádrže nemali byť vyrobené z plastov pretože obsahujú a prenášajú vlhkosť, ktorá je v systéme nežiaduca. Nádrže by mohli byť vyrobené zo skla, no problémom by mohlo byť utesnenie hrán. V ideálnom prípade sú nádrže vyrobené z bežnej uhlíkovej ocele triedy 11 a 14. Taktiež je možné použiť hliník alebo nerezovú ocel. Kov by mal byť podľa potreby vystužený a na vnútorných a tesniacich plochách by mala byť nanosená antioxidačná vrstva, aby sa predišlo oxidácii spôsobenej náhodnou kondenzáciou vlhkosti a aby sa zaistila bezpečnostná rezerva proti skratu na stenách nádrže. Veko nádrže môže byť rovnako tak vyrobené zo skla alebo kovu.

Perforácie pre cievku kondenzátoru (v prípade 2-fázového prevedenia) môžu byť umiestnené vo veku nádrže alebo po stranách nádrže. Ak sú umiestnené po stranách, mali by perforovať nad prípadným potrubím kvapaliny, aby sa minimalizovalo riziko úniku. Vodou chladené kondenzátory sú často umiestňované v stene nádrže. To umožňuje neobmedzený prístup, eventuálnu výmenu hardvéru. Ďalšou možnosťou je umiestnenie kondenzátora do stredu nádrže nad IT vybavenie. Optimálne prevedenie kondenzátora dosahuje 4 +kW na liter pri prístupovom teplotnom rozdiely 15 °C. Priestor medzi kondenzátorom a vekom pomáha minimalizovať straty kvapaliny v dôsledku difúzie a pohybu vzduchu pri otvorení nádrže. Odporúča sa, aby tento priestor dosahoval najmenej 10 cm. Väčší priestor je síce lepší, no musí sa zväžiť vzhľadom na hustotu energie, výšku systému, prístupnosť a podobne.

Menšie otvory nádrže sú ľahko utesnené bežnými O-krúžkami. V prípade väčších otvorov môžu použiť duté O-krúžky alebo nafukovacie tesnenia. Nádrže by mali byť tepelne izolované, aby sa predišlo tepelným stratám a mohli tak uvažovať adiabatický dej.

## Príprava hardwaru

Každé zariadenie, ktoré nedisponuje chladičom (ventilátorom) spravidla nevyžaduje žiadne ďalšie úpravy. Príkladom môžu byť pamäťové moduly DIMM. Ventilátory by mali byť odstránené zo všetkých ostatných komponentov (CPU,GPU). V praxi bude každé toto zariadenie, ktoré vyžaduje účinné chladenie všeobecne vyžadovať určitý druh povlaku na zvýšenie teploty varu a zvýšenie účinnosti prenosu tepla. Môžu sa použiť buď organické alebo kovové povlaky. V prípade väčšiny zariadení, ako sú CPU, GPU sa navrhuje nanosenie tenkého pórovitého kovového povlaku spájkovaním alebo lepidlom. Počítačový hardware väčšinou obsahuje určité nečistoty z výroby. Z toho dôvodu by sa mala každá jedna komponenta pred ponorením poriadne očistiť, prípadne odmastiť.

## Tlak

Prevádzka za atmosférického tlaku je charakteristickým znakom dvojfázového ponorného chladenia, pretože minimalizuje straty kvapaliny, umožňuje ľahký prístup k hardwaru a eliminuje potrebu drahých hermetických elektrických konektorov. Cieľom tak je dosiahnutie prevádzky chladenia za atmosférického tlaku, no zároveň treba zabrániť úniku pár z nádoby do prostredia.

## Ďalšie vybavenie

Medzi ďalšie vybavenie možno zaradiť rôzne senzory pre monitoring celého procesu chladenia. Plavákový spínač sa môže použiť na prerušenie napájania hardvéru v prípade, že je hladina kvapaliny príliš nízka. Teplotné senzory v zóne pary sa môžu použiť na určenie výšky pary, čo môže byť užitočné na reguláciu prietoku vody na minimalizovanie pohybu pary. Snímač teploty nad kondenzátorom sa zohreje na teplotu varu kvapaliny, ak by sa kapacita kondenzátora mala prekročiť. Tento a ďalšie vstupy môžu byť smerované cez programovateľný logický radič, ktorý pomáha monitorovať a regulovať systém.

**Umiestnenie IT techniky**

V prípade ťažby kryptomien je dôležité správne umiestnenie hardwaru do nádrže. Všeobecne sa doporučuje umiestniť výpočtovú techniku pre ťažbu kryptomien do vertikálnej polohy. Čo sa ASIC minerov týka, tam je to relatívne bez problémov, postačí ak sa odstráni ventilátor, zbaví nečistôt a vertikálne postaví do nádrže. Ohľadom klasických GPU mining rigov je to mierne zložitejšie. Všeobecne sa doporučuje ponorenie všetkých komponentov okrem zdroja napájania (PSU), ktoré sa síce môžu umiestniť do nádrže, no prívetivejšou variantou je vyvedenie zdroja mimo nádrž. Grafické karty a základné dosky sa umiestnia do vertikálnej polohy tesne vedľa seba.

**Dielektrická kvapalina**

Kvapaliny vhodné pre ponorné chladenie môžeme primárne rozdeliť na základe použitia (1-fázové/2-fázové prevedenie). Líšia sa v mnohých vlastnostiach. Výrobcov, respektíve produktov je na trhu relatívne veľa, uviedol by som preto produkty od spoločnosti 3M™Nove™. Jednotlivé špecifikácie týchto kvapalín sú vyobrazené v nasledujúcej tabuľke 9. Hodnoty veličín, ktoré to vyžadujú (napríklad viskozita) sa vzťahujú k teplote 25°C. Tieto kvapaliny sú klasifikované ako nehorľavé, s nízkou toxicitou, nekorozívne a majú dobrú znášateľnosť s materiálmi a tepelnú stabilitu.

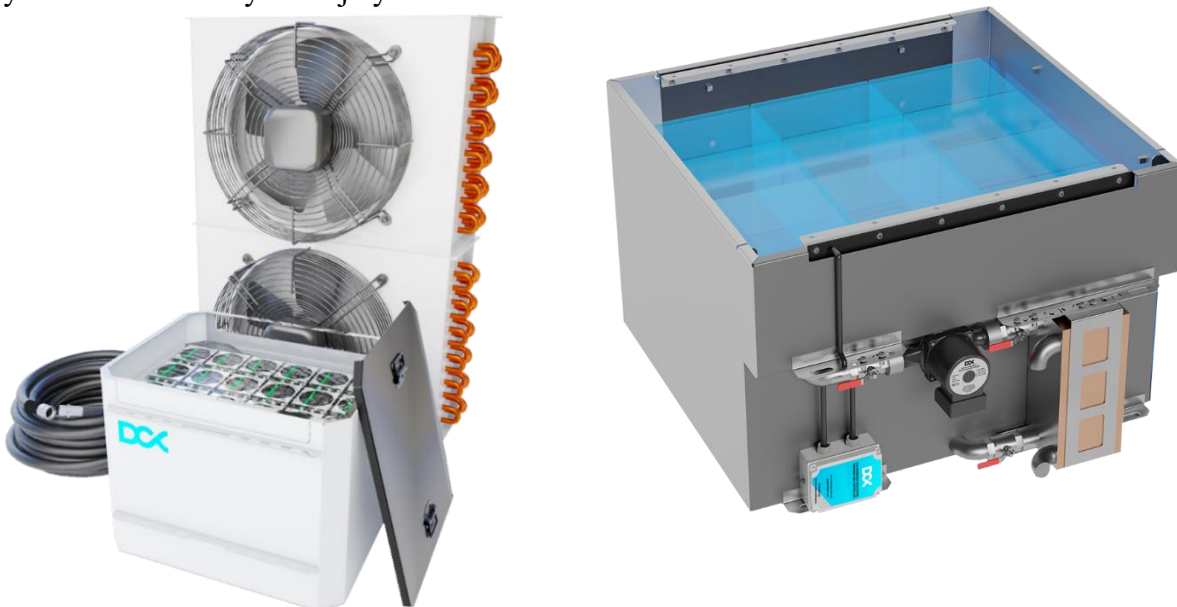
Tabuľka 8 Technické špecifikácie kvapalín od 3M Novec [31]

Vlastnosti	Jednotky	2-fázové ponorné chladenie			Jednofázové ponorné chladenie		
		7000	7100	7200	7300	7500	7700
Bod varu	°C	34	61	76	98	128	167
Bod tuhnutia	°C	-122	-135	-138	-38	-100	-50
Hustota	Kg.m <sup>-3</sup>	1400	1510	1420	1660	1614	1797
Kritická teplota	°C	165	195	210	243	261	290
Kritický tlak	MPa	2,48	2,23	2,01	1,88	1,55	1,41
Výparný tlak	kPa	65	27	16	5,9	2,1	<0,1
Molekulová hmotnosť	g.mol <sup>-1</sup>	200	250	264	350	414	528
Merné výparné teplo	kJ.kg <sup>-1</sup>	142	112	119	102	89	83
Tepelná rozťažnosť	K <sup>-1</sup>	0,0022	0,0018	0,0016	0,0013	0,0013	0,0011
Povrchové napätie	mN.m <sup>-1</sup>	12,4	13,6	13,6	15	16,2	18
Kinematická viskozita	10 <sup>-6</sup> .m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	0,32	0,38	0,41	0,71	0,77	2,52
Dynamická viskozita	10 <sup>-3</sup> .Pa.s	0,45	0,58	0,58	1,18	1,24	4,54

**5.2.2 Systém ponorného chladenia od DCX liquid cooling**

Ako príklad by som uviedol komerčný produkt od firmy DCX liquid cooling, ktorá sa mimo iné zaoberá aj ponorným chladením výpočtovej techniky pre ťažbu kryptomien. Informácie ohľadom produktov od firmy DCX liquid cooling sú prevzaté zo súkromnej emailovej

komunikácie s nimi a zo zdroja [34]. Spoločnosť ponúka hneď niekoľko variácií jednofázového ponorného chladenia a síce od jednej nádoby, cez regály, až po celé kontajnery. Nevýhodou v tomto prípade môže predstavovať veľkosť. Najmenší možný systém, ktorý ponúkajú, je box o rozmeroch 70×60×60 cm. Nádrž tak môže poňať 18 ASIC minerov S9 alebo 50 až 80 grafických kariet (v závislosti od konkrétneho typu a základnej dosky). Tento najmenší možný box je obsahom setu (obrázok 16), ktorý mimo iné obsahuje výmenník tepla kvapalina-vzduch (suchý chladič), čerpadlo a dielektrickú kvapalinu. Cena kompletu je približne 4000 €. Výhodou tohto produktu je určite možnosť dokupovať ďalšie a ďalšie boxy, prípadne zakúpiť celý upravený kontajner. Jeden box je dimenzovaný tak, aby odoberal približne 35 kW tepla. Chladič dodávaný s boxom obsahuje dva ventilátory o výkone 200 W a slúži k odvádzaniu tepla do vzduchu. Súčasťou setu je taktiež čerpadlo s prietokom 55 lpm (45 alebo 100 W). Spoločnosť ponúka možnosť zakúpiť tank s vlastným doskovým výmenníkom a čerpadlom. V tomto prípade dielektrická kvapalina cirkuluje len v nádobe, ktorú neopúšťa. Aby sa odvieďlo teplo, je treba pripojiť chladič, prúdiacu vodu alebo vodnú slučku pre domácnosť. Teplo zo systému môže tak byť ďalej využité.



Obrázok 16 Systém jednofázového ponorného chladenia od DCX Liquid cooling [34]

### 5.3 Proces získavania odpadného tepla

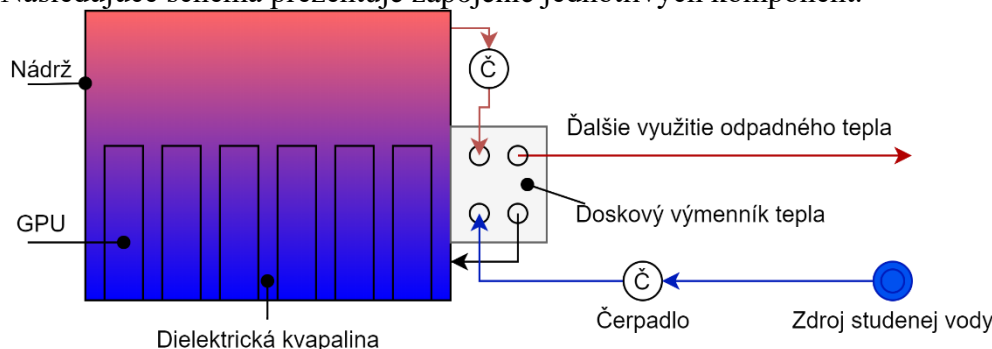
Celý systém bude pracovať správne pokiaľ budú splnené 2 základné podmienky – musí dochádzať ku konštantnému chladeniu výpočtovej techniky a zároveň je treba teplo odvádzat' mimo nádrž, čím zabezpečíme získavanie odpadného tepla pre ďalšie potenciálne využitie. Tak ako je písané vyššie, naskytajú sa dve varianty – jednofázové a dvojfázové prevedenie.

#### 5.3.1 Jednofázové prevedenie

Jednofázové prevedenie je charakteristické svojou relatívnou jednoduchosťou. V tomto prípade sa dielektrická kvapalina nedostáva do varu – zotrúva v kvapalnom stave. Chladiaci efekt dosiahneme stálou cirkuláciou dielektrickej kvapaliny. Kvapalina je pomocou čerpadla hnaná doskovým výmenníkom tepla, kde predá teplo a putuje naspäť do nádrže. Doskový výmenník môže byť inštalovaný priamo na stenu nádrže, aby sa tak predišlo využitiu väčšieho množstva dielektrickej kvapaliny. Ako chladiivo je možné použiť bežnú studenú úžitkovú vodu a pomocou čerpadla tak vytvoriť okruh slúžiaci k chladeniu a zároveň získavaniu odpadného tepla. Potrebné komponenty pre chladiaci systém a následnú rekuperáciu odpadného tepla v prípade 1-fázového riešenia sú tieto:

- Nádrž
- Dielektrická kvapalina
- Výmenník tepla
- Čerpadlo (2ks minimálne)
- Ostatné príslušenstvo (potrubie, ventily, rôzne snímače, tesnenia a pod.)

Nasledujúce schéma prezentuje zapojenie jednotlivých komponent.



Obrázok 17 Schéma chladenia a odvádzania tepla jednofázovej varianty

Veľkou prednosťou tohto spôsobu chladenia je životnosť kvapaliny. Keďže nedochádza k odparovaniu kvapaliny, nedochádza tak k stratám tejto drahej kvapaliny. Životnosť kvapaliny tak môže byť vyše 15 rokov.

### 5.3.2 Dvojfázové prevedenie

V prípade dvojfázového prevedenia je celý proces chladenia a následne i získavanie odpadného tepla trochu zložitejší. Je nutno brať v úvahu dva deje, ktoré nastávajú – vyparovanie a kondenzácia. Proces vyparovania môže viesť k značným stratám drahocennej dielektrickej kvapaliny preto je dôležité aby celý systém bol dobre utesnený. Ako je spomenuté vyššie, celý proces prebieha za atmosférického tlaku, avšak v prípade vyparovania dochádza k určitej expanzii a tlak v uzavretej nádrži môže rásť čo môže mať nepriaznivé účinky. Riešením by tak mohli byť kompenzátory objemu, ktoré by počas procesu vyrovnávali tlak v nádrži. Proces kondenzácie v tomto prípade zabezpečuje stále chladenie. Budeme uvažovať kondenzátor v tvare špirálovitej cievky (helical coil) umiestnenej v nádrži nad výpočtovou technikou. Ako chladivo pretekajúce kondenzátorom použijeme vodu, ktorá súčasne prijme a odvedie teplo mimo výpočtový systém. Voda obsahujúca toto teplo je potom ľahko využiteľná pre ďalšie aplikácie. Pokiaľ by sme použili nejaké iné chladivo, docielili by sme tým síce vyššiu účinnosť odvodu tepla, no na druhú stranu bolo by nutné použiť ďalší výmenník tepla pokiaľ by sme chceli odpadné teplo ďalej využívať.

Pre posúdenie využiteľnosti odpadného tepla z miningu a efektivity chladenia sú v prípade návrhu dvojfázového systému ponorného chladenia dôležité najmä tieto parametre:

- Kondenzátor a jeho špecifikácie
- Množstvo tepelnej energie, ktorú treba odvieť
- Celkový koeficient prestupu tepla
- Teplota zohriatej vody na výstupe kondenzátora
- Teplota skondenzovanej pary

**Výpočet celkového koeficientu prestupu tepla a výstupnej vody z kondenzátora**

1. Prvým krokom je voľba, respektíve odhad rozmerov kondenzátora a ďalších vstupných parametrov. Veličiny a ich hodnoty sú uvedené v tabuľke 9:

Tabuľka 9 Vstupné parametre pre výpočet koeficientu prestupu tepla

Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis
$a$	3,175	mm	Polomer rúrky kondenzátora
$R$	100	mm	Polomer skrutkovice kondenzátora
$v$	0,5	$m \cdot s^{-1}$	Priemerná rýchlosť prúdenia vody
$\nu$	$0,658 \cdot 10^{-6}$	$m^2 \cdot s^{-1}$	Kinematická viskozita vody pri teplote $40^\circ C$
$Pr$	4,32	-	Prandtlovo číslo pri teplote vody $40^\circ C$
$\lambda$	0,632	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Tepelná vodivosť vody pri $40^\circ C$
$\rho$	997	$Kg \cdot m^3$	Hustota vody
$c_{pv}$	4181,8	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Tepelná kapacita vody
$T_{cl}$	293,15	K	Teplota studenej vody na vstupe

2. Druhým krokom je stanovenie charakteru prúdenia vody v cievke kondenzátora. Pre určenie laminárneho či turbulentného prúdenia je nutné stanoviť hodnotu Reynoldsového čísla a kritickú hodnotu Reynoldsového čísla. Reynoldsovo číslo určíme na základe rovníc (2) až (5).

$$Re = \frac{v \cdot D_h}{\nu} = 3165,503 \quad (2)$$

$D_h$  [mm] – hydraulický priemer definovaný rovnicou 3

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{o} = 6,35mm \quad (3)$$

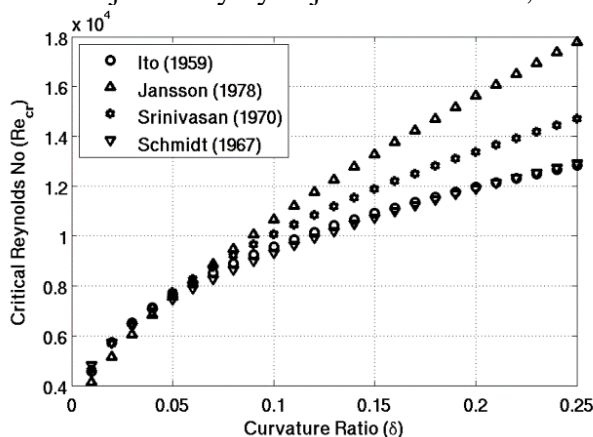
$S$  [mm<sup>2</sup>] – prietokový prierez definovaný rovnicou 4

$$S = \pi \cdot a^2 = 31,669mm^2 \quad (4)$$

$o$  [mm] – omáčaný obvod cievky definovaný rovnicou 5

$$o = 2 \cdot \pi \cdot a = 19,949mm \quad (5)$$

Pre prúdenie potrubím kruhového prierezu plno vyplneným kvapalinou sa používa ako medza stability laminárneho prúdenia hodnota  $Re = 2320$ . Avšak v našom prípade, kedy sa jedná o prúdenie špirálovitou cievkou je táto medza posunutá vyššie než je tomu tak u priameho potrubia. A pre stanovenie kritickej hodnoty využijeme obrázok 18,



Obrázok 18 Kritická hodnota  $Re$  [35]

kde je na ose  $x$  vyneseny pomer zakrivenia definovany ako podiel  $a$  ku  $R$ , ktorý je v našom prípade 0,032. Potom na základe spomínaného obrázku vidíme, že môžeme uvažovať laminárne prúdenie.

3. Ďalším krokom bude výpočet Nusseltovho čísla (rovnica (9)). Pri výpočte Nusseltovho čísla pomocou rovnice (9) uvažujeme konštantný tepelný tok [36]. No ešte pred tým je nutné stanoviť Deanovo číslo (rovnica (6)) a hodnoty koeficientov (rovnica (7) a (8)) vystupujúcich v rovnici (9).

$$De = Re \cdot \sqrt{\frac{a}{R}} = 564,046 \quad (6)$$

$$x_1 = \left(1 + \frac{1342}{De^2 \cdot Pr}\right)^2 = 1,001 \quad (7)$$

$$x_2 = \left(1 + \frac{1,15}{Pr}\right) = 1,266 \quad (8)$$

$$Nu_H = \sqrt[3]{\left(4,364 + \frac{4,343}{x_1}\right)^3 + 1,816 \cdot \sqrt{\left(\frac{De}{x_2}\right)^3}} = 26,11 \quad (9)$$

4. Keďže Nusseltovho číslo vyjadruje podiel prenosu tepla konvekciou a kondukciou, potom môžeme celkový koeficient prestupu tepla  $\alpha$  vyjadriť z rovnice (10):

$$\alpha = \frac{Nu_H \cdot \lambda}{a} = 5197,394 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (10)$$

5. Hmotnostný pretok vody v kondenzátore sa vypočíta z rovnice 11:

$$\dot{m}_c = \rho \cdot S \cdot v = 0,016 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (10)$$

6. Výpočet vody na výstupe z nádrže.

Za predpokladu, zanedbateľného prenosu tepla medzi nádržou a okolím (adiabatický proces) môžeme tepelný tok vyjadriť pomocou rovníc (11) a (12)

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \cdot (h_{c2} - h_{c1}) \quad (11)$$

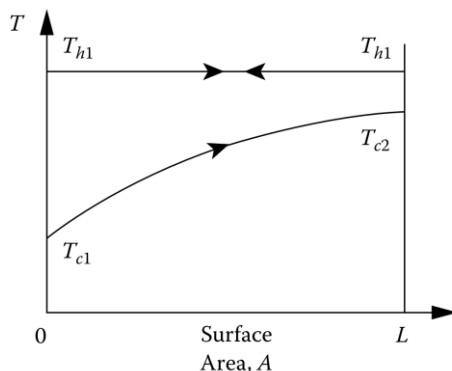
$$\dot{Q} = \dot{m}_h \cdot (h_{h1} - h_{h2}) \quad (12)$$

Kde,  $h$  predstavuje entalpiu, exponenty  $c, h$  zasa studené a horké médium a exponenty 1,2 symbolizujú počiatočný a konečný stav média. V našom prípade tak hovoríme o studenej úžitkovej vode a horúcej pare dielektrickej kvapaliny. Pre zjednodušenie predpokladáme, že kvapaliny nepodstúpia fázovú premenu a majú konštantnú tepelnú vodivosť, môžeme tak potom zmenu entalpií nahradiť výrazom  $dh = c_p \cdot dT$  (rovnice (13) a (14)).

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \cdot c_p \cdot (T_{c2} - T_{c1}) \quad (13)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_h \cdot c_p \cdot (T_{h1} - T_{h2}) \quad (14)$$

Ako je vidno z obrázka 19, teplotný rozdiel medzi studeným a horúcim médiom kolíše s pozíciou vo výmenníku.



Obrázok 19 Variácia teploty kvapalín[36]

Preto je pri analýze prenosu tepla vo výmenníkoch vhodné, stanoviť primeranú strednú hodnotu rozdielu teplôt medzi studeným a horúcim médiom tak, aby sa celkový tepelný tok mohol stanoviť z rovnice (15):

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T_{Lm} \quad (15)$$

Kde  $A$  predstavuje celkovú plochu povrchu výmenníka (kondenzátora) a  $\Delta T_{Lm}$  je funkciou  $T_{h1}T_{h2}T_{c1}T_{c2}$  (rovnica (12)):

$$\Delta T_{Lm} = \frac{(T_{h2} - T_{c1}) - (T_{h1} - T_{c2})}{\ln \frac{(T_{h2} - T_{c1})}{(T_{h1} - T_{c2})}} \quad (16)$$

V prípade, že by sme poznali hodnoty entalpií, potom rovnice (11), (12) a (15) tvoria sústavu troch rovníc. Na základe ktorých možno ďalej počítať celkovú plochu povrchu výmenníka a koncové hodnoty entalpií daného média.

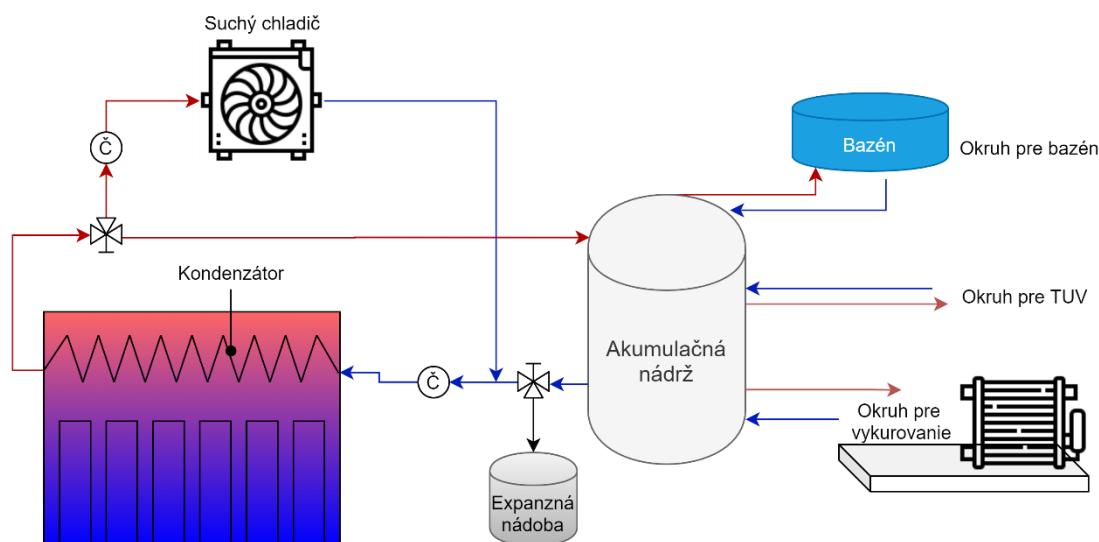
Avšak v našom prípade, pre budem uvažovať  $Q =$  výkon mining rigu, t.j.1680 W a pomocou rovnice (14) odhadneme koncovú teplotu približne 65°C. Je nutné však upozorniť, že tieto hodnoty nie sú len orientačné. Vo výpočte uvažujeme adiabatický proces, konštantný tepelný tok a zcela úplne zanedbávame proces kondenzácie, teda zmenu skupenstva jednej z látok.

Pre navrhované hodnoty v tabuľke 9 a na základe rovníc (10) a (14) môžeme počítať s odpadným teplom vo forme zohriatej studenej vody, ktorá dosahuje 65°C a prietoku 57 litrov za hodinu.

#### 5.4 Potenciálne využitie odpadného tepla

V závislosti od množstva odpadného tepla z výpočtovej techniky je možné toto teplo ďalej využiť pre rôzne aplikácie. Typickým príkladom je ohrev teplej úžitkovej vody. V ideálnom prípade by systém mal možnosť napojenia na 4 okruhy (obrázok 19). Pričom 1. okruh, ktorý predstavuje slučku medzi nádržou a akumuláčnou nádržou, by bol využívaný za každých okolností. Popis jednotlivých okruhov je nasledovný:

- 1.okruh – Ohriata voda smeruje do akumuláčnej nádrže, odkiaľ sa následne vracia späť do nádrže pre ponorné chladenie. Súčasťou tohto okruhu môže byť expanzná nádoba.
- 2.okruh – predstavuje zapojenie nádrže s IT vybavením spolu so suchým chladičom. Tento okruh predstavuje ako takú poistku pre prípad prebytočného odpadného tepla, ktoré nie je ďalej využívané a voda tak je napojená na suchý chladič, ktorý odvádza teplo do vzduchu
- 3.okruh – V teplých mesiacoch možno využiť teplo pre ohrev bazénu v víriviek a podobne
- 4.okruh – Väčšie množstvá odpadného tepla alebo v prípade spoločného využitia s tepelným čerpadlom môže odpadného teplo slúžiť ako primárny zdroj vykurovania



Obrázok 19 Potenciálne využitie odpadného tepla pre domácnosť

## 6 Ekonomická bilancia návrhu

### 6.1 Náklady

Čo sa nákladov týka, rozlišujeme počiatkové a prevádzkové náklady. Počiatkové náklady predstavujú potrebný vstupný kapitál, respektíve sumu za celkový systém. Jedná sa tak o jednorazovú investíciu a patrí sem:

- Samotný mining rig (vid'. [tabuľka 6](#))
- Chladiaci systém a rekuperácia odpadného tepla (vid'. [kapitola 6.3.1](#))

Konkrétnu celkovú sumu vstupnej investície je ťažko určiť. V prípade reálneho nákupu by sa vyžadoval určitý prieskum trhu, aby sme dosiahli čo najnižšiu cenu. V našom prípade by som odhadoval celkovú sumu na  $\pm 8000$  €, pričom značný vplyv na túto sumu má cena dielektrickej kvapaliny, ktorá bohužiaľ nie je bežne verejne dostupná.

Na druhú stranu, prevádzkové náklady závisia najmä od ceny elektriny, ktorá sa môže často krát líšiť. V našom prípade budeme počítat' so sumou 0,1577 €/kWh [37]. Do tejto kategórie radíme spotrebu elektrickej energie:

- Hardwaru (~1800 W)
- Čerpadiel (~120 W)

Spotreba elektrickej energie tak dosahuje 1,92 kWh, čo odpovedá hodnote 7,267 € za 24 hodín.

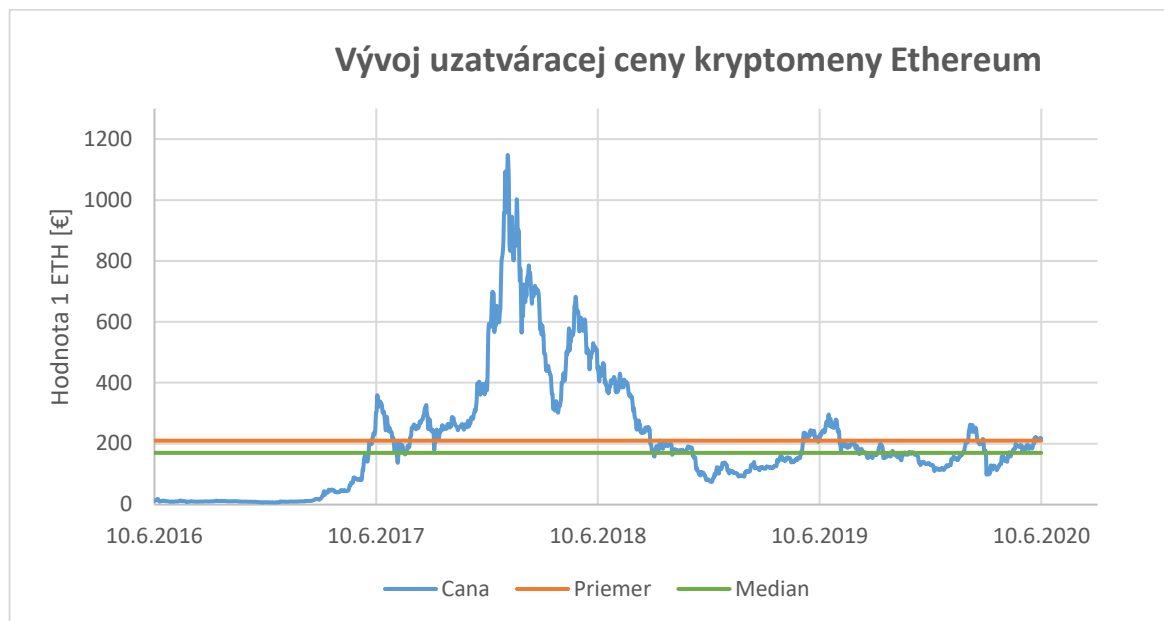
### 6.2 Profitabilita ťažby a ROI

Samotná predpoveď potenciálneho výnosu z ťažby je za každým založená na určitých predpokladoch. To, či náš systém bude profitabilný závisí od týchto faktorov:

- Cena konkrétnej kryptomeny (v našom prípade Ethera)
- Hashrate mining rigu – výkon vlastneného výpočtového systému
- Hashrate siete – celkový výkon všetkých zúčastnených ťažby konkrétnej kryptomeny
- Block time – čas potrebný pre nájdenie a pridanie nového bloku do blockchainu
- Block reward – definuje odmenu, ktorú miner dostane za vyt'azenie jedného bloku.
- Výkon rigu – predstavuje spotrebu elektrickej energie mining rigu
- Obtiažnosť ťažby – je parameter, ktorý zabezpečuje konštantnosť priemerného času pre vytvorenie nového bloku v prípade meniaceho sa hashratu siete
- Cena elektriny

Pravdepodobne najdôležitejším parametrom je vývoj ceny danej kryptomeny. V našom prípade, ako je spomenuté už vyššie, bude cieľom záujmu kryptomena Ethereum. Pre odhad profitability je dôležité poznať vývoj ceny za určité obdobie – konkrétne berieme v úvahu od 10.6.2016 do 10.6.2020. Takže analyzované obdobie pozostáva zo štvorročného obdobia, pričom v priebehu tohto obdobia Ethereum dosialo minimálnej hodnoty 6,342 € a maximálnej 1145,170 € za jeden coin. Vývoj ceny Ethera je znázornený na obrázku 18, z ktorého vyplýva priemerná cena 218,189 € a medián v hodnote 173,444 €. Dáta pre spracovanie grafu 4 som čerpal z Yahoo Finance.

Pri ďalšom výpočte potenciálneho profitu budeme uvažovať priemernú cenu za predajnú. Mimo iné budeme využívať zjednodušený model výpočtu, ktorý neberie v úvahu tzv. uncle blocks. Uncle block je termín označujúci síce platné, ale odmietnuté bloky z hlavného blockchainu kvôli pracovnému mechanizmu blockchainu. Z toho dôvodu je odmena za tieto bloky niekoľko násobne nižšia než je odmena za regulárny blok. Block reward tak pozostáva zo súčtu statickej blokovej odmeny, transakčných poplatkov a odmien za uncle blocks.



Graf 4 Vývoj uzatvárající ceny Etherea

Potenciální hrubý profit (denní) sa vypočíta na základe rovnice (17):

$$Profit_H = \frac{H_{Rig}}{H_{net}} \cdot \frac{D \cdot 24 \cdot 60^2}{B_T} B_R \cdot C_{ETH} \quad (17)$$

- $H_{Rig}$  = Hashrate mining rigy [ $h \cdot s^{-1}$ ]
- $H_{net}$  = Hashrate siete [ $h \cdot s^{-1}$ ]
- $D$  = Počet dní [-]
- $B_T$  = Block time [s]
- $B_R$  = Block reward [ETH]
- $C_{ETH}$  = Cena Etherea [€]

Prvý člen v rovnici predstavuje pravdepodobnosť, že práve môj mining nájde a pridá nový blok do blockchainu. Profitabilita je tiež počítaná za predpokladu, že náš systém bude súčasťou mining poolu.

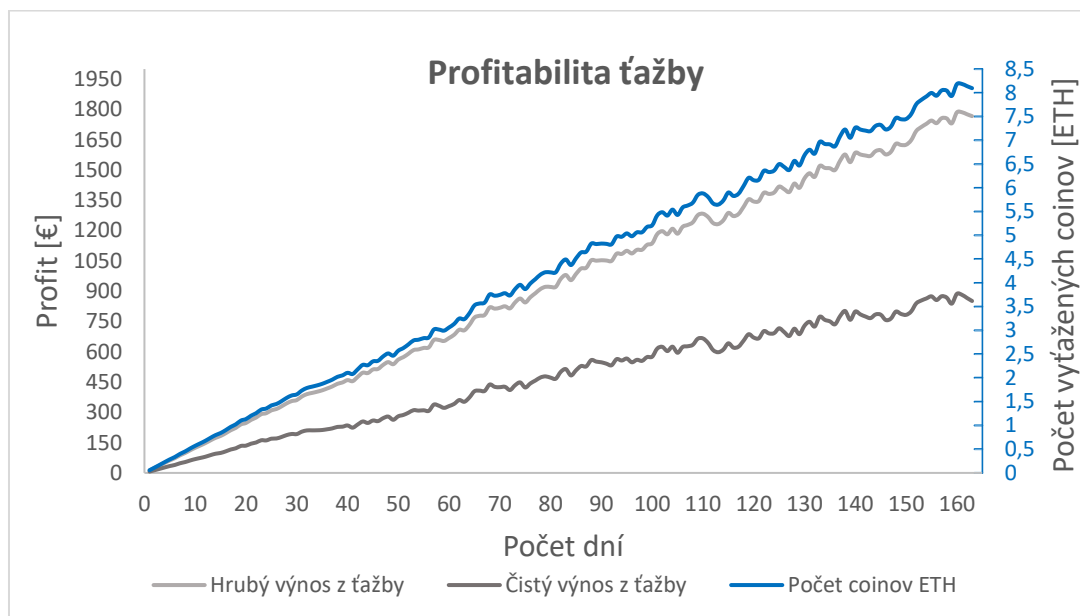
Potenciální čistý profit vrátane nákladov sa vypočíta na základe rovnice (18):

$$Profit_{\check{c}} = \left( \frac{H_{Rig}}{H_{net}} \cdot \frac{D \cdot 24 \cdot 60^2}{B_T} B_R \cdot C_{ETH} \right) - D \cdot P \cdot 24 \cdot C_{el.} \quad (18)$$

- $P$  = Výkon výpočtovej jednotky [kW]
- $C_{el.}$  = Cena elektriny [€·kW<sup>-1</sup>]

Na základe rovnice (17), modifikovanej rovnice (17) a rovnice (18) je zostrojený graf prezentujúci potenciálny počet coinov Etherea, hrubý a čistý zisk z ťažby. Keďže väčšina parametrov sa mení v čase, pre odhad výnosov z ťažby boli použité dáta od 1.1.2020 do súčasnosti. Jednotlivé dáta premenných ako je hashrate siete, block time a block reward boli prevzaté z [38].

Je nutné si uvedomiť, že výška výnosu je počítaná na základe priemernej ceny ETH za posledné 4 roky (graf 5). V skutočnosti sa dá predpokladať, že majiteľ rigu si vyťažené coiny drží určitú dobu pokiaľ cena nevzrastie. Môže tiež nastať situácie, kedy je ťažby inej kryptomeny profitabilnejšia, v tom prípade prepne vlastníak algoritmus a zisk sa znovu môže navýšiť. Týmto spôsobom by sme mohli profit zdvojnásobiť ba dokonca aj strojnásobiť.

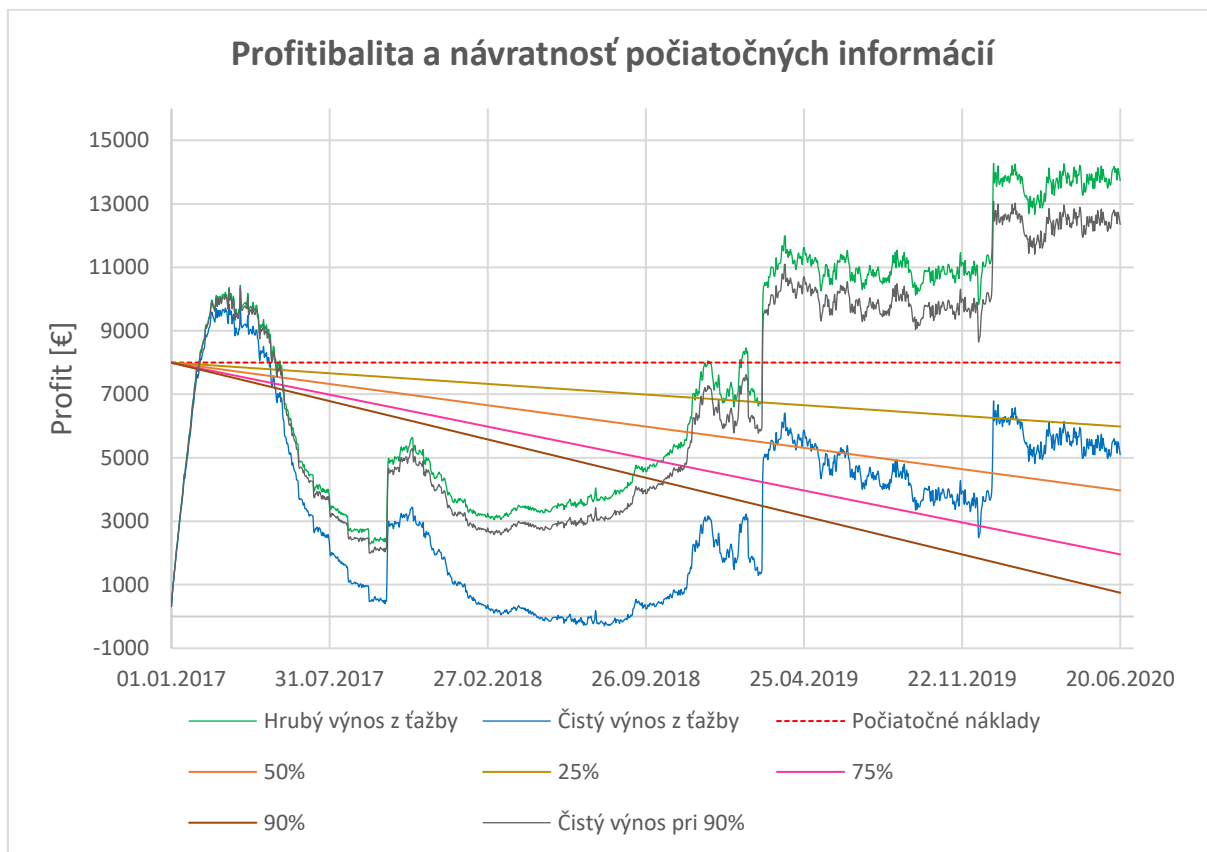


Graf 5 Potenciálny profit ťažby ETH

### Návratnosť počiatkovej investície

Profitabilita a návratnosť počiatkovej investície v prípade nami navrhnutom systéme je prezentovaná prostredníctvom grafu 6. Podobne ako v prípade grafu 5, dáta sú prevzaté z [38]. Na rozdiel od grafu 5 berieme v úvahu väčší rozptyl časového obdobia a síce od 1.1.2017 do 20.06.2020. Hrubý výnos z ťažby (zelená krivka) respektíve čistý výnos z ťažby (modrá krivka) sú vykreslené na základe rovnice 17 a 18 podobne ako tomu je v grafe 5. Z grafu 6 plynie, že väčšie časové obdobie spôsobí, že profitabilitu ťažby nie je možné ani zďaleka považovať za lineárnu funkciu čo môže naznačovať graf 5. Červená čiarkovaná krivka predstavuje počiatkové náklady spojené pre zostavenie jednotky, t.j. odhadnutých 8000 €. Ďalšie krivky označené číslom v percentách (žltá, oranžová, ružová a hnedá) zobrazujú mieru účinnosti využitia odpadného tepla z mining rigu. Keďže nepoznáme celkovú účinnosť získavania tepla z nádrže, tieto krivky podľa určujúceho čísla v % vyjadrujú množstvo získaného tepla vo Wattoch, pričom za 100 % považujeme výkon mining rigu – t.j. 1680 W. A posledná sivá krivka vyjadruje čistý výnos z ťažby vrátane odčítaných prevádzkových nákladov a odčítaného množstva odpadného tepla (predpoklad, že z rigu odvedie 90% tepla) prevedeného na €.

V tomto grafe je dôležité si vyšínúť, kedy jednotlivé lineárne úsečky (miera účinnosti využitia odpadného tepla z mining rigu vyjadrená v % získaného tepla vo Wattoch) pretnú krivku čistého výnosu z ťažby. Vidno, že napr. 25% lineárna úsečka pretne krivku čistého výnosu z ťažby až po necelých 3 rokoch, čo znamená, že návratnosti dosiahneme až po necelých 3 rokoch. Naopak 90% lineárna úsečka pretne krivku čistého výnosu z ťažby približne po 2 rokoch. Takže miera účinnosti využitia odpadného tepla s 25 % a s 90 % získaného tepla vo Wattoch môže v návratnosti vytvoriť rozdiel približne až jedného roku.



*Graf 6 Profitabilita a ROI projektu*

### 6.3 Alternatívne využitie mining rigu

Predchádzajúca podkapitola pojednáva mimo iné aj o tom, že samotný mining síce môže dosahovať zisku, no na druhú stranu môže viesť i k značným stratám. Ťažba kryptomien tak nemusí byť za každých okolností finančne výnosná. To či bude ťažba profitabilná závisí od vyššie uvedených faktorov. V prípade, že mining vedie k stratám, považujem za vhodné, ba aj nutné hľadať určité alternatívy pre využitie výpočtového systému mimo ťažbu kryptomien. Pokiaľ sa jedná o ťažbu prostredníctvom grafických kariet, je možné využiť alternatívu, ktorá je prezentovaná viacmennej jedným spôsobom a síce prenájmom výpočtového výkonu externe. Táto služba môže byť prezentovaná v rôznych modifikáciách: Cloud rendering, Cloud gaming a Distributed computing.

#### Cloud rendering

So súčasným pokrokom v zobrazovacej techniky, sú požadované vyššie a vyššie požiadavky na 3D efekty u kinematografickej tvorby. Práve pri tvorbe realistického zobrazenia, ktoré často vidáme vo filmoch, je nepostrátený vysoký výpočtový výkon. Tento výkon, tak ako naznačuje táto práca nie je bežne dostupná záležitosť. Z tohto dôvodu sa využíva externé sieťové renderovanie – cloud rendering, kde jednotlivé výpočty prebiehajú súčasne na niekoľkých zariadeniach. Problémom môže byť profitabilita tohto spôsobu. Majiteľ výpočtového výkonu, pokiaľ chce byť ziskový, musí mať stálu klientelu a s tým spojené náklady (marketing).

### **Cloud gaming**

Ďalším príkladom ako využiť neprofitabilný mining rig je využitie grafických kariet pre hranie náročných počítačových hier. V súčasnosti sa kladú vysoké požiadavky na grafiku pre počítačové hry. Preto existuje možnosť externých GPU uložených v datacentrách, ktoré slúžia pre vykresľovanie reálneho obrazu hier. Výpočty grafických kariet sa v reálnom čase využívajú spotrebiteľom.

### **Distributed computing**

Tento spôsob je v praxi využívanie viacerých počítačov, často geograficky distribuovaných, ale spojených cez internet, aby spolupracovali pri plnení spoločných výkonovo a časovo náročných úloh. Spravidla sa spúšťa na skupine počítačov, ktoré priamo spolupracujú pri koordinácii úloh. Konkrétnym príkladom je projekt Folding @ home, ktorý je založený na distribuovaných výpočtoch, využíva počítače pripojené cez internet dobrovoľníkov k simulovaniu skladania proteínov. Výsledky simulácií sú využívané napríklad pre výskum zle zložených proteínov pri nádorových ochoreniach, Alzheimerovej chorobe a podobne. Projekt Folding @ home sa v súčasnosti, mimo iné, podieľa na výskume lieku na Covid19, do ktorého sa v zapojili behom karantény i nevyužitú počítače Vysokého učení technického v Brne. [39]

Negatívom tohto spôsobu je len to, že výpočtový výkon sa poskytuje zdarma, v tomto prípade tak za prenájom výkonu negenerujeme žiaden zisk. No na druhú stranu tak môžeme značne pomôcť v oblasti vývoja a pokroku.

## ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo priblíženie problematiky ťažby kryptomien v oblasti energetickej náročnosti, spôsobov chladenia, rekuperácia odpadného tepla a ekonomickej bilancie. Mimo iné zámerom bolo poukázať na možnosti zvýšenia efektivity využitia energie za použitia moderných technológií.

Prvá časť tejto práce predstavuje teoretické zoznámenie sa s týmto. Najprv boli vysvetlené základné pojmy v oblasti krypto-sveta. Vysvetlili sme si základné pojmy ako kryptomena, decentralizácia, blockchain, mining a iné. Keďže samotný mining je charakteristický vysokou energetickou náročnosťou, Kapitola 2 pojednáva o celkovej spotrebe elektrickej energie v prípade ťažby Bitcoinu alebo Etherea. Vysoký požadovaný výkon ide ruka v ruku s technológiami chladenia. V prípade chladenia rozlišujeme vzduchom a kvapalinou chladené systémy, pričom každá kategória je stručne vysvetlená v Kapitole 3. Pre zvýšenie efektivity využitia energie sa v praxi využíva hneď niekoľko rôznych technológií. Všeobecne sa tak jedná o výrobu chladu či elektriny alebo priameho využitia odpadného tepla. Každá kategória obsahuje rôzne riešenia pre rôzne aplikácie. Druhá časť práce bola venovaná teoretickému návrhu kompletnej jednotky pre využitie odpadného tepla z celého procesu ťažby kryptomien. V úvahu sme brali klasický GPU mining rig, ponorné chladenie a priame využitie odpadného tepla, pričom získavanie tepla bolo prostredníctvom kondenzátora v tvare špirálovitej (helical) rúrky. Záverom práce bolo posúdenie ekonomickej bilancie návrhu.

Zámerom tejto práce nebolo vytvorenie konkrétneho postupu či popisu zhotovenia celej jednotky. Naopak návrh samotného systému vysvetlený v tomto dokumente, by mal slúžiť ako dôkaz, predstava, že možností využitia odpadného tepla, ktoré vzniká de facto ako sekundárny produkt pri ťažbe, je skutočne veľa. Napriek tomu, že popularita kryptomien stúpa, komerčný trh neponúka veľa odborných riešení s využitím odpadného tepla. A keďže sa jedná v podstate len o vysoko výkonné IT zariadenia, potom možné riešenia v prípade rekuperácie odpadného tepla by mohli predstavovať budúcnosť nie len v prípade ťažby kryptomien, no aj iných IT odvetviach.

Keďže ponorné chladenie vyniká najmä kvôli úspore priestoru a relatívne jednoduchého odvádzania tepla, predstavuje toto riešenie možnú hudbu budúcnosti. Konkrétny príklad môže predstavovať firma Future Mining so sídlom tu v Brne, ktorá prejavila záujem práve o chladenie prostredníctvom ponorenia IT techniky do dielektrickej kvapaliny. Na základe osobného stretnutia, môžem povedať, že by boli ochotný poskytnúť spoluprácu v prípade reálneho návrhu.

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] HOSP, Julian. Kryptomeny: Bitcoin, Ethereum, Blockchain, ICO&Co. jednoducho a zrozumiteľne. Bratislava: Tatran, 2018. ISBN 978-80-222-0945-8.
- [2] CHOHAN, Usman W.. Cryptocurrencies: A Brief Thematic Review [online]. 2017 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3024330](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3024330). Discussion Paper. School of Business and Economics, University of New South Wales, Canberra.
- [3] ANDONI, M. et.al. Renewable and Sustainable Energy Reviews: Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. Elsevier [online]. 2018, (100), 174 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1016/J.RSER.2018.10.014. ISSN 1364-0321. Dostupné z: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118307184)
- [4] MISHRA, Sailendra Prasanna et.al. ENERGY CONSUMPTION – BITCOIN'S ACHILLES HEEL [online]. 2017, 24.11.2017 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.2139/ssrn.3076734. Dostupné z: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3076734](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3076734)
- [5] SUKHAREV, Pavel V. a Dmitry S. SILNOV. Mining Result Validation in the Ethereum Cryptocurrency: Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019 [online]. 2019 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8656906. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/331853887\\_Mining\\_Result\\_Validation\\_in\\_the\\_Ethereum\\_Cryptocurrency](https://www.researchgate.net/publication/331853887_Mining_Result_Validation_in_the_Ethereum_Cryptocurrency)
- [6] KRISTOUFEK, Ladislav. Bitcoin and its mining on the equilibrium path. Elsevier [online]. 2020 (85), 9 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1016/J.ENECO.2019.104588. Dostupné z: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988319303834](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988319303834)
- [7] HILEMAN, G. a M. RAUCHS. GLOBAL CRYPTOCURRENCY BENCHMARKING STUDY [online]. 2017, 6.4.2017, 115 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.2139/ssrn.2965436. Dostupné z: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2965436](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2965436)
- [8] Miner 420 8G - Ethash 420 MH/s, Cryptonight 12800 H/s. [Online]. Dostupné z: <https://www.voltio.cz/cs/minery/366-miner-400-ethash-400-mhs-cryptonight-12800-hs.html>. Prístup: 2020-06-24].
- [9] Bitmain Antminer S9i (14Th) profitability | ASIC Miner Value. [Online]. Dostupné z: <https://www.asicminervalue.com/miners/bitmain/antminer-s9i-14th>. [Prístup: 2020-06-24].
- [10] DE VRIES, A. COMMENTARY Bitcoin's Growing Energy Problem. Elsevier [online]. 2018, 5 (strany 801–809) [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1016/j.joule.2018.04.016. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435118301776>
- [11] LI, J. et.al. Energy consumption of cryptocurrency mining: A study of electricity consumption in mining cryptocurrencies. Elsevier [online]. 2018, 2019(168), 8 (160-168) [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.046. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218322503>
- [12] Electricity consumption of Bitcoin: a market-based and technical analysis. [Online]. Dostupné z: <http://blog.zorinaq.com/bitcoin-electricity-consumption/>. [Prístup: 2020-06-20].
- [13] Realtime mining hardware profitability | ASIC Miner Value. [Online]. Dostupné z: <https://www.asicminervalue.com/>. [Prístup: 2020-06-25].
- [14] CAPOZZOLI, Alfonso a Giulio PRIMICERI. Cooling systems in data centers: State of art and emerging technologies. Elsevier [online]. 2015, 2015(83), 9 (484 - 493) [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.12.168. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215028337>
- [15] EBRAHIMI, Khosrow et.al. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities. Elsevier

- [online]. 2014, 2014(31), 16 (622 - 638) [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1016/j.rser.2013.12.007. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113008216>
- [16] ORÓ, Eduard et.al. Waste heat recovery from urban air cooled data centres to increase energy efficiency of district heating networks. Elsevier [online]. 2018, 2019(45), 20 (522 - 542) [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1016/J.SCS.2018.12.012. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670718314082>
- [17] SHARMA, Madhu et.al. Analyzing the Data Center Efficiency by Using PUE to Make Data Centers More Energy Efficient by Reducing the Electrical Consumption and Exploring New Strategies. Elsevier [online]. 2015, 2015(48), 6 (142 - 148) [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1016/J.PROCS.2015.04.163. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915006729>
- [18] EBRAHIMI, Khosrow et.al. A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities. Elsevier [online]. 2014, 2014(31), 16 (622 - 638) [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1016/j.rser.2013.12.007. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113008216>
- [19] Free Cooling – Direct and Indirect | STULZ. [Online]. Dostupné z: <https://www.stulz.de/en/newsroom/blog/free-cooling-direct-and-indirect-79/> . [Přístup: 2020-03-26].
- [20] Install In-rack or In-row Cooling | Products | ENERGY STAR. [Online]. Dostupné z: [https://www.energystar.gov/products/install\\_in\\_rack\\_or\\_in\\_row\\_cooling](https://www.energystar.gov/products/install_in_rack_or_in_row_cooling) . [Accessed: 2020-06-25].
- [21] Liquid Data Center Cooling Solutions for HPC Clusters | Aspen Systems. [Online]. Dostupné z: <https://www.aspsys.com/solutions/infrastructure/liquid-cooling/> . [Přístup: 2020-06-25].
- [22] COLES, H a M. Herrlin. Immersion Cooling of Electronics in DoD Installations.[Online]. 2016. Dostupné z: <https://eta.lbl.gov/publications/immersion-cooling-electronics-dod> . [Přístup: 2020-06-05].
- [23] Immersion Cooling with 3M Fluids for Data Centers | 3M-US. [Online]. Dostupné z: [https://www.3m.com/3M/en\\_US/data-center-us/applications/immersion-cooling/](https://www.3m.com/3M/en_US/data-center-us/applications/immersion-cooling/) . [Přístup: 2020-06-25].
- [24] SYSTHERM s.r.o., ” SYMPATIK ® Absorpční a Adsorpční chlazení.” Dostupné z: <http://systherm.com/wp-content/uploads/2019/07/systherm-pl-absorpcni-a-adsorpcni-chlizeni.pdf?fbclid=IwAR2FLlojIsra4fk904WPyewZ4CNWzwzwmGZ1Jk47XOmktoxRH6Cv0H>
- [25] ŠKORPÍK, Jiří. Parní turbína v technologickém celku, Transformační technologie, 2011-04, [last updated 2020-01-26]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/25.html> .
- [26] ZHAO, Yuanyang et.al. Expansion devices for organic Rankine cycle (ORC) using in low temperature heat recovery: A review. Elsevier [online]. 2019, 2019(199), 14 [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1016/J.ENCONMAN.2019.111944. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419309501>
- [27] Možnosti využití termoelektrických jevů pro výrobu elektrické energie z odpadního tepla - TZB-info. [Online]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/10220-moznosti-vyuziti-termoelektricky-jevu-pro-vyrobu-elektricke-energie-z-odpadniho-tepla> . [Přístup: 2020-04-07].
- [28] BHOLE, Khiran a Rajeh B. Kolambekar. Development of Prototype for Waste Heat Energy Recovery from Thermoelectric System at Godrej Vikhroli Plant. [Online]. 2015. Dostupné z: <https://ieeexplore-ieee->

- [org.ezproxy.lib.vutbr.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7029943&tag=1](http://org.ezproxy.lib.vutbr.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7029943&tag=1) . [Přístup: 2020-04-06]. International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field (ICNTE-2015)
- [29] RIFFAT, S. B. a Xiaoli MA. Thermoelectrics: A review of present and potential applications. Elsevier [online]. 2003, 2003(23), 22 (913 - 935) [cit. 2020-06-26]. DOI: 10.1016/S1359-4311(03)00012-7 Appli. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431103000127>
- [30] RUGGEDISED - Smart city lighthouse project | SMART THERMAL GRID. [Online]. Dostupné z: <https://ruggedised.eu/smart-solutions/smart-thermal-grid/> . [Accessed: 2020-06-25].
- [31] Data Center Liquid Cooling Applications with 3MTM Novec™ Engineered Fluids, 2020.[online] Dostupné z : [www.3M.com/novec](http://www.3M.com/novec).
- [32] Data Center Liquid Cooling Applications with 3MTM Novec™ Engineered Fluids, 2020.[online] Dostupné z : [www.3M.com/novec](http://www.3M.com/novec).
- [33] Immersion cooling of GPUs in ComBox IC-6 - ComBox Technology - Medium. [Online]. Dostupné z: <https://medium.com/@ComBoxTech/immersion-cooling-of-gpus-in-combox-ic-6-575e273fe244> . [Přístup: 2020-06-25].
- [34] Immersion Liquid Cooling Systems for Cryptomining Operators - Cryptocooling.eu. [Online]. Dostupné z: <https://cryptocooling.eu/#dry> . [Accessed: 2020-06-25].
- [35] MITROVIC, Jovan a J.S. JAYAKUMAR. Heat Exchangers - Basics Design Applications. Kapitola 12 Helically Coiled Heat Exchangers. InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0278-6. [online]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/221927703\\_Helically\\_Coiled\\_Heat\\_Exchangers](https://www.researchgate.net/publication/221927703_Helically_Coiled_Heat_Exchangers) .
- [36] KAKAÇ, S., H. LIU a A. PRAMUANJAROENKIJ. HEAT EXCHANGERS: Selection, Rating, and Thermal Design. 3. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 30: CRC Press, 2012.
- [37] EUROSTAT, Statistics Explained. Štatistika cien elektriny. [Online]. Dostupné z: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_price\\_statistics/sk](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics/sk) . [Přístup: 2020-06-20].
- [38] Ethereum (ETH) Blockchain Explorer. [Online]. Dostupné z: <https://etherscan.io/> . [Přístup: 2020-06-25].
- [39] Covid-19 – Folding@home.[Online]. Dostupné z: <https://foldingathome.org/covid-19/> . [Přístup: 2020-06-26].

**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK**

Symbol	Veličina	Jednotka
$v$	Rýchlosť prúdenia vody	$[m \cdot s^{-1}]$
$\nu$	Kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$Pr$	Prandtlovo číslo	[-]
$\lambda$	Tepelná vodivosť vody	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
$\rho$	Hustota vody	$[Kg \cdot m^3]$
$c_{pv}$	Tepelná kapacita vody	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$T_{cl}$	Teplota studenej vody na vstupe	[K]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[-]
$D_h$	Hydraulický priemer	[mm]
$S$	Prietokový prierez	$[mm^2]$
$o$	Omáčaný obvod cievky	[mm]
$De$	Deanovo číslo	[-]
$Nu_H$	Nusseltovo číslo za konštantného tepelnej toku	[-]
$x_1 x_2$	Koeficient v Nusseltovho čísla	[-]
$\alpha$	Celkový koeficient prestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$Q$	Tepelný tok	[W]
$m_c$	Hmotnostný prietok	$[kg \cdot s^{-1}]$

Skratka	Popis	Jednotka
POW	Proof of work	[-]
BTC	Bitcoin	[-]
ETH	Ethereum	[-]
CPU	Central processing unit	[-]
GPU	Graphics processing unit	[-]
ASIC	An application-specific integrated circuit	[-]
CRAC	Computer room air conditioning	[-]
CRAH	Computer room air handler	[-]
HVAC	Heating, ventilation, and air conditioning	[-]
IRC	In-row cooling	[-]
RDC	Rear-door cooling	[-]
TEG	Termoelektrický generátor	[-]
ROI	Return on investment	[-]